

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

MINISTRY OF EDUCATION  
AND SCIENCE OF UKRAINE

National Technical University  
"Kharkiv Polytechnic Institute"

**Вісник Національного  
технічного університету  
«ХПІ». Серія: Енергетика  
надійність та  
енергоефективність**

№ 10 (1286) 2018

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

**Bulletin of the National  
Technical University  
"KhPI". Series: Energy:  
Reliability and  
Energy Efficiency**

No. 10 (1286) 2018

Collection of Scientific papers

The edition was founded in 1961

Харків  
НТУ «ХПІ», 2018

Kharkiv  
NTU "KhPI", 2018

**Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність** = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency : зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». — Харків : НТУ «ХПІ», 2018. — № 10 (1286) 2018. — 112 с. — ISSN 2224-0349.

Видання присвячене питанням теоретичних та практичних результатів досліджень і розробок, пов'язаних з проблемами надійності та ефективності роботи енергетичного устаткування, а також електроенергетичної системи в цілому. Розглядаються проблеми електроспоживання, енергозбереження і підвищення якості електричної енергії.

Для науковців, викладачів вищої школи, аспірантів, студентів і фахівців в галузі енергетики, надійності та ефективності роботи енергетичного устаткування .

The publication is devoted to the issues of theoretical and practical results of research and development associated with problems of reliability and efficiency of power equipment and power system as a whole. The problems of electricity consumption, energy saving and improvement of the quality of electric energy are considered.

For scientists, teachers of higher education, post-graduate students, students and specialists in the field of energy, reliability and efficiency of power equipment

Державне видання.

Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України

КВ № 5256 від 2 липня 2001 року.

Мова статей – українська, російська, англійська.

*Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність внесено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», затвердженого Наказом МОН України №1328 від 21.12.2015 р. «Про затвердження рішень Атестаційної колегії*

У квітні 2013 р. Вісник НТУ «ХПІ» Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність включений у довідник періодичних видань бази даних Ulrich's Periodical Directory (New Jersey, USA).

**Офіційний сайт видання:** <http://samit.khpi.edu.ua/>

Засновник

Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

Founder

National Technical University  
"Kharkiv Polytechnic Institute"

**Головний редактор**

Сокол Є. І., д-р техн. наук, чл.-кор. НАН України, НТУ «ХПІ», Україна

**Заст. головного редактора**

Марченко А. П., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

**Секретар**

Горбунов К. О., доц., НТУ «ХПІ», Україна

**Редакційна колегія серії**

*Відповідальний редактор:*

Гурин А. Г., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

*Відповідальний секретар:*

Федорчук С. О., аспірант, НТУ «ХПІ», Україна

*Члени редколегії:*

Бондаренко В.Є., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Безпрозванних Г. В., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Веприк Ю. М., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Гриб О. Г., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Семдерович Г. А., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Лазуренко О. П., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Махотило К. В., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Шевченко С. Ю., проф., НТУ «ХПІ», Україна

**Editor-in-chief**

Sokol E. I., dr. tech. sc., member-cor. of National Academy of Sciences of Ukraine, NTU "KhPI", Ukraine

**Deputy editor-in-chief**

Marchenko A. P., dr. tech. sc., prof., NTU "KhPI", Ukraine

**Secretary**

Gorbunov K. O., docent, NTU "KhPI", Ukraine

**Editorial staff**

*Associate editor:*

Gurin A. G., prof., NTU "KhPI", Ukraine

*Executive secretary:*

Fedorchuk S.O., postgraduate student, NTU "KhPI", Ukraine

*Editorial staff members:*

Bondarenko V.E., professor, NTU "KhPI", Ukraine

Bezprozvannyh G.V., professor, NTU "KhPI", Ukraine

Vepruk Yu. M., professor, NTU "KhPI", Ukraine

Gryb O.G., professor, NTU "KhPI", Ukraine

Semerovich G. A., Professor, NTU "KhPI", Ukraine

Lazurenko O.P., Professor, NTU "KhPI", Ukraine

Makhotylo K.V., Professor, NTU "KhPI", Ukraine

Shevchenko S. Yu., Professor, NTU "KhPI", Ukraine

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».

Протокол № 4 від 04 травня 2018 р.

© Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 2018

УДК 697.7

**О. В. БУЛГАКОВ, І. А. НЕМИРОВСЬКИЙ****ВИЗНАЧЕННЯ ВИТРАТ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ БУДІВЛЕЮ З УРАХУВАННЯМ ЗМІННОГО ДОБОВОГО ГРАФІКУ ВНУТРІШНЬОЇ ТЕМПЕРАТУРИ**

Порівнюються декілька методів розрахунку витрат теплової енергії будівлею, у тому числі і за допомогою математичного моделювання. Пропонується використання фактичних даних температури зовнішнього повітря та змінного добового графіку внутрішніх температур.

**Ключові слова:** пасивний будинок, погодний архів, математичне моделювання, теплове навантаження.

**О. В. БУЛГАКОВ, И. А. НЕМИРОВСЬКИЙ****ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАТРАТ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ ЗДАНИЕМ С УЧЕТОМ ПЕРЕМЕННОГО СУТОЧНОГО ГРАФИКА ВНУТРЕННЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ**

Сравниваются несколько методов расчета затрат тепловой энергии зданием, в том числе и с помощью математического моделирования. Предлагается использование фактических данных температуры наружного воздуха и переменного суточного графика внутренних температур.

**Ключевые слова:** пассивный дом, погодный архив, математическое моделирование, тепловая нагрузка.

**O. V. BULHAKOV, I. A. NEMYROVSKIY****DETERMINATION OF THERMAL ENERGY COSTS OF THE BUILDING TAKING INTO ACCOUNT THE VARIABLE DAILY INTERNAL TEMPERATURE PROFILE**

Several methods for calculating the cost of thermal energy in a building are compared, including with the help of mathematical modeling. It is proposed to use the actual data of the outdoor air temperature and the variable daily internal temperature profile.

**Keywords:** passive house, weather archive, mathematical modeling, thermal load.

**Вступ.** Будівництво будівель з енергетичним балансом близьким до нульового, знаходиться на стадії активного розвитку в багатьох європейських країнах, які ведуть політику енергозбереження. Фактично будівництво подібного типу будівель в Європі регулюється і заохочується на державному рівні: прийнята в 2002 р. Директива European Energy Performance of Buildings Directive 2002/91 / EC (EPBD) передбачає ряд заходів, спрямованих на зниження енерговитрат при будівництві, встановлення мінімальних вимог до енергетичної ефективності будівель.

Згідно з прийнятою директивою (Energy Performance of Buildings Directive 2010/31 / EU), у державах – членах Євросоюзу, до 31 грудня 2020 для всіх нових будинків повинні бути забезпечені умови будівництва відповідно до параметрів будівлі з близьким до нульового енергетичним балансом, а також розроблені національні плани збільшення кількості експлуатованих будівель, що відповідають цим критеріям.

Крім того, з метою обмеження енергоспоживання в багатьох країнах Європи введено обмеження теплоспоживання споруджуваних будинків не більше 60–70 кВт·год/(м<sup>2</sup>·рік). Однією із передових будівельних концепцій, виконуючих ці вимоги є стандарт «Passive house».

**Пасивний будинок в українському кліматі.** Чи можна «Passive house», оптимізований для кліматичних умов Німеччини і Середньої Європи, безпосередньо застосувати для тієї частини України, де проживає основна частина її населення? За винятком окремих областей, відповідь скоріше буде негативною. Необхідно вносити значні зміни, хоча

головні принципи залишаються (посилення теплоізоляції, ефективні вікна і вентиляційна система з рекуператором). Пасивний будинок передбачає максимальне використання сонячної радіації. Взимку в Німеччині баланс теплопостачань через енергоефективні вікна дає основний внесок в поповнення тепловтрат будівлі, якщо застосувати вікна великої площі на його південній стороні. При цьому теплова оболонка і вентиляційна система повинні відповідати стандартам пасивного будинку. Це поєднання дозволяє поєднати вентиляцію і опалення шляхом незначного нагрівання припливного повітря, не перевищуючи при цьому відносно невелике навантаження, величиною до 10 Вт/м<sup>2</sup>. Таке спрощення системи опалення дає помітний виграв у вартості. На додаток до цього, питома витрата теплової енергії на опалення не повинна перевищувати 15 кВт·год/м<sup>2</sup>. Така в загальних рисах формула пасивного будинку. В умовах, наприклад, Харківської області, вигляд системи опалення визначають невисока інтенсивність сонячної радіації і низькі температури (включаючи найбільш холодну п'ятиденку) в зимові місяці. Відповідно, повітряне опалення за допомогою нагрівання повітря після теплообмінника вентиляційної системи, як в пасивному будинку, буде достатньо тільки в окремі періоди опалювального сезону. Основні зимові місяці потребують додаткового опалення, або окремої системи, не суміщеної з вентиляційної. Наступний критерій для пасивного будинку – досягнення величини питомої витрати теплової енергії на опалення не більше 15 кВт·год/м<sup>2</sup> за опалювальний період, можна досягти в наших умовах, але зі значним застереженнями. При цьому, крім точного

проектування і виготовлення, бажано поставити теплоізолюючі віконниці на вікна і тим вирішити проблему нічних тепловитрат через вікна в зимові місяці. Зрозуміло, що додаткові провітрювання (шляхом відкриття вікон) неприпустимі, потрібно виконати всі обов'язкові заходи щодо герметизації, відсутності теплових мостів і т. д. З урахуванням всіх реалій, в наших умовах будівництво такого будинку стає сильно ускладненим.

**Теплове навантаження пасивного будинку.** Виходячи з вищесказаного, зрозуміло дві речі: по-перше, типовий німецький проект пасивного будинку, однозначно буде потребувати додаткових інженерних систем тепlopостачання, та кондиціонування, не поєднаних із системою вентиляції, по-друге, архітектурні рішення використанні в пасивному будинку, накладають потребу у більш точному визначенню теплового навантаження, і як наслідок, підбору теплогенератора. Спробуємо визначити річні витрати теплової енергії типового проекту пасивного будинку по діючій методиці, що приведена у ДСТУ-Н Б А.2.2-5.2007 – «Настанова з розроблення та складання енергетичного паспорту будинків при новому будівництві та реконструкції».

Загальні тепловитрати будинку через огорожувальну оболонку за опалювальний період визначаються за формулою (1):

$$Q_k = x_1 \cdot K_{\text{буд}} \cdot D_d \cdot F_{\Sigma}; \quad (1)$$

де  $x_1 = 0,024$  – розмірний коефіцієнт;

$D_d$  – кількість градусо-днів опалювального періоду, що визначається залежно від температурної зони експлуатації згідно з ДБН В.2.6-31. Для I кліматичної зони приймається  $D_d = 3750$  °C·днів.

$F_{\Sigma}$  – загальна площа внутрішньої поверхні зовнішніх огорожувальних конструкцій, м<sup>2</sup>;

$K_{\text{буд}}$  – загальний коефіцієнт теплопередачі теплоізоляційної оболонки будинку, Вт/(м<sup>2</sup>·K).

$$Q_k = 0,024 \cdot 0,23 \cdot 3750 \cdot 515 = 10660 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

**Використання фактичних кліматичних даних.**

Одним із недоліків існуючої методики розрахунку є використання фіксованої кількості градусо-днів. У випадку якщо є необхідність розрахувати теплові

витрати за конкретний рік, або порівняння витрат за декілька років, такий метод є недостатньо точним.

Спробуємо використовувати замість усереднених температурних показників, базу даних із фактичними температурами за 2016 рік, взятої із архіву погодних даних Харківського аеропорту. Для цього розрахуємо фактичний показник кількості градусо-днів, за формулою (2):

$$D'_d = (t_v - t_8)z_8; \quad (2)$$

де  $t_v$  – розрахункова температура внутрішнього повітря;

$t_8$  – середня температура періоду з середньою добовою температурою повітря нижче або рівною 8 °C;

$z_8$  – тривалість (в добах) періоду з середньою добовою температурою повітря нижче або рівною 8 °C.

За допомогою програмного продукту MS Excel підрахуємо всі вищезазначені змінні, і підставимо у формулу (2).

$$D'_d = (20 - (-1)) \cdot 173 = 3631 \text{ днів}$$

Як бачимо, кількість градусо-днів опалювального періоду за 2016 рік, не значно відрізняється від нормованої величини зазначеної у ДСТУ, але коли розрахунок проводиться заради знаходження тепловитрат за конкретний рік, наприклад для подальшого складання енергетичного балансу будівлі, представлений метод можна позиціонувати як більш точний.

Розрахуємо загальні витрати будинку із урахуванням величини  $D'_d$  підставивши її у формулу (1):

$$Q_k = 0,024 \cdot 0,23 \cdot 3631 \cdot 515 = 10322 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

**Використання математичного моделювання для розрахунку тепловитрат.** Одним із шляхів подальшого підвищення точності розрахунку тепловитрат – є використання математичної моделі. У попередньому розрахунку кількість градусо-днів розраховувалась спираючись на використання середньодобової температури, але у відкритому доступі легко можна знайти і більш точні дані.

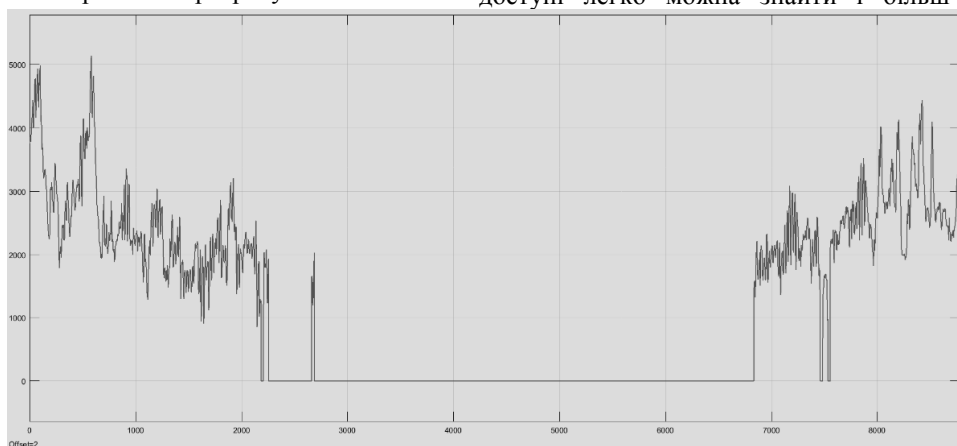


Рис. 1 – Теплове навантаження будинку протягом 2016 року

Наприклад, у тому ж архіві Харківського аеропорту доступні виміри температури зроблені

кожні 3 години, і за допомогою математичної моделі, ми можемо розрахувати річні теплові витрати як

трикратну суму поточних теплових навантажень будинку.

Для розрахунку теплового навантаження будинку скористуємось формулою (3):

$$Q = K_{\text{буд}} \cdot F_{\Sigma} \cdot (t_{\text{вн}} - t_{\text{зов}})$$

де  $t_{\text{вн}}$  – температура в приміщенні згідно до ДСН 3.3.6.042-99;

$t_{\text{зов}}$  – температура зовнішнього повітря.

Результат моделювання теплового навантаження будинку протягом 2016 року зображено на рис. 1. Щодо річних тепловитрат розрахованих за допомогою цього методу, то вони майже не відрізняються від попередніх, і складають  $Q = 10334 \text{ кВт}\cdot\text{год}$ , що з однієї сторони говорить про те що підвищення точності розрахунку не привело до радикальної зміни

результату, і попереднього методу достатньо, з другої сторони підтверджує правильність роботи нашої математичної моделі.

**Використання змінного графіку внутрішніх температур.** У всіх попередніх методах внутрішня температура приймалась виключно як константа, але реалії сьогодення говорять про те що такий спосіб опалення побутового приміщення є дуже марнотратним, так як не береться за увагу фактор відсутності резидентів у робочі години будніх днів.

Побудована нами модель дозволяє розрахувати тепловитрати будівлі із урахуванням змінного графіку внутрішньої температури. Запропоновані нами графіки для будніх та вихідних днів зображені на рисунках 2 і 3 відповідно.

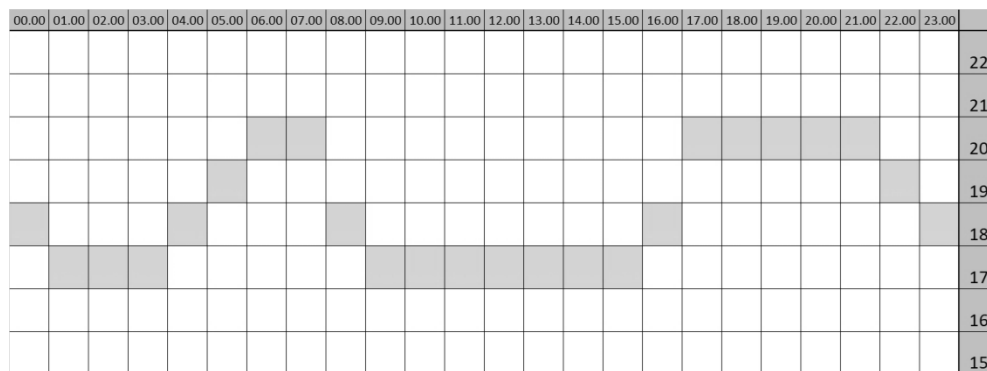


Рис. 2 – Графік внутрішньої температури для будніх днів

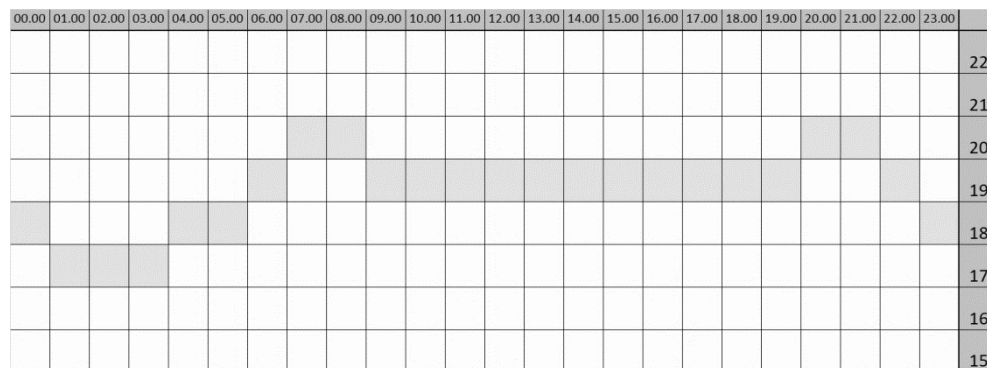


Рис. 3 – Графік внутрішньої температури для вихідних днів

**Висновки.** Внесення у модель змінної величини внутрішньої температури, дозволило досягти значного зменшення тепловитрат через огорожувальну оболонку будинку (див. таб. 1), але при подальших експериментах із моделлю, стало зрозуміло, що при використанні однакового графіку

внутрішньої температури, на протязі всього року, значно зростають витрати на кондиціонування влітку, тобто для збереження балансу між комфортом і витратами енергії, потрібно використовувати різні графіки для різних сезонів на протязі року.

Таблиця 1 – Порівняльна таблиця різних методів розрахунку

Опис розрахунку	$D_d = 3750$ °C□діб. (загальна величина)	$D_d = 3631$ °C□діб. (розрахована величина)	Фактичні витрати при $t_v=const$	Фактичні витрати при $t_v=var$
Витрати тепла через огороджувальну оболонку (кВт□год)	10660	10332	10334	9540

**Список літератури**

1. Файст В. Основные положения по проектированию пассивных домов. / Вольфганг Файст. – Москва: ООО "Издательство АСВ", 2011. – 148 с.
2. Строительная климатология: ДСТУ-Н Б В.1.1-27: 2010.– [Дата введенья 2011-11-01]. / Мінрегіонбуд України. – К.: Укрархбудінформ, 2011. – 123 с. – (Национальный стандарт Украины).
3. Проектування. Настанова з розроблення та складання енергетичного паспорта будинків при новому будівництві та реконструкції: ДСТУ-Н Б А.2.2-5:2007. – [Чинний від 01.07.2008]. - К.: Мінрегіонбуд України, 2008. - 44 с. – (Державний стандарт України).
4. Техническая теплофизика ограждающих зданий и сооружений / В. А.Малыренко, А. Ф. Редько, Ю. И. Чайка, В. Б. Поволочко. – Харьков: РУБИКОН, 2001. – 203 с.

**References (transliterated)**

1. Fajst V. Osnovnye polozhenija po proektirovaniju passivnyh domov. [Basic provisions for the design of passive houses] / Vol'fgang Fajst. – Moscow: ООО "Izdatel'stvo ASV", 2011. – 148 p.
2. Stroitel'naja klimatologija [Construction climatology]: DSTU-N B V.1.1-27: 2010.– [Date of introduction 2011-11-01]. / Minregionbud Ukraini. – K.: Ukrarhbuildinform, 2011. – 123 s. – (National standard of Ukraine).
3. Design. Nastanova z rozroblennya ta skladannya enerhetychnoho pasporta budynkiv pry novomu budivnytstvi ta rekonstruktsiyi: [Guidelines for the development and assembly of energy passports for buildings under new construction and reconstruction] DSTU-N B A.2.2-5:2007. – [Date of introduction 01.07.2008]. - K.: Minrehionbud Ukrayiny, 2008. - 44 s. – (National standard of Ukraine).
4. Tekhnicheskaya teplofyzika ohrzhdayushchykh zdanyy y sooruzhenyy [Technical thermophysics of enclosing buildings and structures] / V.A.Malyarenko, A.F. Redko, Yu.I. Chayka, V. B.Povolochko. - Kharkov: RUBIKON, 2001. - 203 p.

Надійшла (received) 05.02.2018

**Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors**

**Булгаков Олексій Віталійович (Булгаков Алексей Витальевич, Bulhakov Oleksii Vitaliiiovych)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» аспірант кафедри електричних станцій; тел.: (050) 280-24-02; e-mail: [alexbulgakov94@gmail.com](mailto:alexbulgakov94@gmail.com).

**Немировський Ілля Абрамович (Немировский Илья Абрамович, Nemyrovskiy Illia Abramovych)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних станцій, тел.: +38 (066) 755-52-99, e-mail: [alikhnem@ukr.net](mailto:alikhnem@ukr.net)

Укладач: С. О. Федорчук, аспірант

**В.Б. ВОЛОВЕЦЬКИЙ, А.В. ГНІТКО, С.В. ВАСИЛЕНКО, О.М. ЩИРБА, В.І. КОЦАБА, В.В. ВЕЛИЧКО**

### **ЕКСПЛУАТАЦІЯ ГАЗОКОНДЕНСАТНИХ СВЕРДЛОВИН В УМОВАХ НИЗЬКИХ РОБОЧИХ ТИСКІВ**

У процесі експлуатації газоконденсатних свердловин відбувається накопичення рідини на вибої та у стовбурі, що пов'язано з недостатньою енергією газового потоку, яка необхідна для винесення флюїда на поверхню. Ці ускладнення особливо характерні на завершальній стадії розробки родовищ. Наслідком їх є негативний вплив на стабільну експлуатацію свердловин, що може спричинити зниження видобування вуглеводнів та в окремих випадках і зупинку свердловини, а також тривалий простій. Таким чином, при розробці родовищ необхідно здійснювати контроль за параметрами експлуатації свердловин, що дозволить своєчасно запобігти зниженню їх видобувних можливостей. Актуальність цієї проблеми авторами розкрито на прикладі визначення умов експлуатації свердловин Сквирицького НГКР. За результатами розрахунків встановлено, що швидкість газорідної суміші є недостатньою для її винесення з вибою і відбувається низхідний рух рідини в колоні насосно-компресорних труб. В роботі запропоновано ряд комплексних заходів, таких як, зменшення діаметра ліфтових труб, застосування поверхнево-активних речовин та введення в експлуатацію дотискувальної компресорної станції. Використання оптимальних технологій видобутку дозволить забезпечити стабільну експлуатацію свердловин та сприятиме виконанню планових показників видобутку вуглеводнів.

**Ключові слова:** свердловина, газовий конденсат, пластова вода, накопичення рідини, швидкість газового потоку, ліфтові труби, поверхнево-активні речовини, дотискувальна компресорна станція.

### **В.Б. ВОЛОВЕЦЬКИЙ, А.В. ГНІТКО, С.В. ВАСИЛЕНКО, О.Н. ЩИРБА, В.И. КОЦАБА, В.В. ВЕЛИЧКО ЭКСПЛУАТАЦИЯ ГАЗОКОНДЕНСАТНЫХ СКВАЖИН В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ РАБОЧИХ ДАВЛЕНИЙ**

В процессе эксплуатации газоконденсатных скважин происходит накопление жидкости на забое и в стволе, что связано с недостаточной энергией газового потока, которая необходима для вынесения флюида на поверхность. Эти осложнения особенно характерные для завершающей стадии разработки месторождений. Следствием их является негативное влияние на стабильную эксплуатацию скважин, что может привести к снижению добычи углеводородов и в отдельных случаях и остановку скважины, а также длительный простой. Таким образом, при разработке месторождений необходимо осуществлять контроль за параметрами эксплуатации скважин, что позволит своевременно предотвращать снижение их добычающих возможностей. Актуальность этой проблемы авторами раскрыта на примере определения условий эксплуатации скважин Сквирицкого НГКР. По результатам расчетов установлено, что скорость газожидкостной смеси недостаточна для вынесения из забоя и происходит нисходящее движение жидкости в колонне насосно-компресорных труб. В работе предложен ряд комплексных мер, таких как, уменьшение диаметра лифтовых труб, применение поверхностно-активных веществ и введения в эксплуатацию дожимной компресорной станции. Использование оптимальных технологий добычи позволит обеспечить стабильную эксплуатацию скважин и способствовать выполнению плановых показателей добычи углеводородов.

**Ключевые слова:** скважина, газовый конденсат, пластовая вода, накопление жидкости, скорость газового потока, лифтовые трубы, поверхностно-активные вещества, дожимная компресорная станция.

### **V.B. VOLOVETSKYI, A.V. HNYTKO, S.V. VASYLENKO, O.M. SHCHYRBA, V.I. KOTSABA, V.V. VELYCHKO OPERATION OF GAS-CONDENSATE WELLS WITH LOW WORKING PRESSURES**

In the process of gas-condensate well operation the liquid can accumulate at the bottom hole and in the well bore, which is caused by the insufficient energy of gas flow, necessary to carry the fluid to the surface. All complications are common to the final stage of field development. They have the negative impact on the stable well operation, which can also cause the decline in hydrocarbons production and in some cases even well shut-down and also long downtime of the well. Therefore, in the process of field development it is important to control the parameters of well operation, which will facilitate the timely prevention of the decline in its production capacity. The authors have proved the topicality of the problem in terms of defining the production conditions of the wells in Skvortsivsk oil-gas condensate field. The calculation results have shown that the velocity of liquid-gas mixture is insufficient and it cannot be carried up to surface. This leads to the fluid downflow in the flow string. The article introduces a range of complex measures, such as the reduction in tubing diameter, use of surfactants and putting into operation of the booster compressor station. The use of the optimum production practices will promote stable well operation and help to achieve the planned production rates of hydrocarbons.

**Key words:** well, gas condensate, formation water, liquid loading, gas flow velocity, tubing, surfactants, booster compressor station.

**Вступ.** На початковій стадії розробки газових та газоконденсатних родовищ, які розробляються на виснаження, завдяки високим швидкостям газового потоку на вибої свердловин і незначній кількості рідини, що надходить з продуктивного пласта, вона практично повністю виноситься на поверхню.

На завершальній стадії розробки цих родовищ, на вибої свердловин, у більшості випадків, спостерігається накопичення рідини у стовбурі свердловини, що істотно знижує продуктивність зі створенням додаткового протитиску на пласт. У свою чергу, це може спричинити зменшення припливу вуглеводнів із пласта і призвести до порушення стабільної експлуатації свердловини. Інколи це призводить до вимушеної зупинки свердловини і

самоглушіння.

Таким чином, при виборі технологічного режиму встановлюють такий дебіт газу, який дозволяє забезпечити винесення рідини з вибою, виключає руйнування привибійної зони та забезпечує необхідні показники видобутку природного газу та вуглеводневого конденсату.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для отримання високих значень коефіцієнтів газоконденсатовилучення, згідно проекту розробки, необхідно забезпечити стабільну експлуатацію газоконденсатних свердловин. Негативний вплив на експлуатацію свердловин має наявність надходження з продуктивного пласта разом із газом рідини.

Багато дослідників вивчали динаміку

газорідинного потоку свердловин, зокрема Тернер Р.Д., Коулмен С.Б., Кондрат Р.М., Кондрат О.Р. та інші.

У роботі [1] висвітлено, що одним із параметрів, який характеризує умови стабільної роботи обводнених газових та газоконденсатних свердловин є мінімально-необхідний дебіт газу для винесення рідини з вибою на поверхню.

Тернер з співавторами [2] запропонував дві фізичні моделі процесу видалення рідини з газової свердловини: переміщення плівки рідини по стінках колони ліфтових труб і перенесення крапельної рідини потоком газу. Розрахунки з використанням моделі руху плівки по стінках труб вимагають чисельного інтегрування і більш складні, ніж розрахунки за допомогою моделі переносу крапельної рідини. Тернер порівняв результати розрахунків обома методами з фактичними промисловими даними і встановив, що модель перенесення крапельної рідини більш коректна. Пізніше аналогічна робота була пророблена Коулменом [3]. У результаті отримано рівняння, засновані на експериментальних кореляційних залежностях мінімальної швидкості газу, необхідної для видалення крапель рідини з вертикального стовбура свердловини, від тиску газу [4].

Тернером розроблено два різновиди кореляції, одну для винесення води, а іншу для винесення конденсату. Кореляція Тернера була випробувана на великому об'ємі фактичних промислових даних для свердловин із тиском на усті вищим за 1000 фунт/дюйм<sup>2</sup> (6,89 МПа). Запишемо рівняння Тернера [5] у вигляді:

$$V_{\text{води}} = \frac{5,321 \cdot (67 - 0,0031 \cdot P)^{1/4}}{(0,00319 \cdot P)^{1/2}}, \quad (1)$$

$$V_{\text{конд}} = \frac{4,043 \cdot (45 - 0,0031 \cdot P)^{1/4}}{(0,00319 \cdot P)^{1/2}}, \quad (2)$$

де  $V_{\text{води}}$ ,  $V_{\text{конд}}$  – швидкість газу для винесення води та конденсату, фут/с;  
P – тиск, фунт/дюйм<sup>2</sup>.

Для свердловин з тиском на усті нижчим 1000 фунт/дюйм<sup>2</sup> подібні залежності розроблені Коулменом:

$$V_{\text{води}} = \frac{4,434 \cdot (67 - 0,0031 \cdot P)^{1/4}}{(0,00319 \cdot P)^{1/2}}, \quad (3)$$

$$V_{\text{конд}} = \frac{3,369 \cdot (45 - 0,0031 \cdot P)^{1/4}}{(0,00319 \cdot P)^{1/2}}, \quad (4)$$

де  $V_{\text{води}}$ ,  $V_{\text{конд}}$  – швидкість газу для винесення води та конденсату, фут/с;  
P – тиск, фунт/дюйм<sup>2</sup>.

У [6, 7] висвітлено, що в результаті досліджень Тернер зі співавторами отримав формулу швидкості, яка необхідна для винесення рідини суцільним потоком газу.

$$V_o = \sqrt{30 \cdot \frac{\sigma \cdot g}{\gamma_g \cdot d_{\text{вн}}}}, \quad (5)$$

де  $\sigma$  – поверхневий натяг на межі розділу фаз, Н/м;

$g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>.

$\gamma_g$  – густина газу, кг/м<sup>3</sup>;

$d_{\text{вн}}$  – внутрішній діаметр ліфтових труб, мм.

Зустрічний рух газорідинної суміші та пов'язане з ним явище самоглушіння вивчалися багатьма дослідниками, серед яких був П. Л. Капіца [8].

З досліджень Капіци, необхідною умовою створення протипотокової течії в газовій свердловині є:

$$\sqrt{Fr_g \cdot \frac{\rho_g^2}{\rho_p - \rho_g}} > 0,72, \quad (6)$$

де  $Fr_g$  – параметр Фруда для газу;

$\rho_g$  – густина газу при  $P_{\text{виб}}$  і  $T_{\text{виб}}$ , кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_p$  – густина рідини, кг/м<sup>3</sup>.

**Формулювання цілей статті.** Вибір оптимальних умов експлуатації газоконденсатних свердловин на виснажених родовищах.

**Викладення основного матеріалу.** Багатьма науковцями проводились дослідження стосовно винесення рідини з вибою на поверхню. Згідно з промисловими даними, критична швидкість руху газу в башмаку ліфтових труб для винесення води зі свердловини залежить від діаметра труб і становить 5-10 м/с, а для конденсату менша швидкість. За даними М.М. Дурицького і С.М. Лютомського критична швидкість руху газу в башмаку ліфтових труб газоконденсатних свердловин становить 1,4-2,3 м/с, а за даними П.І. Манжоса для свердловин ряду газоконденсатних родовищ України змінюється від 2 до 5 м/с [9].

У [10] відповідно до результатів дослідів мінімальна швидкість газу, за якої відбувається винесення твердих частинок з вибою свердловини, складає 5-10 м/с.

Згідно джерел [11], [12] свердловину необхідно експлуатувати з мінімально допустимим дебітом (МДД) газу, який забезпечує винесення конденсату з вибою та зі стовбура. При МДД газу швидкість потоку в башмаку ліфтових труб повинна бути не меншою за 4 м/с.

За даними багатьох літературних джерел, для винесення рідких і твердих домішок необхідно забезпечити у стовбурі свердловини швидкість руху потоку газу понад 4 м/с. Необхідною умовою для винесення рідких і твердих домішок є швидкість потоку, яка визначається за формулою:

$$V \geq \frac{0,052 \cdot q_g \cdot Z_{\text{виб}} \cdot T_{\text{виб}}}{d_{\text{вн}}^2 \cdot P_{\text{виб}}} \geq 4 \text{ м/с}, \quad (7)$$

де  $V$  – швидкість газу для винесення рідких і твердих домішок з вибою на поверхню, м/с;

$q_g$  – дебіт газу при стандартних умовах, тис.м<sup>3</sup>/доб;

$Z_{\text{виб}}$  – коефіцієнт надстисливості газу при  $P_{\text{виб}}$  і  $T_{\text{виб}}$ ;

$T_{\text{виб}}$  – температура на вибої, К;

$d_{\text{вн}}$  – внутрішній діаметр ліфтових труб, см;

$P_{\text{виб}}$  – тиск на вибої, МПа.



Науковці ТОВ «Науково-дослідний інститут природних газів і газових технологій - Газпром ВНДІГАЗ» пропонують експлуатувати газоконденсатну свердловину з мінімально необхідним дебітом газу, який забезпечує винесення рідини з вибою. При цьому швидкість потоку газу в башмаку ліфтових труб рекомендується підтримувати в межах 2,5-3 м/с [13].

Під час експлуатації газоконденсатних свердловин за певних умов спостерігається зниження продуктивності через накопичення конденсату у привибійній зоні пласта (ПЗП), що обумовлюється двома головними чинниками. Один з них обумовлений збільшенням насиченості пористого середовища рідкою вуглеводневою фазою, що призводить до зменшення проникності для газу. Так, при низьких швидкостях потоку газу в колоні ліфтових труб накопичується вуглеводнева рідина, а потім відбувається її накопичення в зоні перфорації і ПЗП, що негативно впливає на надходження газу з продуктивного пласта. Іншим чинником є насичення пласта рідкою фазою, що може відбуватися за рахунок випадання ретроградного конденсату в пласті при експлуатації свердловини. На прикладі Астраханського ГКР розглянуто результати дослідження по свердловинах, за даними яких встановлено, що при збільшенні дебіту газу протягом певного періоду відповідно збільшується винесення конденсату та навпаки. Очевидно, що це можливо завдяки надходженню рідкої фази вуглеводнів з пласта [14]. Вищенаведене актуальне для свердловин, що експлуатуються з високим ГКФ. У таких умовах необхідно вибирати такий технологічний режим експлуатації, за якого конденсат виноситись газовим потоком зі свердловини на поверхню та далі, на установку підготовки газу (УПГ).

Наприклад, з практичного досвіду відомо, що в газоконденсатних свердловинах Юліївського НГКР, які експлуатувались з низькими робочими тисками відбувалося накопичення конденсату на вибої та в стовбурі, оскільки тиск на вході в УКПГ-2 практично однаковий з тиском першої ступені сепарації, а відтак швидкість газорідного потоку на вибої, усті та по шлейфу є недостатньою. Наслідком цього спостерігалось зменшення видобутку конденсату. У зв'язку з цим по ряду свердловин, що підключені до УКПГ-2 застосовували різні заходи щодо видалення конденсату з вибою та стовбура, зокрема закачування розчину ПАР із подальшим пуском свердловин в експлуатацію на УКПГ-1 або УКПН по газопроводу, оскільки на цих установках тиск першої ступені сепарації був нижчий. Крім цього, видалення конденсату зі стовбура свердловин здійснювали на установку підготовки газу шляхом закачування газоазотної суміші за допомогою ПАКС на усті та ряд інших заходів. З 2012 року проблему самоглушіння свердловин конденсатом вирішили шляхом введення в експлуатацію дотискувальної компресорної станції (ДКС), що дозволило понизити робочі тиски на свердловинах, а також тиск першої ступені сепарації та збільшити швидкість газорідного потоку.

Для визначення швидкості газу, необхідної для винесення рідини з вибою на поверхню, розглянемо

умови експлуатації газоконденсатних свердловин 21, 29, 31, 74, 78, 80 Сквирицького НГКР.

Швидкість газу на вході в ліфтові труби визначають за формулою:

$$W_z = 5,1 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{q_g \cdot Z_{\text{внб}} \cdot T_{\text{внб}}}{P_{\text{внб}} \cdot d_{\text{вн}}^2} \quad (8)$$

де  $W_z$  – швидкість газу на вході в ліфтові труби, м/с;

$q_g$  – дебіт газу при стандартних умовах, тис.м<sup>3</sup>/доб.;

$Z_{\text{внб}}$  – коефіцієнт надстисливості газу при  $P_{\text{внб}}$  і  $T_{\text{внб}}$ ;

$T_{\text{внб}}$  – температура на вибої, К;

$P_{\text{внб}}$  – тиск на вибої, МПа;

$d_{\text{вн}}$  – діаметр ліфтових труб, м.

Швидкість газу в інтервалі перфорації, що є достатня для видалення домішок, повинна становити  $v \sim 5$  м/с. За нижчою від цієї швидкості існує небезпека утворення пробки. При швидкості газу  $v \leq 11$  м/с, який містить агресивні компоненти, зокрема CO<sub>2</sub> та H<sub>2</sub>S, інтенсивність корозії ліфтових труб значно нижча, ніж при швидкості понад 11 м/с. Таким чином, з точки зору технології експлуатації швидкість руху потоку газу по стовбурі повинна складати  $5 \leq v \leq 11$  м/с [15].

Експериментально і промисловими дослідженнями встановлено, що мінімальна швидкість для винесення на поверхню твердих і рідких домішок, що надходять разом із газом на вибій свердловини повинна бути  $\geq 5$  м/с.

Фахівцями ІФНТУНГУ проводиться чимало досліджень та виведені нові залежності для розрахунку необхідного внутрішнього діаметру НКТ та мінімально-необхідного дебіту для забезпечення винесення рідини з вибою свердловини на поверхню [16].

Для винесення рідини з вибою свердловини потоком газу його швидкість повинна бути вище від критичного значення, що оцінюється за допомогою модифікованого параметра Фруда.

Визначимо модифікований параметр Фруда для газового потоку

$$Fr_z^* = \frac{W_z^2}{g \cdot d_{\text{вн}}} \cdot \frac{\rho_r}{\rho_p - \rho_r} \quad (9)$$

де  $W_z$  – швидкість газу на вході в ліфтові труби, м/с;

$g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;

$d_{\text{вн}}$  – внутрішній діаметр ліфтових труб, м;

$\rho_r$  – густина газу при  $P_{\text{внб}}$  і  $T_{\text{внб}}$ , кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_p$  – густина рідини, кг/м<sup>3</sup>.

У природних умовах без застосування додаткових заходів стійке винесення рідини з вибою свердловин відбувається за  $Fr_z^* = 1-1,5$  [10].

Важливим поняттям при описуванні руху газорідних сумішей по вертикальних трубах є поняття реверса плівки рідини. Швидкість газорідної суміші, при якій вся рідина знаходиться в плівці, реверсує і починає рухатися разом із газом, називають швидкістю реверса газорідної суміші або просто "швидкість реверса".

Швидкість реверса газорідинної суміші залежить від густини рідкої фази, густини газової фази і поверхневого натягу на межі поділу цих двох фаз. Швидкість реверса газорідинної суміші визначають за формулою:

$$W_{рев} = 3,3 \cdot \left[ \frac{g \cdot \sigma \cdot \rho_p^2}{(\rho_p - \rho_g) \cdot \rho_g^2} \right]^{1/4} \quad (10)$$

де  $W_{рев}$  – швидкість реверса, м/с;

$g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>.

$\sigma$  – поверхневий натяг на границі розділу фаз,

Н/м;

$\rho_p$  – густина рідини, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_g$  – густина газу при  $P_{виб}$  і  $T_{виб}$ , кг/м<sup>3</sup>.

Фактична швидкість газорідинної суміші може бути, як менша так і більша швидкості реверса. Тому для порівняння цих швидкостей використовується наступний критерій, як відносна швидкість газорідинної суміші  $W_{відн}$ , яку визначають за формулою:

$$W_{відн} = \frac{W_{сум}}{W_{рев}} \quad (11)$$

де  $W_{сум}$  – швидкість газорідинної суміші, м/с;

$W_{рев}$  – швидкість реверса, м/с.

На основі визначеної відносної швидкості газорідинної суміші можна зробити висновки щодо накопичення рідини на вибої:

1) якщо  $W_{відн} > 1$ , то вся рідина зі свердловини виноситься висхідним потоком газу, тобто відбувається видалення рідини з вибою свердловини;

2) якщо  $W_{відн} < 1$ , то частина рідини в півці на стінках НКТ починає рухатися проти висхідного потоку газу, що призводить до накопичення рідини на вибої свердловини.

Очевидно, що однонаправлений рух рідини і газу можливий тільки за умови, якщо відносна швидкість більше одиниці. При зниженні швидкості нижче за це значення настає нестійкий режим самоглушіння, при якому вся рідина або частина рідини стікає на вибій свердловини. При швидкості газу, за якої відбувається самоглушіння, рідина в півці починає опускатися назустріч висхідному потоку газу і за літературними джерелами становить  $W_{відн. закл.} = 0,845$ . При цьому можлива поява нестійких рідинних пробок в НКТ. Отже, за допомогою визначення відносної швидкості газорідинної суміші для конкретної свердловини можливо встановити, чи відбувається накопичення рідини на вибої цієї свердловини.

У газоконденсатних свердловинах підйом рідини відбувається за рахунок енергії газу, що рухається. У залежності від конструкції свердловини, дебіту газу і рідини, тиску і температури є різні структури течії газорідинної суміші у стовбурі свердловини:

- дисперсно-кільцева течія ( $W_{відн} \geq 2$ );
- кільцева течія ( $W_{відн} \geq 0,845$ );
- пробково-кільцева течія ( $0,845 < W_{відн} < 2$ );
- пробкова течія ( $W_{відн} < 0,845$  та  $Fr_g \geq 4$ );
- бульбашкова течія ( $W_{відн} < 0,845$  та  $Fr_g < 4$ ).

При всіх структурах течії газорідинної суміші, частина рідини знаходиться на стінках колони ліфтових труб у вигляді півки. Тому в залежності від

швидкості руху газу, рідина, що знаходиться в півці рухається за напрямком газового потоку або в зворотному напрямку.

Для видалення рідини, яка накопичується на вибої свердловин використовують різні технології. Спочатку визначають об'єм рідини у свердловині за допомогою ехолота, яким можна виміряти відстань до стовпа рідини в трубному, затрубному просторах. Для наближеного визначення об'єму накопиченої на вибої рідини використовують формулу, яка не враховує втрати на тертя [17, 18].

Ефективним способом видалення рідини із газових та газоконденсатних свердловин є застосування ПАР [19, 20]. Так, наприклад по підприємству ГПУ "Шебелинкагазвидобування" фахівцями УкрНДІгазу розробляється «Програма з оптимізації експлуатації свердловин за допомогою рідких ПАР», узгоджується з підприємством та затверджується в ПАТ "Укргазвидобування" на рік. Планування та геологічне супроводження робіт згідно вказаної програми здійснюється геологічною службою ГПУ "Шебелинкагазвидобування", а організація та виконання проводиться цехами з видобутку вуглеводнів. Крім цього, розробляється «Програма з оптимізації експлуатації свердловин за допомогою твердих ПАР». Завдяки впровадженні таких програм можна забезпечувати стабільну експлуатацію свердловин, виконання планових показників із видобутку вуглеводнів, а також очікуваний додатковий видобуток газу близько 10 %. За результатами проведених робіт із застосування ПАР на свердловинах, у ці програми вносять корективи.

Визначимо умови експлуатації газоконденсатних свердловинах 21, 29, 31, 74, 78, 80 Сквицького НГКР обладнаних колоною ліфтових труб із внутрішнім діаметром 62 мм:

- умова створення протипотокової течії  $(Fr_g \cdot \rho_g^2 / (\rho_p - \rho_g))^{0,5} > 0,72$  і знаходиться в межах 0,81-2,08;

- швидкість газу на вході в ліфтові труби  $W_g = 0,482-1,164$  м/с;

- модифікований параметр Фруда для газового потоку  $Fr_g^* = 0,02-0,11$ ;

- швидкість реверса газорідинної суміші  $W_{рев} = 2,323-2,757$  м/с;

- відносна швидкість газорідинної суміші  $W_{відн} = 0,185-0,455$ .

За результатами виконаних розрахунків видно, що свердловини в даних умовах експлуатуються нестабільно та відбувається накопичення рідини на вибої. Одним зі шляхів вирішення даної проблеми є зменшення діаметра колони ліфтових труб.

Для визначення необхідних заходів зі стабілізації експлуатації газоконденсатних свердловин 21, 29, 31, 74, 78, 80 Сквицького НГКР проведемо розрахунки наступних величин  $W_g$ ,  $Fr_g^*$ ,  $W_{відн}$  при зменшенні діаметра колон ліфтових труб на 50,3 мм, 40,3 мм, 35,2 мм, 26,4 мм. Очевидно, що найбільшого значення розраховані величини мають при зменшенні діаметра ліфтових труб з 62,0 мм до 26,4 мм. Досягнути швидкості газового потоку 5 м/с можна не на всіх свердловинах. Так, на трьох свердловинах, а

саме на: 21, 29, 80  $W_r > 5$  м/с, на свердловині 31  $W_r \sim 4$  м/с, свердловині 74  $W_r \sim 3$  м/с, свердловині 78  $W_r > 4$  м/с. Проте на всіх свердловинах  $Fr_r^* > 1$ ,  $W_{відн} > 1$ .

Зважаючи на огляд вище викладених літературних джерел, швидкість руху газу в башмаку ліфтових труб для винесення води зі свердловини повинна становити від 5 м/с та вище, а для вуглеводневого конденсату від 3 м/с та вище. Забезпечити такі умови шляхом зменшення внутрішнього діаметру ліфтових труб при низьких дебітах газу не завжди можливо, тому необхідно застосовувати додаткові заходи, наприклад використання ПАР. У зв'язку з цим можна розглядати швидкість газу в башмаку ліфтових труб  $\sim 3-4$  м/с. Крім цього, НКТ рекомендується спустити на глибину з перекриттям інтервалу перфорації на 2/3.

За результатами проведених розрахунків та промислових досліджень щодо застосування рідких ПАР на свердловинах 21, 29, 31, 74, 78, 80 Сквицького НГКР, яким передувало проведення лабораторних досліджень складу рідини на вміст солей та кількості конденсату, визначено кількість ПАР (М) "Сольпен-10 Т" [21] для видалення рідини, об'єм закачування розчину ПАР ( $V_{ПАР}$ ) та концентрацію розчину (N). Після чого підібрано оптимальні концентрації розчину ПАР та періодичність його застосування у конкретних умовах кожної свердловини:

- св.21,  $d_{вн} = 35,2$  мм,  $L_{НКТ} = 3096$  м,  $M = 5,2$  кг,  $V_{ПАР} = 100$  л,  $N = 5,0$  %, 4 раз/місяць;
- св.29,  $d_{вн} = 35,2$  мм,  $L_{НКТ} = 3140$  м,  $M = 9,4$  кг,  $V_{ПАР} = 120$  л,  $N = 7,5$  %, 4 раз/місяць;
- св.31,  $d_{вн} = 35,2$  мм,  $L_{НКТ} = 3154$  м,  $M = 9,5$  кг,  $V_{ПАР} = 120$  л,  $N = 7,6$  %, 4 раз/місяць;
- св.74,  $d_{вн} = 26,4$  мм,  $L_{НКТ} = 3057$  м,  $M = 6,6$  кг,  $V_{ПАР} = 100$  л,  $N = 6,3$  %, 4 раз/місяць;
- св.78,  $d_{вн} = 35,2$  мм,  $L_{НКТ} = 3196$  м,  $M = 8,0$  кг,  $V_{ПАР} = 120$  л,  $N = 6,4$  %, 4 раз/місяць;
- св.80,  $d_{вн} = 35,2$  мм,  $L_{НКТ} = 3207$  м,  $M = 7,0$  кг,  $V_{ПАР} = 100$  л,  $N = 6,7$  %, 4 раз/місяць.

Таким чином, виконання запропонованих комплексних заходів щодо зменшення внутрішнього діаметра колони ліфтових труб та їх спуску на оптимальну глибину, а також використання ПАР, дозволить оптимізувати експлуатацію газоконденсатних свердловин 21, 29, 31, 74, 78, 80 Сквицького НГКР, що сприятиме отриманню додаткового видобутку вуглеводнів.

Для стабілізації експлуатації свердловин Сквицького НГКР, що розробляється на виснаження, доцільно розглянути будівництво дотискуючої компресорної станції (ДКС) на УКПГ-1 [22]. У даний час газ із УКПГ-1, до якого підключені газоконденсатні свердловини 1, 81, 44, 77, 78, 80, 21, 29, 30, 31, 60, 74, подається у міжпромисловий газопровід і надходить на УКПГ-2 Юліївського НГКР. Крім цього, у даний міжпромисловий газопровід підключений інший міжпромисловий газопровід, по якому надходить газ зі свердловин 45, 10, 24, 50, що підключені до УКПГ-2 Сквицького НГКР. Фахівцями УкрНДІгазу виконано техніко-економічне обґрунтування доцільності введення в експлуатацію

ДКС на УКПГ-1 Сквицького НГКР, у якому розглянуто три варіанти:

- варіант 1 базовий при якому родовище розробляється на виснаження з існуючим фондом свердловин;

- варіант 2 передбачає будівництво ДКС, яка повинна забезпечити компримування газу з 0,2 МПа до 3,0 МПа. З метою оптимізації системи компримування газу проведено розподіл свердловин по групах згідно поточних та перспективних робочих тисків, а саме: низьконапірні ( $P_{роб} = 0,3-0,95$  МПа), середньонапірні ( $P_{роб} = 0,9-3,18$  МПа) та високонапірні ( $P_{роб} \geq 3,2$  МПа). Для цього запропоновано встановити двоступеневу компресорну станцію ДКС, яка складається з двох компресорних установок КУ-1 та КУ-2 виробництва компанії ARIEL (або аналог) із газовим приводом. У період 2018–2025 років компримування здійснюватиметься в послідовному режимі – установка КУ-1 із параметрами тисків –  $P_{вх} = 0,2$  МПа та  $P_{вих} = 0,85 \div 0,5$  МПа, далі – установка КУ-2 із параметрами тисків –  $P_{вх} = 0,85 \div 0,5$  МПа та  $P_{вих} = 3,0$  МПа. У 2026 році заплановано виведення з експлуатації компресорної установки КУ-1, при цьому установка КУ-2 (другий ступінь компримування) залишається в експлуатації з параметрами тисків –

$P_{вх} = 0,2$  МПа та  $P_{вих} = 3,0$  МПа. Газ високонапірних свердловин 1 та 44 починаючи з 2018 року у зв'язку зі зниженням робочих тисків заплановано подавати на компримування до КУ-2, а з 2022 р. – на КУ-1. Газ зі свердловини 81 Сквицького НГКР у 2025 році заплановано подавати на вхід у КУ-2. Будівництво двоступеневої ДКС на УКПГ-1 Сквицького НГКР дозволить забезпечувати подачу газу з двох технологічних установок УКПГ-2 та УКПГ-1 на УКПГ-2 Юліївського НГКР;

- варіант 3 передбачає будівництво двохступеневої ДКС та прокладання додаткового міжпромислового газопроводу від УКПГ-1 Сквицького НГКР до УКПГ-2 Юліївського НГКР із зовнішнім діаметром 273 мм і довжиною  $\sim 13$  км. Прокладання додаткового газопроводу дозволить понизити перепад тисків між двома об'єктами, тобто початковою (вихід УКПГ-1 Сквицького НГКР) та кінцевою (вхід УКПГ-2 Юліївського НГКР) точками з 1,8 до 0,3 МПа. Завдяки цьому, тиск на виході з УКПГ-1 знизиться з 3,0 до 1,6 МПа. Зменшення тиску на виході з ДКС призведе до зменшення капіталовкладень (вартості ДКС), оскільки потужність КУ-2 у порівнянні з другим варіантом зменшується з 580 кВт до 250 кВт. За даним варіантом в період 2018–2025 років, як і за варіантом 2, компримування здійснюватиметься в послідовному режимі: установка КУ-1 із параметрами тисків –  $P_{вх} = 0,2$  МПа та  $P_{вих} = 0,85 \div 0,5$  МПа, далі – установка КУ-2 із параметрами тисків –  $P_{вх} = 0,85 \div 0,5$  МПа та  $P_{вих} = 1,6$  МПа. У 2026 р. компресорна установка КУ-1 виводиться з експлуатації, при цьому установка КУ-2 (другий ступінь компримування) залишається в експлуатації з параметрами тисків –  $P_{вх} = 0,2$  МПа та  $P_{вих} = 1,6$  МПа. Газ високонапірних свердловин 1 та 44

починаючи з 2021 року у зв'язку зі зниженням робочих тисків подається на компримування до КУ-2, а з 2022 року – на КУ-1. Газ зі свердловини 81 Скворцівського НГКР у 2029 році подається на КУ-2. Отже, завдяки прокладенню додаткового міжпромислового газопроводу зменшиться тиск на виході зі Скворцівського НГКР, що дозволить зменшити капіталовкладення за рахунок облаштування ДКС удвічі меншої потужності у порівнянні з варіантом 2.

Згідно вищевказаного, подальша експлуатація свердловин родовища є економічно доцільною за всіма трьома варіантами, але розглядаючи варіанти 2 і 3 рекомендується, останній, як такий, що характеризується меншими капіталовкладеннями.

#### Висновки:

1 Використання рекомендацій, що наведені у статті на прикладі Скворцівського НГКР, дозволить забезпечити стабільну експлуатацію свердловин на виснажених родовищах.

2 За результатами розрахунків по газоконденсатних свердловинах 21, 29, 31, 74, 78, 80 Скворцівського НГКР рекомендується:

- збільшення швидкості газу, який у колоні НКТ із внутрішнім діаметром 62 мм становить менше 5 м/с, у 1,5; 2,4; 3,1; 5,5 рази досягається використанням колон НКТ із внутрішніми діаметрами: 50,3 мм, 40,3 мм, 35,2 мм та 26,4 мм відповідно. Тому, із урахуванням теперішніх умов експлуатації, доцільно на свердловинах 21, 29, 31, 78, 80 замінити ліфтові труби із внутрішнім діаметром 62,0 мм на труби із внутрішнім діаметром 35,2 мм, а на свердловині 74 на внутрішній діаметр 26,4 мм та здійснити їх спуск на визначену оптимальну глибину;

- застосовувати розчин ПАР, які підбрано на основі промислових досліджень, для видалення рідини зі свердловини.

3 Для оптимізації розробки родовища рекомендується введення в експлуатацію двохступеневої ДКС та прокладання додаткового міжпромислового газопроводу.

#### Список літератури:

1. Кондрат Р.М. Підвищення продуктивності низькодебітних обводнених газових і газоконденсатних свердловин / Р.М. Кондрат, О.Р. Кондрат, Ю.В. Марчук, І.І. Хомин // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. - Івано-Франківськ: ІФНТУНГ. - 2007. - № 3 (24). - С. 14–17.
2. Turner R. G., Hubbard M. G. and Dukler A. E. Analysis and prediction of minimum flow rate for the continuous removal of liquids from gas wells // Jour. Pet. Tech., November 1969.
3. Coleman S. B., Clay H. B., McCurdy D. G. et al. A new look at prediction gas-well load up // Jour. Pet. Tech., March 1991.
4. Кирсанов С.А. Определение расхода газа, обеспечивающего вынос жидкости с забоя / С.А. Кирсанов, С.К. Ахмедсафин, Ю. Н. Васильев // Технологии нефти и газа научно-технологический журнал. – Москва: Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина, 2012, №2 (79). – С. 39-43.
5. Джеймс Ли. Эксплуатация обводняющихся газовых скважин. Технологические решения по удалению жидкости из скважин / Перевод с английского / Джеймс Ли, Генри Никенс, Майкл Уэллс // М.: ООО Премииум Инжиниринг, 2008. – 384 с. – ISBN 978-5-903363-06-3.
6. Ширковский А.И. Разработка и эксплуатация газовых и газоконденсатных месторождений / А.И. Ширковский // Учеб. для вузов. - 2-е изд. перераб. и доп. - М.: Недра, 1987. -309 с.
7. Арбузов В.Н. Эксплуатация нефтяных и газовых скважин: учебное пособие. Часть 2. / В.Н. Арбузов // Томский

политехнический университет. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2012. – 272 с.

8. Гриценко А.И. Гидродинамика газожидкостных смесей в скважинах и трубопроводах / А.И. Гриценко, О.В. Кляпчук, Ю.А. Харченко // – М.: Недра, 1994. – 238 с. – ISBN 5-247-02869-4.

9. Бойко В.С. Довідник з нафтогазової справи / В.С. Бойко, Р.М. Кондрат, Р.С. Яремійчук; Івано-Франків. нац. техн.ун-т нафти і газу. – Львів. 1996. – 620 с. – ISBN 5-335-01293-5.

10. Акульшин А.И. Технология и техника добычи, хранения и транспорта нефти и газа / А.И. Акульшин, В.С. Бойко, В.М. Дорошенко, Ю.А. Зарубин // - Львов. – Издательство «СВИТ», 1991. – 245 с.

11. Инструкция по комплексному исследованию газовых и газоконденсатных пластов и скважин. Под ред. Г.А. Зотова, З.С. Алиева. М., «Недра», 1980, 301 с.

12. Гриценко А.И. Руководство по исследованию скважин / А.И.Гриценко, З.С. Алиев, О.М. Ермилов, В.В. Ремизов, Г.А. Зотов // – М.: Наука, 1995. – 523 с. – ISBN 5-02-002376-0.

13. Р Газпром 086-2010. Инструкция по комплексным исследованиям газовых и газоконденсатных скважин. – М.: Газпром экспо, 2011. – Ч. I. – 234 с.

14. Нысанова А.С. Особенности выноса конденсата газом / А.С. Нысанова // Газовая промышленность. – 2011. – №4. – С. 26-27.

15. Мирзаджанзаде А.Х. Основы технологии добычи газа / А.Х. Мирзаджанзаде, О.Л. Кузнецов, К.С. Басиев, З.С. Алиев // – М.: ОАО Издательство «Недра», 2003. – 880 с. – ISBN 5-247-03885-1.

16. Кондрат О.Р. Підвищення ефективності експлуатації свердловин та роботи системи збору і підготовки свердловинної продукції зі значним вмістом рідини / О.Р. Кондрат, Н.М. Гедзик // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. - Івано-Франківськ: ІФНТУНГ. - 2012. - № 4 (45). - С. 164–178.

17. Гвоздев Б.П. Эксплуатация газовых и газоконденсатных месторождений / Б.П. Гвоздев, А.И. Гриценко, А.Е. Корнилов // - Справочное пособие. – М.: Недра, 1988. – 575 с.: ил. ISBN 5-247-00142-7.

18. Зогуля Г. П. Осложнения и аварии при эксплуатации и ремонте скважин: учебное пособие / Г. П. Зогуля, А. В. Кустышев, В. П. Овчинников и др. ; под ред. Г. П. Зогуля. — Тюмень: ТюмГНГУ, 2012. — 372 с. ISBN 978-5-9961-0552-6.

19. Воловецкий В.Б. Технології видалення рідини із газових та газоконденсатних свердловин [Текст] / В.Б. Воловецкий, В.І. Коцаба, О.Ю. Витязь, О.М. Щирба, А.В. Дьомін, А.В. Гнітко, С.В. Василенко // Нафтогазова енергетика. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ. - 2016. – Вип. 2 (26). - С. 19-34.

20. Воловецкий В.Б. Особливості видобування вуглеводнів на Юліївському НГКР / В.Б. Воловецкий, О.М. Щирба, О.Ю. Витязь, В.В. Величко, В.І. Коцаба, С.В. Василенко // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ. - 2017. – Вип. 1 (42). - С. 33-45.

21. Добыча, подготовка и транспорт природного газа и конденсата. Справочное руководство в 2-х томах. Том 1 /Под ред. Ю.П.Коротаева, Р.Д.Маргулова - М.: Недра, 1984, 360 с.

22. Воловецкий В.Б. Перспективи збільшення обсягу вилучення рідких вуглеводнів з природного газу на УКПГ-2 Юліївського НГКР / В.Б. Воловецкий, М.В. Фрайт, О.М. Щирба, О.Ю. Витязь, В.І. Коцаба, В.В. Величко // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків: НТУ «ХПИ», 2017. – № 4. – С. 55-61.

#### References (transliterated):

1. Kondrat R.M., Kondrat O.R., Marchuk Yu.V., Khomyn I.I. Pidyvshchennia produktyvnosti nyzkodebitnykh obvodnennykh hazovykh i hazokondensatnykh sverdlovyn [Improving the productive capacity of marginal gas and gas-condensate wells with liquid-loading problems]. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshech* [Prospecting and development of oil and gas fields]. Ivano-Frankivsk, IFNTUNH, 2007, no. 3 (24), pp. 14–17.
2. Turner R. G., Hubbard M. G. and Dukler A. E. Analysis and prediction of minimum flow rate for the continuous removal of liquids from gas wells. *Jour. Pet. Tech.* November 1969.
3. Coleman S. B., Clay H. B., McCurdy D. G. et al. A new look at prediction gas-well load up. *Jour. Pet. Tech.* March 1991.
4. Kirsanov S.A., Ahmedsafin S.K., Vasiliev Yu. N. Opredelenie rashoda gaza, obespechivaiushchego vynos zhidkosti s zaboiia [Defining gas flow rate for carrying the fluid from the bottom hole to the surface]. *Tehnologii nefiti i gaza nauchno-tehnologicheskii zhurnal* [Oil and gas

technologies, academic and technological journal]. Moskva, Rossiyskiy gosudarstvennyi universitet nefiti i gaza im. I.M. Gubkina, 2012, no. 2 (79), pp. 39–43.

5. Dzheims Li, Genri Nikens, Maikl Uells *Ekspluatatsiia obvodniiaushchihisna gazovykh skvazhin. Tekhnologicheskie resheniia po udaleniui zhidkosti iz skvazhin* [Gas Well Deliquification: Solution to Gas Well Liquid Loading Problems]. Moscow, OOO Premium Inzhiniring, 2008. 384 p.

6. Shirkovskii A.I. *Razrabotka i ekspluatatsiia gazovykh i gazokondensatnykh mestorozhdenii* [Gas and gas-condensate field development and operation]. Moscow, Nedra, 1987. 309 p.

7. Arbutov V.N. *Ekspluatatsiia nefiianykh i gazovykh skvazhin* [Operation of oil and gas wells]. Tomsk, Izdatelstvo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2012. 272 p.

8. Gritsenko A.I., Klapchuk O.V., Kharchenko Yu.A. *Gidrodinamika gazozhidkosnykh smesi v skvazhinakh i truboprovodakh* [Hydrodynamics of liquid-gas mixtures in wells and pipelines]. Moscow, Nedra, 1994. 238 p.

9. Boiko V.S., Kondrat R.M., Yaremiichuk R.S. *Dovidnyk z naftohazovoi spravy* [Handbook of Petroleum Engineering]. Ivano-Frankiv. nats. tekhn.un-t nafty i hazu, Lviv, 1996. 620 p.

10. Akulshin A.I., Boiko V.S., Doroshenko V.M., Zarubin Yu.A. *Tekhnologii i tekhnika dobychi, khraneniia i transporta nefiti i gaza* [Technology and technique of oil and gas production, storage and transportation]. Lvov, Izdatelstvo "SVIT", 1991. 245 p.

11. Zotova G.A., Aliieva Z.S., ed. *Instruktsiia po kompleksnomu issledovaniui gazovykh i gazokondensatnykh plastov i skvazhin* [Instruction on the complex survey of gas and gas-condensate formations and wells]. Moscow, "Nedra", 1980. 301 p.

12. Gritsenko A.I., Aliiev Z.S., Ermilov O.M., Remizov V.V., Zotov G.A. *Rukovodstvo po issledovaniui skvazhin* [Guidelines for well surveying]. Moscow, Nauka, 1995. 523 p.

13. R Gazprom 086-2010. *Instruktsiia po kompleksnomu issledovaniui gazovykh i gazokondensatnykh skvazhin* [Instruction on complex survey of gas and gas-condensate wells]. Moscow, Gazprom ekspoz, 2011. Part I. 234 p.

14. Nysanova A.S. Osobennosti vynosa kondensata gazom [Condensate removal by gas]. *Gazovaia promyshlennost* [Gas industry]. 2011, no. 4, pp. 26–27.

15. Mirzadzhanzade A.Kh., Kuznetsov O.L., Basniiev K.S., Aliiev Z.S. *Osnovy tekhnologii dobychi gaza* [Fundamentals of gas production technology]. Moscow, OAO Izdatelstvo "Nedra", 2003. 880 p.

16. Kondrat O.R., Hedzyk N.M. Pidvyshchennia efektyvnosti ekspluatatsii sverdlvovnykh ta roboty systemy zboru i pidhotovky sverdlvovnoyi produktsii zi znachnym vmistom ridyny [Enhancing the operation efficiency of wells and systems of collection and processing of production fluid with high liquid content]. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshech* [Prospecting and development of oil and gas fields]. Ivano-Frankivsk, IFNTUNH. 2012, no. 4 (45), pp. 164–178.

17. Gvozdev B.P., Gritsenko A.I., Kornilov A.E. *Ekspluatatsiia gazovykh i gazokondensatnykh mestorozhdenii* [Development of gas and gas-condensate fields]. Moscow, Nedra, 1988. 575 p.

18. Zozulia G. P., Kustyshev A.V., Ovchinnikov V. P. et al. *Oslozheniia i avarii pri ekspluatatsii i remonte skvazhin* [Complications and accidents in the process of operation and maintenance of wells]. Tiumen, TiumGNGU, 2012. 372 p.

19. Volovetskyi V.B., Kotsaba V.I., Vytiaz O.Yu., Shchyrbra O.M., Diomin A.V., Hnitko A.V., Vasylenko S.V. *Tekhnologii vydalennia ridyny iz hazovykh ta hazokondensatnykh sverdlvovnykh* [Liquid removal technologies in gas and gas-condensate wells]. *Naftohazova enerhetyka* [Oil and gas power engineering]. Ivano-Frankivsk, IFNTUNH, 2016, no. 2 (26), pp. 19–34.

20. Volovetskyi V.B., Shchyrbra O.M., Vytiaz O.Yu., Velychko V.V., Kotsaba V.I., Vasylenko S.V. Osoblyvosti vydobuvannia vuhlevodniv na Yuliivskomu NHKR [Hydrocarbons production in Yuliivskiy OGCF] *Naukovyi visnyk Ivano-Frankivskoho natsionalnoho tekhnicheskoho universytetu nafty i hazu* [Scientific Bulletin of Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas]. Ivano-Frankivsk, IFNTUNH, 2017, no. 1 (42), pp. 33–45.

21. Korotaieva Yu.P., Margulova R.D., ed. *Dobycha, podgotovka i transport prirodnogo gaza i kondensata* [Production, processing and transportation of natural gas and condensate]. Volume 1. Moscow, Nedra, 1984. 360 p.

22. Volovetskyi V.B., Frait M.V., Shchyrbra O.M., Vytiaz O.Yu., Kotsaba V.I., Velychko V.V. Perspektivy zbilshennia obsiahu vyluchennia ridnykh vuhlevodniv z pryrodnoho hazu na UKPH-2 Yuliivskoho NHKR [Prospects of increasing the extraction volume of natural gas liquids at CGTP-2 of Yuliivskiy OGCF]. *Intehrovani tekhnologii ta enerhozberezhennia* [Integrated technologies and energy efficiency]. Kharkiv, NTU "KhPI", 2017, no. 4, pp. 55–61.

Надійшла (received) 12.12.2017

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Воловецький Володимир Богданович (Воловецкий Владимир Богданович, Volovetskyi Volodymyr Bohdanovych)** – старший науковий співробітник, Український науково-дослідний інститут природних газів «УкрНДІГаз», м. Харків; тел.: (057) 730-45-44; e-mail: vvb11@ukr.net

**Гнітко Андрій Володимирович (Гнитко Андрей Владимирович, Hnitko Andrii Volodymyrovych)**, старший науковий співробітник, Український науково-дослідний інститут природних газів «УкрНДІГаз», м. Харків тел.: (057) 730-45-45; e-mail: [agnitko@ukr.net](mailto:agnitko@ukr.net)

**Василенко Сергій Вікторович (Василенко Сергей Викторович, Vasilenko Serhii Viktorovych)**, старший науковий співробітник, Український науково-дослідний інститут природних газів «УкрНДІГаз», м. Харків; тел.: (057) 730-45-44; e-mail: [vasilenko.sergey@ndigas.com.ua](mailto:vasilenko.sergey@ndigas.com.ua).

**Щирба Оксана Миколаївна (Щирба Оксана Микол, Shchyrbra Oksana Mykolaivna)**, старший науковий співробітник, Український науково-дослідний інститут природних газів «УкрНДІГаз», м. Харків тел.: (057) 730-46-55; e-mail: [omschyrbra@ukr.net](mailto:omschyrbra@ukr.net)

**Коцаба Василь Іванович (Коцаба Василь Іванович, Kotsaba Vasyl Ivanovych)**, завідувач центру, Український науково-дослідний інститут природних газів «УкрНДІГаз», м. Харків тел.: (057) 730-46-55; e-mail: [kotsaba.vasily@ndigas.com.ua](mailto:kotsaba.vasily@ndigas.com.ua)

**Величко Віктор Валерійович (Величко Виктор Валерійович, Velychko Viktor Valeriyovych)**, старший науковий співробітник, Український науково-дослідний інститут природних газів «УкрНДІГаз», м. Харків тел.: (057) 730-46-55; e-mail: [victor\\_velichko@ukr.net](mailto:victor_velichko@ukr.net)

Укладач: С. О. Федорчук, аспірант.

УДК 620.92

**О. С. ГОЛОВЕШКО, А. М. ТЕРЕЩЕНКО, С. О. ФЕДОРЧУК****ОЦІНКА МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ГІДРОПОТЕНЦІАЛУ ОЧИСНИХ СПОРУД ДЛЯ ГЕНЕРАЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ**

Пропонується використовувати потенціал відновлювальних джерел енергій на очисних комплексах, а саме: гідроагрегатів для використання потенціалу водних ресурсів і сонячних електростанцій для використання сонячної радіації на непридатних для сільськогосподарської діяльності земель. Були зроблені розрахунки щодо можливої теоретичної генерації, для розрахунку було обрано конкретний об'єкт дослідження. Було зроблено висновки як найвигідніше реалізувати електричну енергію.

**Ключові слова:** відновлювальні джерела енергії, міні-ГЕС, СЕС, зелений тариф.

**О. С. ГОЛОВЕШКО, А. М. ТЕРЕЩЕНКО, С. О. ФЕДОРЧУК****ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГИДРОПОТЕНЦИАЛА ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ**

Предлагается использовать потенциал возобновляемых источников энергии на очистных комплексах, а именно: гидроагрегатов для использования потенциала водных ресурсов и солнечных электростанций для использования солнечной радиации на непригодных для сельскохозяйственной деятельности земель. Были сделаны расчеты по возможной теоретической по мощности, для расчета были выбраны конкретный объект исследования. Были сделаны выводы как выгоднее реализовывать электрическую энергию.

**Ключевые слова:** возобновляемые источники энергии, мини-ГЭС, СЭС, зеленый тариф.

**O. S. GOLOVESHKO, A. M. TERESHCHENKO, S. O. FEDORCHUK****EVALUATION OF USE HYDROPOTENTIAL TREATMENT FACILITIES FOR ELECTRIC ENERGY GENERATION**

It is proposed to use the potential of renewable energy sources at treatment plants, namely: hydroelectric generators for using the potential of water resources and solar power plants for using solar radiation on unfit for agricultural activities. Calculations were done on a possible theoretical generation, for the calculation, a particular object of study was chosen. It was concluded that it is more profitable to sell electric energy.

**Keywords:** renewable energy sources, mini-HPP, SES, green tariff.

**Вступ.**

Мета: використання потенціалу відновлювальних джерел на очисних спорудах.

Об'єкт дослідження: Харківські очисні споруди №1.

Постановка задачі:

1) Оцінка потенціалу стічних вод з метою вироблення електроенергії на гідротурбіні.

2) Використання потенціалу сонячної радіації з залученням для їх розміщення непридатних земель. Сумісна їх робота може збалансувати графіки добової генерації, що

збільшить стійкість системи і збільшить її ККД. Однак, слід зазначити ще один важливий аспект. Міський очисний комплекс №1 м. Харкова є доволі енергоємним господарством. Передача значних потужностей супроводжується втратами в лініях. Якщо частково забезпечити виробництво електроенергії на власні потреби прямо на комплексі, то це суттєво вплине на втрати потужності в лініях постачання до очисного комплексу.

Технологічна схема Диканівського очисного комплексу представлена на рис. 1

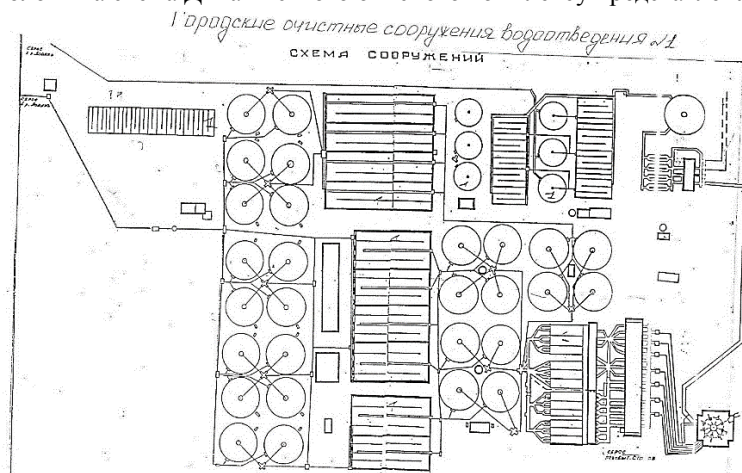


Рис.1 Міські очисні споруди водовідведення №1 м. Харкова

Найвигіднішою точкою для встановлення гідротурбіни є вихідний колектор очисного

© О. С. Голоवेशко, А. М. Терещенко, С. О. Федорчук, 2018

комплексу, зважаючи на такі фактори:

- найбільший потік води (за статистичними даними 2016 року річний водостік склав 138 млн м<sup>3</sup>);
- можливе забезпечення напору води до 4,34 м;
- максимальне механічне очищення води, яке забезпечує незначні відрахування на амортизацію порівняно з гідротурбінами на рівнинних річках;
- діаметр вихідного колектора складає 2000 мм.

За формулою теоретично можливого потенціалу води (1) були проведені попередні розрахунки.

$$P = 9,81 \cdot Q \cdot H \cdot \eta_{\text{уст}}, \quad (1)$$

де:  $P$  – теоретична потужність напору води, кВт;

$Q$  – швидкість стікання води, м<sup>3</sup>/с;

$H$  – напір води, м;

$\eta$  – середній ККД установки, який обчислюється як добуток ККД турбіни і ККД генератора:

$$\eta_{\text{уст}} = \eta_{\text{т}} \cdot \eta_{\text{г}} \quad (2)$$

В розрахунках  $\eta_{\text{уст}}$  приймаємо рівним 0,85.

На основі статистичних вимірів об'ємів витікання стічних вод за 2016 рік було проведено аналіз середнього річного діапазону швидкості стікання води в колекторі. Це дало змогу визначити теоретичний діапазон потужностей гідроагрегата без виконання штучного регулювання витікання води на вторинних відстійниках. Швидкість витікання в вихідному колекторі обчислена за формулою (3):

$$Q = \frac{V}{86400 \cdot m}, \quad (3)$$

де:  $V$  – кількість очищених стічних вод за місяць, м<sup>3</sup>;

86400 – кількість секунд в одній добі;

$m$  – кількість днів в місяці.

Аналітичні дані зведено в табл. 1. Річний графік теоретичної потужності гідроагрегату графічно представлено на рис. 2

Таблиця 1. Аналіз річного графіка витікання за 2016 рік

Місяць	Кількість очищених стічних вод, м <sup>3</sup>	Швидкість витікання, м <sup>3</sup> /с	Теоретична потужність, кВт
Січень	12 121 793	4,53	163,8
Лютий	11 764 560	4,7	169,9
Березень	12 150 653	4,54	164,2
Квітень	11 573 762	4,47	161,6
Травень	11 515 892	4,3	155,6
Червень	10 630 755	4,1	148,4
Липень	10 822 356	4,18	151,1
Серпень	10 733 182	4,01	145
Вересень	10 655 036	4,11	148,8
Жовтень	11 722 868	4,38	158,4
Листопад	12 317 387	4,75	172
Грудень	12 545 100	4,68	169,5
За рік	138 553 344	4,38	158,6

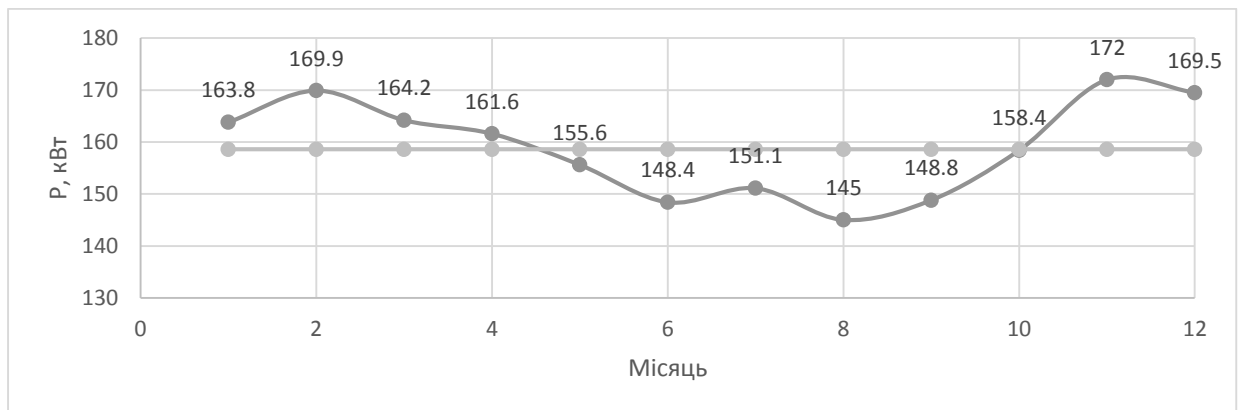


Рис. 2 Річний графік теоретичної потужності

Розрахунки показали, що потенціал води в кінці колектору становить від 145 до 172 кВт з урахуванням середнього ККД установки ( $\eta$ ).

Денний графік водостоку в каналізаційній системі не впливає суттєво на витікання на вихідному колекторі, оскільки перепади вирівнюються за рахунок відстоювання в первинних відстійниках, деаераторах і вторинних відстійниках.

Технологічний цикл очисного комплексу дозволяє регулювати водостік за допомогою накопичення води в деаератора і вторинних відстійниках. Таким чином можна регулювати потужність генерації. Цю можливість можна ефективно реалізувати при спільній генерації сонячної електростанції і гідротурбіни.

Графік генерації СЕС має значні піки в ясну сонячну погоду і провали в нічний час і за умов сильної хмарності. Маневруючи потужностями міні-ГЕС ми можемо вирівнювати спільний графік генерації, таким чином підвищуючи стійкість системи генерації СЕС і забезпечувати власні потреби очисного комплексу. Питоме енергоспоживання в водовідведенні в м. Харкові складає  $0,305 \frac{\text{кВт}\cdot\text{год}}{\text{м}^3}$ . Враховуючи об'єми витікання Диканівського очисного комплексу об'ємне енергоспоживання складатиме:

$$P_{\text{ст}} = \frac{V \cdot \beta}{T}, \quad (4)$$

де:  $\beta$  – питоме енергоспоживання на водовідведення в м. Харкові;

$T$  – кількість годин, за які здійснено витікання.

$$P_{\text{ст}} = \frac{138553344 \cdot 0,305}{8784} = 4,81 \text{ МВт} \quad (5)$$

Площі, які прилягають безпосередньо до очисного комплексу, не можуть бути використані за сільськогосподарським призначенням або для будівництва житла та інших господарських споруд.

Розглянувши можливість будівництва СЕС з фотоелектричними панелями, кут нахилу яких фіксований і оптимальний (для широт, в яких знаходиться Україна, коливається в діапазоні від 30 до 35 градусів), тобто забезпечує максимальний середній обсяг генерації, сонячні модулі необхідно розташовувати на місцевості з таким урахуванням, щоб уникнути взаємного затінення. У цьому випадку при монтуванні фотомодулів на стаціонарних (тобто без можливості надалі вручну або механічно змінювати орієнтацію і кут нахилу сонячної панелі) конструкціях, для розміщення СЕС потужністю 10 кВт площа потрібно близько 170-200 м<sup>2</sup>. Враховуючі ці параметри і наявні вільні площі ми зробили висновок, що можливе будівництво СЕС потужністю до 500 кВт. Добовий графік генерації СЕС приведено на рис. 3

На рис. 4 показані графіки спільної генерації СЕС і міні-ГЕС без маневрування потужностями ГЕС і на рис. 5 з можливим варіантом маневрування для максимального вирівнювання графіка спільної

генерації. Проте, зважаючи на значно більшу потужність власних потреб очисного комплексу, доцільніше компенсувати споживання власних потреб з енергосистеми, аніж штучно зменшувати потужність генерації гідротурбіни.

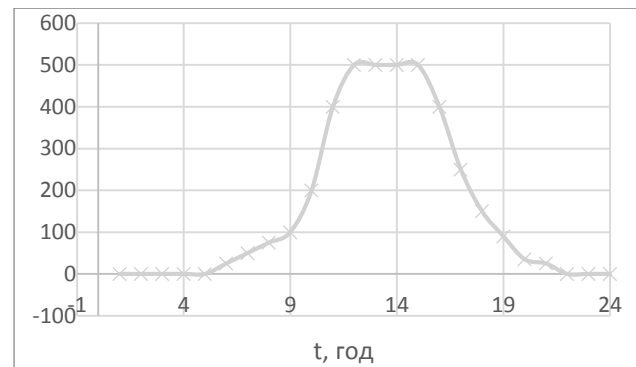


Рис. 3 добова генерація СЕС

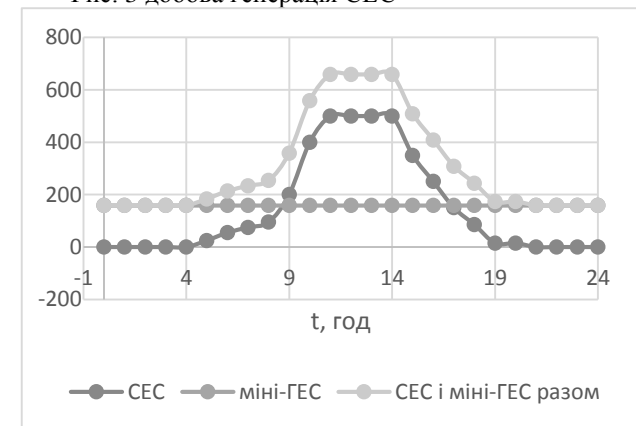


Рис. 4 Генерація СЕС і міні-ГЕС без маневрування

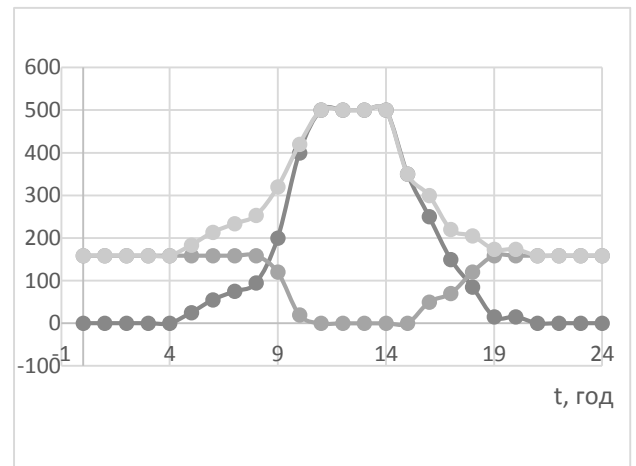


Рис. 5 Генерація СЕС і міні-ГЕС з маневруванням

Станом на квітень 2017 року для промислових і привітряних до них споживачів з повною потужністю більше 750 кВА і які підключені до першого класу напруги (35 кВ і більше) тариф встановлено  $150,744 \frac{\text{коп}}{\text{кВт}\cdot\text{год}}$ . «Зелений» тариф на електроенергію вироблену фотоелектричними панелями, які будуть встановлені до 31.12.2019 становить  $536,68 \frac{\text{коп}}{\text{кВт}\cdot\text{год}}$ . «Зелений» тариф на електроенергію вироблену на міні-ГЕС (до



3000 кВт) становить  $493,34 \frac{\text{коп}}{\text{кВт}\cdot\text{год}}$ . Розглянемо два варіанти: повне споживання виробленої електроенергії на власні потреби очисного комплексу і повний продаж виробленої електроенергії за «зеленим» тарифом і купівля електроенергії виключно з енергосистеми.

Порівнювати ці 2 варіанти будемо з повною покупкою електроенергії  $42\,251\,040 \text{ кВт}\cdot\text{год}$  з мережі:

Ціна електроенергії обчислюватиметься за формулою (6):

$$W = 8784 \cdot P \cdot \chi, \quad (6)$$

де:  $\chi$  – вартість електроенергії,  $\frac{\text{грн}}{\text{кВт}\cdot\text{год}}$ ;

$P$  – потужність, кВт.

$$W_+ = 8784 \cdot 4810 \cdot \frac{150,744}{100} = 63\,376\,560 \text{ грн}$$

Нестачу електроенергії на власні потреби ми купуємо з енергосистеми.

$$W_+ = 40\,437\,722 \cdot \frac{150,744}{100} = 60\,656\,583 \text{ грн} =$$

$W_1$ , (7)

Всю вироблену енергію ми споживаємо на місці, отже прибуток дорівнює 0.

Повністю купуємо з енергосистеми

$42\,251\,040 \text{ кВт}\cdot\text{год}$  електроенергії

Продаємо від СЕС:

$$W_{\text{СЕС-}} = 1\,118\,650 \cdot \frac{532,68}{100} = 5\,951\,218 \text{ грн} \quad (8)$$

Продаємо від міні-ГЕС:

$$W_{\text{ГЕС-}} = 694\,668 \cdot \frac{493,34}{100} = 3\,695\,633 \text{ грн} \quad (9)$$

$$W_2 = W_+ - W_{\text{СЕС-}} - W_{\text{ГЕС-}}, \quad (10)$$

$W_2 = 53\,729\,708 \text{ грн}$ ,

Порівнюємо сумарні баланси:

Для першого варіанту:

$$\Delta W = W - W_1 = 2\,719\,977 \text{ грн}, \quad (11)$$

Для другого варіанту:

$$\Delta W = W - W_2 = 9\,646\,851 \text{ грн}, \quad (12)$$

Наглядні данні зведено в табл. 2.

Таблиця 2. Кінцеві показники розрахунку

		базовий	1 варіант	2 варіант
Купівля з АК «ХОМ»	МВт*год	42 251,040	40 437,722	42 251,040
	грн	63 376 560	60 656 583	63 376 560
Генерація СЕС	МВт*год	0	1 118 650	0
	грн	0	0	-5 951 218
Генерація ГЕС	МВт*год	0	694 668	0
	грн	0	0	-3 695 583
Економія	грн	0	2 719 977	9 646 851

**Висновки.** Згідно наявних даних нами було проведено оцінку можливості генерації на відновлювальних джерелах енергії для міських очисних споруд міста Харків. Дослідження було проведено для можливості використання гідро потенціалу стічних вод та можливості побудови фотоелектричної електростанції. Крім того був проведений економічний розрахунок для знаходження найбільш економічно ефективного використання цих генеруючих потужностей. За розрахунками, що включали 2 варіанти – споживання виробленої електричної енергії на місці або продаж її за «зеленим тарифом» ми прийшли до висновку, що економічний ефект від другого варіанту є більш привабливим т.я. складає 9,6 млн грн/рік, що на 6,9 млн грн/рік вигідніше за альтернативний варіант.

#### Список літератури

1. В. В. Волианик, Г. В. Орехов / Низконапорные гидравлические двигатели // Наука, 2009. – 393 с.
2. Введение в гидротехнику / ред. Ю. П. Правдивец. – М. : Мир, 2009. – 290 с.
3. Магомедов А.М. / Нетрадиционные возобновляемые источники энергии. // Махачкала: Юпитер, 1996. – 245 с.
4. Харченко Н.В. / «Индивидуальные солнечные установки» //Изд. Энергоатомиздат, Москва, 1991 г. — 208 с.
5. Информационно-тематический сборник "Технологии и оборудование для комплексной очистки сточных вод с использованием биологических методов" №22: в 2 т. Т.1 : Установки для биологической и механобиологической очистки сточных вод. // Глобус, 2006.
6. Будыкина Т. А. / Технология подготовки питьевой воды: учебное пособие / Т. А. Будыкина, П. П. Кукин, В. М. Попов. // Курск : КГТУ, 2006. - 204 с.
7. Колесников В. А. / Анализ, проектирование технологий и оборудования для очистки сточных вод / В. А. Колесников, Н. В. Меньшутина. // М. : ДеЛи принт, 2005. - 266 с.

#### References (transliterated)

1. V. V. Volshnik, G. V. Orehov / Nizkonapornnye gidravlicheskie dvigateli // Nauka, 2009. – 393 s.
2. Vvedenie v gidrotehniku / red. Yu. P. Pravdivets. – M. : Mir, 2009. – 290 s.
3. Magomedov A.M. / Netraditsionnye vozobnovlyaemye istochniki energii. // Mahachkala: Yupiter, 1996. – 245 s.
4. Harchenko N.V. / «Individualnyie solnechnyie ustanovki» //Izd. Energoatomizdat, Moskva, 1991 g. — 208 s.
5. Informatsionno-tematicheskiy sbornik "Tehnologii i oborudovanie dlya kompleksnoy ochistki stochnyih vod s ispolzovaniem biologicheskikh metodov" #22: v 2 t. T.1 : Ustanovki dlya biologicheskoy i mehanobiologicheskoy ochistki stochnyih vod. // Globus, 2006.
6. Budyikina T. A. / Tehnologiya podgotovki pitevoy vody: uchebnoe posobie / T. A. Budyikina, P. P. Kukin, V. M. Popov. // Kursk : KGTU, 2006. - 204 s.
7. Kolesnikov V. A. / Analiz, proektirovanie tehnologii i oborudovaniya dlya ochistki stochnyih vod / V. A. Kolesnikov, N. V. Menshutina. // M. : DeLi print, 2005. – 266

Надійшла (received) 25.12.2017

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Головешко Олександр Сергійович (Головешко Александр Сергеевич, Goloveshko Aleksandr Sergeevich)** – студент 4 курсу Електроенергетичного факультету кафедри «Електричні станції» за спеціальністю Енергетичний менеджмент та енергоефективні технології, тел.: (097) 981 10 73; e mail: [oss1.ghost@gmail.com](mailto:oss1.ghost@gmail.com).

**Терещенко Артем Михайлович (Терещенко Артем Михайлович, Terechenko Artem Michailovic)** – студент 4 курсу Електроенергетичного факультету кафедри «Електричні станції» за спеціальністю Енергетичний менеджмент та енергоефективні технології, тел.: (093) 212 26 85; e mail: [art.4444t@gmail.com](mailto:art.4444t@gmail.com).

**Федорчук Станіслав Олегович (Федорчук Станислав Олегович, Fedorchuk Stanislav Olegovich)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри електричних станцій тел. : 0952901966; e-mail [majonima@gmail.com](mailto:majonima@gmail.com)

Укладач: С. О. Федорчук, аспірант.

**В.В. ГОРЮШКО, Д.А. ДАНИЛЬЧЕНКО, В.В. ЛИЩИНА, П.И. БЕЗКОСТНЫЙ, И.С. ЯКОВЕНКО, И.В. ЯКИМЕНКО, Ю.В. ТКАЧЕВ, Б.Г. ПЕРЕВЕРЗЕВ**

### **ДИАГНОСТИКА ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ПРИ ПОМОЩИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПОВЫШЕННОЙ ДАЛЬНОСТИ ДЕЙСТВИЯ**

В статье рассмотрены возможности диагностики воздушных линий электропередач с помощью беспилотных летательных аппаратов. Были проанализированы различные типы летательных аппаратов, их недостатки и преимущества. По результатам анализа, для коптеров был выявлен общий недостаток, малая дальность полета и из-за высокой скорости полета БПЛА («самолета») недостаточная точность фиксации параметров линии. Авторами предлагается использование коптеров для мониторинга воздушных линий. Описано оборудование необходимое для мониторинга воздушных линий. Особое внимание уделено зарядному устройству, позволяющему увеличить дальность полета коптера. За счет преобразования энергии электромагнитного поля в электродвижущую силу с последующим выпрямлением полученного тока для питания коптера.

**Ключевые слова:** линия электропередачи, мониторинг, коптер, БПЛА, зарядное устройство, наведенные напряжения.

**В.В. ГОРЮШКО, Д.А. ДАНИЛЬЧЕНКО, В.В. ЛИЩИНА, П.И. БЕЗКОСТНЫЙ, И.С. ЯКОВЕНКО, И.В. ЯКИМЕНКО, Ю.В. ТКАЧЕВ, Б.Г. ПЕРЕВЕРЗЕВ**

### **ДІАГНОСТИКА ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ЗА ДОПОМОГОЮ ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ З ПІДВИЩЕНОЮ ДАЛЬНІСТЮ ПОЛЬОТУ**

У статті були розглянуті можливості діагностики повітряних ліній електропередачі за допомогою безпілотних літальних засобів. Були проаналізовані різні види літальних засобів, їх недоліки та переваги. За результатами аналізу, для коптерів було знайдено спільний недолік, мала дальність польоту і із-за високої швидкості польоту БПЛЗ («літака») недостатня точність фіксації параметрів ліній. Авторами пропонується використання коптерів для моніторингу повітряних ліній. Описано обладнання необхідне для моніторингу повітряних ліній. Особлива увага надається зарядному пристрою, який дозволяє збільшити дальність польоту коптера.

**Ключові слова:** лінія електропередачі, моніторинг, коптер, БПЛА, зарядний пристрій, наведені напруги.

**V.V.GORYUSHKO, D.O. DANYLCHENKO, V.V. LISHINA, P.I. BESKOTNIY, I.S. YAKOVENKO, I.V. YAKIMENKO, Y.V. TKACHEV, B.G. PEREVERZEV**

### **DIAGNOSTICS OF OVERHEAD POWER LINES USING UNMANNED AERIAL VEHICLES WITH EXTENDED RANGE**

The article considers the possibilities of diagnostics of overhead power lines using unmanned aerial vehicles with extended range. Various types of aircraft, their shortcomings and advantages were analyzed. According to the results of the analysis, for Copters there was a general lack, a short flight range and the need for an operator to control the Copter. Because of the high flight speed of the UAV (the "aircraft"), it is not possible to provide sufficient accuracy of fixing the line parameters and the coordination of the allocation by the air traffic controllers of the flight altitude. The authors propose the use of Copters with the possibility of unmanned flight and recharging from the transmission line with induced voltages for monitoring air lines. The equipment of the copter, necessary for monitoring of overhead lines, is described. Particular attention is paid to the charger, which allows to increase the range of the flight of the Copter. By transforming the energy of the electromagnetic field into an electromotive force and then rectifying the resulting current to supply the copter. The use of such a copter makes it possible to achieve savings in the cost of servicing overhead power lines and substations, reduce the negative effect of the magnetic field on maintenance staff, and increase the safety of maintenance personnel and work crews.

**Key words:** power line, monitoring, copter, UAV, charger, induced voltages.

**Введение.** Энергетика является базовой отраслью экономики любого государства. Для нормального функционирования энергосистем, поддержания качественного и бесперебойного электроснабжения потребителей необходимо следить за техническим состоянием оборудования.

Линии электропередач является ключевым элементом энергетической системы. Потому диагностика линий электропередач является неотъемлемой частью для нормального функционирования системы. Это довольно трудоемкая задача, которая требует решения ряда проблем с организацией управления прогнозирования и мониторинга ситуаций природного и техногенного характера.

С развитием современных технологий все большую популярность набирает использование беспилотных летательных аппаратов в разных сферах общественной деятельности в исследованиях и диагностике.

**Постановка проблемы.** На данный момент, линии электропередач осматриваются

обслуживающим персоналом раз в год. Линии в свою очередь проходят по пересеченной местности (леса, поля, болота, водоемы), что несомненно усложняет осмотр ЛЭП. Так же необходимо проводить верховой осмотр линий раз в 5 лет. Для этого затрачивается множество денежных и человеческих ресурсов. Все эти задачи может выполнять и летательный аппарат для обследования ЛЭП. Развитие летательных аппаратов в мире происходит постоянно и в высоком темпе. В Украине ситуация с развитием подобных летательных аппаратов характеризуется неразвитыми производственными мощностями и не массовостью выработки продукции, но довольно качественными единичными образцами. Поэтому говоря про летательные аппараты, мы можем сказать, что они могут быть применены для диагностики линий электропередач.

Рассмотрим виды летательных аппаратов на данный момент:



Рис. 1 – общий вид БПЛА

Беспилотные летательные аппараты используют для аэрофотосъемки, патрулирования, геодезических изысканий, мониторинга различных объектов и даже для доставки покупок на дом.

Преимущества и недостатки БПЛА

Беспилотные летательные аппараты обладают следующими преимуществами:

- Возможность создания небольших БПЛА, способных выполнять различные задачи диагностики и мониторинга.
- Беспилотные аппараты способны проводить наблюдение и передавать информацию практически в режиме реального времени.

- Высокая скорость и мобильность.

Кроме несомненных преимуществ, современные БПЛА имеют и целый ряд недостатков:

- Недостаточная гибкость применения
- Пока не до конца решены многие вопросы связи, взлета, посадки;
- Уровень надежности дронов не достаточно высок;
- Полеты дронов усложнены из-за необходимости согласования с авиадиспетчерами.

Виды мультикоптеров

- Мультикоптерами называют аппараты с количеством роторов больше одного и расположенных в одной плоскости. Приставка, на греческом и латинском языке, перед словом «коптер» означает количество моторов.

Бикоптер (два ротора).

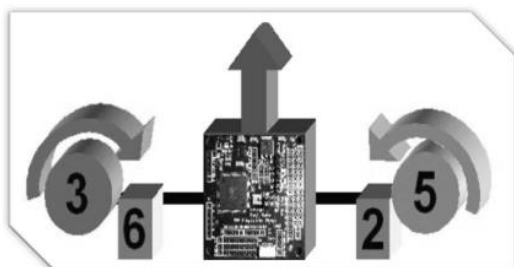


Рис. 2 – схема бикоптера

*Особенности:* моторы вращаются в разных направлениях с целью компенсации реактивного момента. Для стабилизации аппарата моторы отклоняются с помощью сервоприводов.

*Достоинства:* низкое энергопотребление, маленькие габариты, низкая цена.

*Недостатки:* при отказе одного двигателя – неизбежное падение, маленькая грузоподъемность, низкая стабильность, сложная конструкция.

- Трикоптер (три ротора).

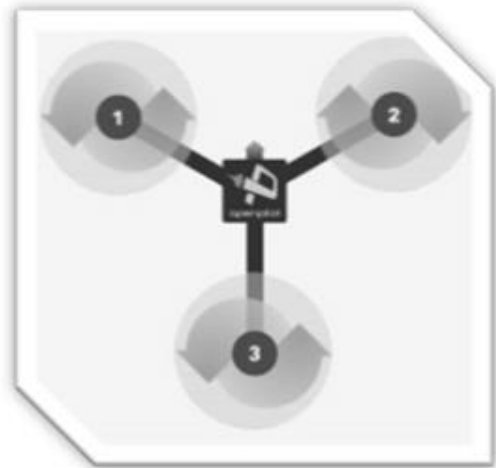


Рис. 3 – схема трикоптера

*Особенности:* два передних мотора вращаются в противоположных направлениях, а третий в любую сторону. Для компенсации реактивного момента и поворота аппарата отклоняется хвостовой мотор с помощью сервопривода.

*Достоинства:* низкий вес, компактность, это самые дешевые мультикоптеры, поскольку для их постройки требуется всего 3 мотора и 3 регулятора скорости.

*Недостатками* таких аппаратов является сложная конструкция, маленькая грузоподъемность и при отказе одного двигателя коптер, неизбежно, падает.

Теперь перейдем к схеме мультикоптера с самым популярным расположением моторов!

Квадрокоптер (четыре ротора).

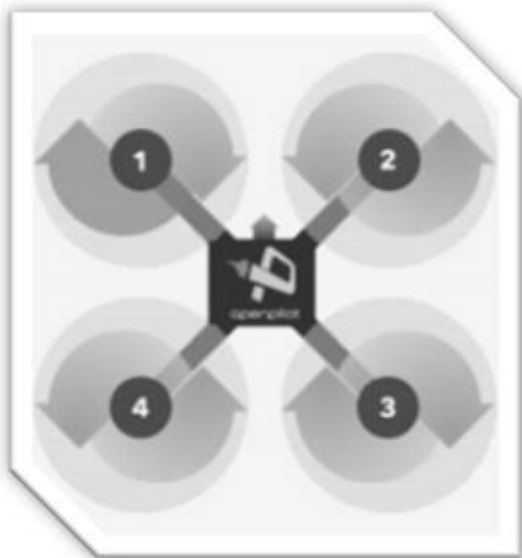


Рис. 4 – схема квадрокоптера

Особенностью таких аппаратов является вращение моторов диагонально, в противоположных направлениях (например, если моторы 1 и 3 вращаются по часовой стрелки, то моторы 2 и 4 – против часовой стрелки). Таким образом компенсируется реактивный момент.

Достоинства: простая конструкция без поворотных механизмов, как у двух предыдущих аппаратов.

Недостатки: при отказе одного двигателя – неизбежное падение.

Гексокоптер (шесть роторов).

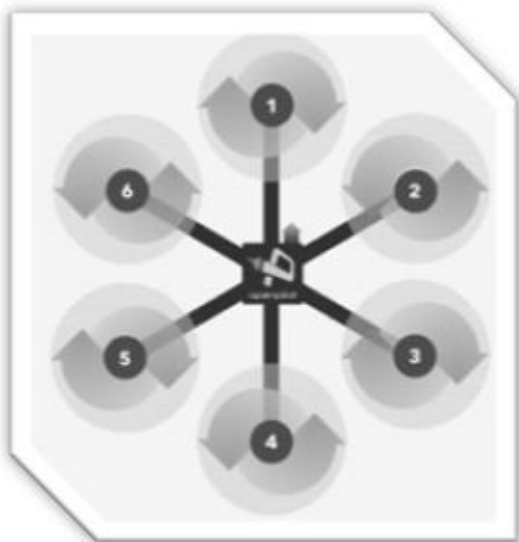


Рис. 5 – схема гексокоптера

Они вбирают в себя все положительные черты квадрокоптеров.

Достоинства: при отказе одного мотора аппарат не падает, большая грузоподъемность, стабильность, маленькая чувствительность к ветру.

Недостатки: короткое время полёта, большие габариты и высокая цена.

Октокоптер (восемь роторов).

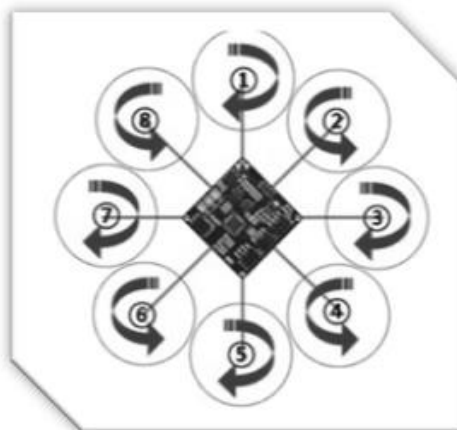


Рис. 6 – схема октокоптера

Достоинства: крайне стабилен и не чувствителен к ветру, при отказе одного и даже двух моторов – аппарат не падает. Очень большая грузоподъемность (до 16-17 кг.). Только этим аппаратам можно доверить подъем в воздух таких дорогих камер, как RED EPIC и ей подобных.

Недостатками этих аппаратов является огромное энергопотребление и высокая цена.

Все варианты схем мультикоптеров могут быть коаксиальными (на одном луче расположены два мотора друг над другом)

Достоинства: более стабильны при отказе моторов, имеют меньшие габариты при, практически, тех же тяговых характеристиках.

В полете такие коптеры более устойчивы и способны летать чуть дольше — либо за счет более емкой батареи, либо за счет более экономичного режима работы моторов, не на пике оборотов. Квадрокоптеры так же не способны летать при поломке одного мотора, поэтому для серьезных применений — полетов с камерой например — они малоприспособны.



Рис. 7 – общий вид квадрокоптера

Из вышеизложенного мы видим, что для обследования ЛЭП нам больше подходят квадрокоптеры. Именно коптеры благодаря умеренной скорости полета и точности мониторинга параметров линий.

Результаты. Для мониторинга ЛЭП мы предлагаем использовать

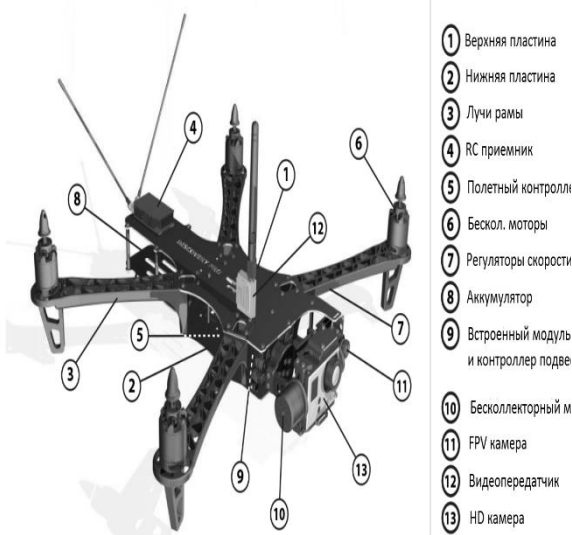


Рис. 8 – структурная схема коптера

Модернизированный Октокоптер «DJI S1000 plus» с контроллером полета «DJI A2» является актуальным аппаратом для выполнения данной задачи. Модернизация заключается в оснащении октокоптера такими элементами, как камера, тепловизор, передатчик/приемник видео, АКБ, мини компьютер, жесткий диск SSD, комплект датчиков, полетный контролер, датчик температуры для АКБ,

зарядное устройство, бортовой выпрямитель, амортизирующее крепление, коннекторы батареи, аппарата управления

Все это оборудование потребляет мощность а для коптеров нехватка мощности это основная проблема. И по тому мы предлагаем установить на коптер зарядное устройство, которое решит эту проблему. Линия электропередач создает магнитное поле, катушка попадает в это магнитное поле и с помощью наведенных напряжений наводится ЭДС. Выпрямитель выравнивает напряжение и ток до параметров необходимых для аккумулятора.

Зарядное устройство работающее от наведенного напряжения линии электропередач:

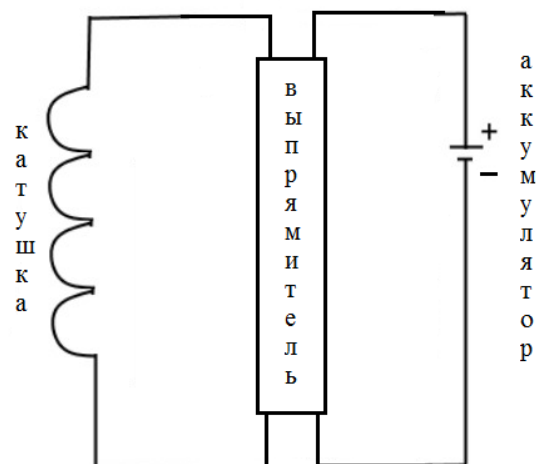


Рис. 9 – схема зарядного устройства

**Выводы.** Рассмотрена возможность использования основных видов БПЛА для диагностирования линий электропередач. Предложена конструктивная модификация БПЛА для

дополнительной подзарядки за счет наведенного напряжения. Теоретические исследования подтверждают, что за счет наведенного напряжения, которое передается через трансформатор или напрямую на выпрямитель возможно заряжать аккумулятор. Это дает возможность добиться экономии затрат на обслуживание воздушных линий электропередач, подстанций за счет снижения количества обслуживающего персонала.

#### Список литературы:

1. Туровский Я. Техническая электродинамика / Я. Туровский. – М.: Энергия, 1974. – 448 с.
2. Ганус А. И. Опыт АК «Харьковоблэнерго» по эксплуатации кабельных линий / А. И. Ганус // Электрические сети и системы. – 2013. – № 5. – С. 37 – 43.
3. Беспрозванных А. В. Критерии оценки степени старения силовых кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией / А. В. Беспрозванных, Е. С. Москвитин // Электротехника и электромеханика. – 2013. – № 4. – С. 32 – 36.
4. Пат. 60285 Україна, МПК Н 01 В 7/02 Кабель силовий / В. М. Золотарьов, В. П. Карпушенко, М. П. Чувурін, Ю. П. Антоненко, Науменко О. А.; заявник та патентовласник закрите акціонерне товариство «Завод Південкабель». – № 2003077178; заявл. 30.07.03; опубл. 15.09.03, Бюл № 9.

5. Иванов Л. В. Статистический подход к обработке социологических данных / Л. В. Иванов // Труды междунар. конф. «Социология и математика». – Т. 2. – X. : НТУ «ХПИ», 2006. – С. 5 – 9.

#### References:

1. Turovskij Ja. *Tehnicheskaja jelectrodinamika* [Technical electrodynamicity]. Moscow.: Jenergija Publ., 1996. 448 p.
2. Ganus A. I. Opyt AK «Har'kovoblenergo» po jekspluatacii kabel'nyh linij [Experience of AK «Har'kovoblenergo» on cable lines operation]. *Jelectricheskie seti i sistemy*. 2013, no. 5, pp. 15 – 18.
3. Besprozvannyh A. V. Moskvitin E. S. Kriterii ocenki stepeni starenija silovyh kabelej s bumazhno-propitannoj izoljaciej [Criteria for assessment of power cables aging extent] *Elektrotehnika i elektromehaniika*. [Electrical Engineering & Electromechanics]. Kharkov, 2013. no. 4, pp. 32 – 36.
4. Zolotar'ov, V. M. Karpushenko V. P., Chuvurin M. P., Antonec' Ju. P., Naumenko O. A. *Kabel' silovij* [Power cable] Pat. of Ukraine, no. 2003077178, 2003.
5. Ivanov L. V. Statisticheskij podhod k obrabotke sociologicheskikh dannyh [Statistical approach to the processing sociological data]. *Trudy mezhdunar. konf. «Sociologija i matematika»*. T. 2. [Proc. of the Int. Conf. «Sociology and Mathematics». Vol. 2]. – Kharkov, NTU «KhPI» Publ., 2006, pp. 5 – 9.

Поступила (received) 16.05.14

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Горюшко Вадим Вадимович (Горюшко Вадим Вадимович, Vadim Vadimovich Goryushko)** – директор з інформаційних технологій «НЕК «Укренерго», м. Київ; тел.: 0503305075; e-mail: goriushko.vv@ua.energy.

**Лищина Владислав Володимирович (Лищина Владислав Владимирович, Lishchina Vladislav Vladimirovich)** – аспірант каф. ПЕЕ, НТУ "ХПІ", м. Харків; тел.: +380953848677; e-mail: Duskone39@gmail.com.

**Данильченко Дмитро Олексійович (Данильченко Дмитрій Алексеевич, Danilchenko Dmitro Oleksiyovich)** – асистент каф. ПЕЕ, НТУ "ХПІ", м. Харків; тел.: 093 98 92 362; e-mail: danylchenko.e@khpi.edu.ua.

**Ткачов Юлій Віталійович (Ткачов Юлій Витальевич, Tkachov Yuliy Vitaliyovich)** – студент каф. ПЕЕ, НТУ "ХПІ", м. Харків; тел.: 0951058448;

**Безкостний Павло Ігорович (Безкостный Павел Игоревич, Bezkostnyi Pavlo Igorovich)** – студент каф. ПЕЕ, НТУ "ХПІ", м. Харків; тел.: 0962271800; e-mail: bezkostniy@ukr.net.

**Яковенко Іван Сергійович (Яковенко Іван Сергеевич, Yakovenko Ivan Sergiyovich)** – студент каф. ПЕЕ, НТУ "ХПІ", м. Харків; тел.: 0688855789; e-mail: i.c.jakovenko@gmail.com.

**Якименко Іван Володимирович (Якименко Іван Владимирович)** – студент каф. ПЕЕ, НТУ "ХПІ", м. Харків; тел.: 0688855789; e-mail: i.c.jakovenko@gmail.com.

**Переверзев Богдан Геннадійович (Переверзев Богдан Геннадійович, Pereverzev Bogdan Gennadiyevich)** – студент каф. фізики нетрадиційних енерготехнологій та екології ХНУ ім В.Н.Каразіна

Укладач: С. О. Федорчук, аспірант.

УДК 621.311

**О. М. ДОВГАЛЮК, П. І. БЕЗКОСТНИЙ****ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВПРОВАДЖЕННЯ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ В УКРАЇНІ ТА ЇХ ВПЛИВУ НА РОБОТУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ**

Розглянуто світові тенденції в розвитку геліоенергетики, виявлені основні фактори, що стимулюють впровадження і подальший розвиток геліоенергетики в Україні. Розглянуто напрямки використання сонячної енергії та способи її перетворення в теплову і електричну. Виконано аналіз потенціалу, умов і особливостей розвитку сонячної енергетики в Україні на сьогоднішній день. Виділено основні напрямки і перспективи подальшого розвитку сонячної енергетики України. Запропоновано методику оцінки економічної ефективності використання сонячних електростанцій, яка дозволяє кількісно оцінити можливості використання сонячної енергії. Розроблено алгоритм вибору структури та комплектації сонячних електростанцій.

**Ключові слова:** сонячна енергія, геліосистема, фотоелектричні модулі, електрична енергія, сонячні колектори, «зелений» тариф, коефіцієнт ефективності, термін окупності.

**О. Н. ДОВГАЛЮК, П. И. БЕЗКОСТНИЙ****ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ВНЕДРЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В УКРАИНЕ И ИХ ВЛИЯНИЯ НА РАБОТУ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Рассмотрены мировые тенденции в развитии гелиоэнергетики, выявлены основные факторы, стимулирующие внедрение и дальнейшее развитие гелиоэнергетики в Украине. Рассмотрены направления использования солнечной энергии и способы ее преобразования в тепловую и электрическую. Выполнен анализ потенциала, условий и особенностей развития солнечной энергетики в Украине на сегодняшний день. Выделены основные направления и перспективы дальнейшего развития солнечной энергетики Украины. Предложена методика оценки экономической эффективности использования солнечных электростанций, которая позволяет количественно оценить возможности использования солнечной энергии. Разработан алгоритм выбора структуры и комплектации солнечных электростанций.

**Ключевые слова:** солнечная энергия, гелиосистема, фотоэлектрические модули, электрическая энергия, солнечные коллекторы, «зеленый» тариф, коэффициент эффективности, срок окупаемости.

**О. М. DOVGALYUK, P. I. BEZKOSTNYI****INVESTIGATION OF THE PECULIARITIES OF THE SOLAR POWER PLANTS IMPLEMENTATION IN UKRAINE AND THEIR IMPACT ON THE WORK OF POWER SYSTEMS**

The world trends in the development of solar energy are considered, the main factors stimulating the introduction and further development of solar energy in Ukraine are revealed. The directions of using solar energy and ways of its transformation into thermal and electric are considered. The analysis of the potential, conditions and peculiarities of solar energy development in Ukraine for today is carried out. The main directions and prospects for the further development of solar energy in Ukraine are singled out. The method of estimating the economic efficiency of using solar power plants is proposed, which allows to quantify the possibilities of using solar energy. The algorithm of choice of structure and complete set of solar power stations is developed.

**Keywords:** solar energy, solar system, photovoltaic modules, electric energy, solar collectors, «green» tariff, coefficient of efficiency, payback period. **Вступ.** Сонячна енергія впевнено займає стійкі позиції у світовій енергетиці. До істотних переваг її широкого застосування відноситься те, що сонячна енергія є екологічно чистим джерелом, це дозволяє використовувати його в зростаючому масштабі без негативного впливу на навколишнє середовище. Сонячна енергія – це практично невичерпне джерело енергії, яке доступне в кожній точці нашої планети.

В даний час для теплопостачання та вироблення електричної енергії величезними темпами витрачаються органічні види палива. Однак в сучасному світі їх використання пов'язане з виникненням ряду проблем: постійним зростанням цін, залежністю від поставок, високими експлуатаційними витратами на обладнання, забрудненням навколишнього середовища.

Одним з ефективних шляхів вирішення цієї проблеми є використання відновлюваних джерел енергії. У світі цьому питанню давно приділяється багато уваги [1–3]. Станом на 2017 рік, за даними аналітичної компанії IHS Markit, загальна потужність об'єктів сонячної енергетики в світі досягла 301 ГВт.

Лідером за встановленою потужністю геліоустановок є Євросоюз, серед окремих країн – Китай. У Китаї встановлено фотоелектричних установок сумарною потужністю понад 15 ГВт. В Японії на сьогоднішній день загальна встановлена потужність геліоустановок становить понад 10 ГВт, у

США – понад 9,8 ГВт. У країнах Євросоюзу встановлено фотоелектричних установок загальною потужністю понад 8,5 ГВт, з яких майже половина припадає на Великобританію, на другому місці знаходиться Німеччина, для якої встановлена потужність геліоустановок становить понад 1,4 ГВт, в той же час за сукупною потужністю геліоустановок на душу населення Німеччина є світовим лідером[4–7].

Не стала винятком і Україна, в якій застосування енергії сонця з кожним роком набирає все більше популярності. Загальна встановлена потужність об'єктів відновлюваної енергетики в Україні становить 1492 МВт, з них 56% (839 МВт) – це об'єкти сонячної енергетики.

Взяті Україною зобов'язання в частині зниження впливу енергетики на довкілля обумовлюють потребу у додаткових обсягах інвестицій [8]. Пріоритетом у цьому напрямку буде обмеження викидів парникових газів великими паливоспалювальними установками, що можливо досягнути за рахунок реалізації комплексу заходів з енергоефективності,



енергозбереження та розширення використання відновлюваної енергетики.

До основних цільових параметрів на період до 2035 року згідно [8] віднесено оптимізацію структури енергетичного балансу держави, виходячи з вимог енергетичної безпеки та забезпечення частки відновлюваної енергетики на рівні 20%. Значна частка в цьому секторі відводиться сонячній енергетиці.

У той же час, зростання виробництва електроенергії на базі відновлюваних джерел енергії на основі вітрової та сонячної енергетики обмежуватиметься можливістю електроенергетичної системи компенсувати коливання їх потужності та рівнем економічного навантаження на споживача. При цьому розширення даних видів генерації безпосередньо у споживача не підпадає під обмеження енергосистеми і формує перспективу динамічного розвитку на місцевому рівні, оскільки геліоустановки є джерелом розподіленої генерації (ДРГ) [8].

Перевагою електричних мереж із ДРГ є можливість використання острівних режимів [9], які полягають в тому, що при відключенні живлення від енергосистеми ДРГ переходять в автономний режим роботи на власне навантаження. Відповідно до існуючих стандартів [10] переключення ДРГ на автономне навантаження або їх відключення повинно відбуватися протягом 100-300 мс. При зростанні потужностей ДРГ та підвищенні рівня автоматизації електричних мереж існуюча практика відключення ДРГ при пошкодженнях в живлячій мережі вже не буде доцільним рішенням. Отже, ДРГ можуть розглядатися, як один з можливих видів резервування.

Використання ДРГ в електричних мережах може значно підвищити ефективність забезпечення споживачів електричною енергією, але одночасно це створює й нові проблеми, пов'язані із втручанням в режими роботи існуючих електричних систем, що потребує цілеспрямованого управління нормальними та післяаварійними режимами роботи таких мереж.

Таким чином, дослідження особливостей впровадження сонячних електростанцій (СЕС) та їх впливу на роботу електроенергетичних систем є актуальною і досить важливою задачею для електроенергетики України.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Велика кількість світових та вітчизняних наукових робіт присвячена геліоенергетиці. Більшість із них висвітлює стан розвитку геліоенергетики [1-3], особливості впровадження та експлуатації геліоустановок [9-11], оцінює загальний потенціал геліоенергетики [4, 6, 7]. Значна кількість публікацій досліджує перспективи розвитку [5, 12], зміну показників якості електроенергії при впровадженні СЕС [13] тощо. У зв'язку з цим особливо важливими стають питання дослідження економічності роботи таких установок та кількісної оцінки перспектив доцільності вироблення сонячної енергії геліоустановками.

**Мета статті.** Дослідити основні особливості впровадження СЕС в Україні та оцінити економічну

ефективність вироблення сонячної енергії геліоустановками.

**Основні матеріали дослідження.** Потенціал сонячної енергії в Україні є достатньо високим для широкого впровадження геліосистем практично на всій території. Сонячне випромінювання в Україні становить 3500–5200 МДж/м<sup>2</sup> на рік [14]. Сезонний період для активного використання сонячної енергії в північних регіонах триває з квітня по вересень, а в південних з березня по жовтень, що становить 1900–2400 год/рік. Загальне середньорічне сонячне випромінювання варіюється від 1070 кВт·год/м<sup>2</sup> в північних районах України до 1400 кВт·год/м<sup>2</sup> на півдні країни. За рівнем інтенсивності сонячного випромінювання (радіації) на території України необхідно виділити чотири зони, які показані на рис. 1.

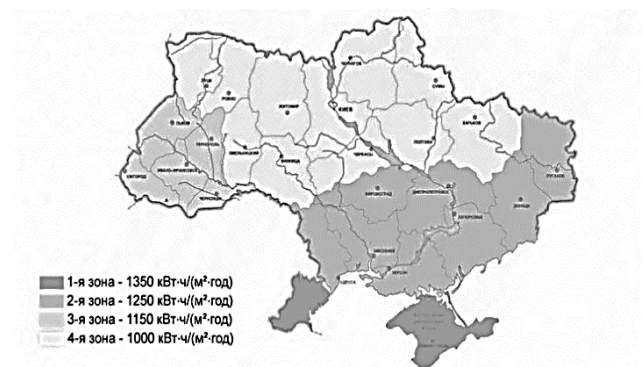


Рис. 1 – Зони інтенсивності сонячного випромінювання в Україні.

У першій і другій зонах знаходяться всі південні області України, більше половини території нашої країни знаходяться в третій зоні, четверта зона найменш придатна для використання сонячної енергії. В цілому територія України належить до зон з середньою інтенсивністю сонячної радіації. В реальних умовах величина щільності прямої і дифузійної сонячної радіації залежить від широти місцевості, прозорості атмосфери, характеристик земної поверхні, а також від часу доби і пори року. З цієї причини величина річного потрапляння сонячної радіації на 1 м<sup>2</sup> з поверхні землі істотно варіюється для різних регіонів України і має статичний характер розподілу [15].

Знаючи статистику сонячної радіації за декілька років, ми маємо можливість спрогнозувати вироблення електроенергії СЕС в різних регіонах України. Середній місячний рівень сонячної радіації в містах України (середній показник за останні 22 роки за даними NASA) наведено в табл. 1.

Кількість енергії, що виробляється фотоелектричним модулем протягом дня, розраховується за формулою [16]:

$$W_{E/E}^{\text{ФЕМ}} = P_{\text{ФЕМ}} \cdot \eta_{\text{ФЕМ}} \cdot \eta_{h\text{ФЕМ}}, \quad (1)$$

де  $P_{\text{ФЕМ}}$  – номінальна потужність фотоелектричного модуля;

$k_{\text{ФЕМ}}$  – коригувальний коефіцієнт, що дорівнює 0,7 влітку і 0,5 в зимовий період, він робить поправку на втрату потужності сонячних елементів при нагріванні на сонці, а також враховує похиле падіння променів на поверхню модулів протягом дня;

$T_{h\text{ФЕМ}}$  – кількість пікових годин, тобто умовний час, протягом якого сонце світить з інтенсивністю 1000 Вт/м<sup>2</sup>, визначається як:

$$T_{h\text{ФЕМ}} = \frac{E_{\text{СІ}}^{\text{cc}}}{1000}, \quad (2)$$

де  $E_{\text{СІ}}^{\text{cc}}$  – середньодобове значення інтенсивності сонячного випромінювання в даному місяці;

1000 – інтенсивність світлового випромінювання при стандартних умовах випробувань фотоелектричних панелей.

Таблиця 1 – Інтенсивність сонячного випромінювання на території України, кВт·год./м<sup>2</sup>/день

Регіони/ Місяці	Січ.	Лют.	Бер.	Кв.	Тр.	Чер.	Лип.	Сер.	Вер.	Жов.	Лис.	Гр.	Серед. показ.
Вінниця	1,07	1,89	2,94	3,92	5,19	5,3	5,16	4,68	3,21	1,97	1,10	0,9	<b>3,11</b>
Луцьк	1,02	1,77	2,83	3,91	5,05	5,08	4,94	4,55	3,01	1,83	1,05	0,79	<b>2,99</b>
Дніпро	1,21	1,99	2,98	4,05	5,55	5,57	5,70	5,08	3,66	2,27	1,20	0,96	<b>3,36</b>
Донецьк	1,21	1,99	2,94	4,04	5,48	5,55	5,66	5,09	3,67	2,24	1,23	0,96	<b>3,34</b>
Житомир	1,01	1,82	2,87	3,88	5,16	5,19	5,04	4,66	3,06	1,87	1,04	0,83	<b>3,04</b>
Ужгород	1,13	1,91	3,01	4,03	5,01	5,31	5,25	4,82	3,33	2,02	1,19	0,88	<b>3,16</b>
Запоріжжя	1,21	2,00	2,91	4,20	5,62	5,72	5,88	5,18	3,87	2,44	1,25	0,95	<b>3,44</b>
Івано-Франківськ	1,19	1,93	2,84	3,68	4,54	4,75	4,76	4,40	3,06	2,00	1,20	0,94	<b>2,94</b>
Київ	1,07	1,87	2,95	3,96	5,25	5,22	5,25	4,67	3,12	1,94	1,02	0,86	<b>3,10</b>
Кропивницький	1,20	1,95	2,96	4,07	5,47	5,49	5,57	4,92	3,57	2,24	1,14	0,96	<b>3,30</b>
Луганськ	1,23	2,06	3,05	4,05	5,46	5,57	5,65	4,99	3,62	2,23	1,26	0,93	<b>3,34</b>
Львів	1,08	1,83	2,82	3,78	4,67	4,83	4,83	4,45	3,00	1,85	1,06	0,83	<b>2,92</b>
Миколаїв	1,25	2,10	3,07	4,38	5,65	5,85	6,03	5,34	3,93	2,52	1,36	1,04	<b>3,55</b>
Одеса	1,25	2,11	3,08	4,38	5,65	5,85	6,04	5,33	3,93	2,52	1,36	1,04	<b>3,55</b>
Полтава	1,18	1,96	3,05	4,00	5,40	5,44	5,51	4,87	3,42	2,11	1,15	0,91	<b>3,25</b>
Рівне	1,01	1,81	2,83	3,87	5,08	5,17	4,98	4,58	3,02	1,87	1,04	0,81	<b>3,01</b>
Суми	1,13	1,93	3,05	3,98	5,27	5,32	5,38	4,67	3,19	1,98	1,10	0,86	<b>3,16</b>
Тернопіль	1,09	1,86	2,85	3,85	4,84	5,00	4,93	4,51	3,08	1,91	1,09	0,85	<b>2,99</b>
Харків	1,19	2,02	3,05	3,92	5,38	5,46	5,56	4,88	3,49	2,10	1,19	0,9	<b>3,26</b>
Херсон	1,30	2,13	3,08	4,36	5,68	5,76	6,00	5,29	4,00	2,57	1,36	1,04	<b>3,55</b>
Хмельницький	1,09	1,86	2,87	3,85	5,08	5,21	5,04	4,58	3,14	1,98	1,10	0,87	<b>3,06</b>
Черкаси	1,15	1,91	2,94	3,99	5,44	5,46	5,54	4,87	3,40	2,13	1,09	0,91	<b>3,24</b>
Чернігів	0,99	1,80	2,92	3,96	5,17	5,19	5,12	4,54	3,00	1,86	0,98	0,75	<b>3,03</b>
Чернівці	1,19	1,93	2,84	3,68	4,54	4,75	4,76	4,40	3,06	2,00	1,20	0,94	<b>2,94</b>

Кількість теплової енергії,  $Q_{\text{Т/Е}}^{\text{СК}}$  кВт·год, яку можна отримати за день при роботі сонячних колекторів (СК), визначається за формулою [16]:

$$Q_{\text{Т/Е}i}^{\text{СК}} = F_{\Sigma}^{\text{СК}} \cdot \eta_{\text{СІ}}^{\text{cc}} \cdot \eta_{\text{СК}} \cdot \frac{1}{k_{\text{оп}}}, \quad (3)$$

де  $F_{\Sigma}^{\text{СК}}$  – сумарна площа геліополя;

$$F_{\Sigma}^{\text{СК}} = F_{\text{СК}} \cdot n_{\text{СК}}, \quad (4)$$

де  $F_{\text{СК}}$  – площа одного СК;

$n_{\text{СК}}$  – кількість СК;

$E_{\text{СІ}}^{\text{cc}}$  – середньодобове значення інтенсивності сонячного випромінювання в даному місяці;

$\eta_{\text{СК}}$  – коефіцієнт поглинання (технічна характеристика СК);

$k_{\text{оп}}$  – поправочний коефіцієнт ефективності використання СК, що враховує кут установки

колектора відносно горизонту і орієнтацію колектора відносно сторін світу.

Слід зазначити, що сонячна тепла технологія економічніша, ніж фотоелектричні СЕС, а досягнута ефективність становить не менше 50% [16].

Для оцінки потенційних можливостей вироблення електричної енергії СЕС в Україні був розрахований середній річний рівень сонячної радіації за 2017 рік та кількість електричної енергії, яка виробляється фотоелектричною системою потужністю 11 кВт за рік. Ці дані представлені у табл. 2.

Таблиця 2 – Данні про виробництво електроенергії СЕС в різних містах України за 2017 р.

Місто	Середній річний рівень сонячної радіації, кВт·год./м <sup>2</sup> /день	Кількість електричної енергії, яка виробляється фотоелектричною системою за рік, МВт·год.
Харків	3,03	8,09
Луганськ	3,31	8,76
Суми	3,12	8,28
Запоріжжя	3,52	9,27
Мелітополь	3,77	9,91
Полтава	3,29	8,69
Кропивницький	3,43	9,05
Чернігів	2,93	7,78
Київ	3,08	8,18
Одеса	3,74	9,85
Вінниця	3,17	8,39
Львів	2,99	7,87
Ужгород	3,11	8,16

СЕС представляє собою інженерну споруду, яка служить для перетворення сонячної радіації в електричну енергію. Використовують різні способи перетворення сонячної радіації, від яких залежить конструкція СЕС.

Конструктивно СЕС бувають двох видів: фотоелектричні (безпосередньо перетворюють сонячну енергію в електроенергію з допомогою фотоелектричного модулю) та термодинамічні (перетворюють сонячну енергію в теплову, а потім в електричну; потужність термодинамічних СЕС вище, ніж потужність фотоелектричних станцій).

До елементів СЕС відносяться:

1. фотоелектричні панелі (сонячні модулі), які перетворюють сонячну енергію в електричну, використовуючи фотовольтаїчний ефект;

2. контролер для управління сонячною фотоелектричною системою, який не допускає перевантаження системи або зворотного струму в нічний час;

3. акумулятор, який потрібен для накопичення електроенергії, що генерується сонячними модулями;

4. інвертор, що перетворює постійний електричний струм від сонячних батарей в змінний, який необхідний для живлення електроприладів;

5. електричний лічильник, що фіксує кількість електроенергії, яка подається в загальну мережу або споживається з неї при необхідності.

На рис. 2 представлена схема СЕС, яка демонструє взаємозв'язок усіх елементів станції та основний принцип її роботи.

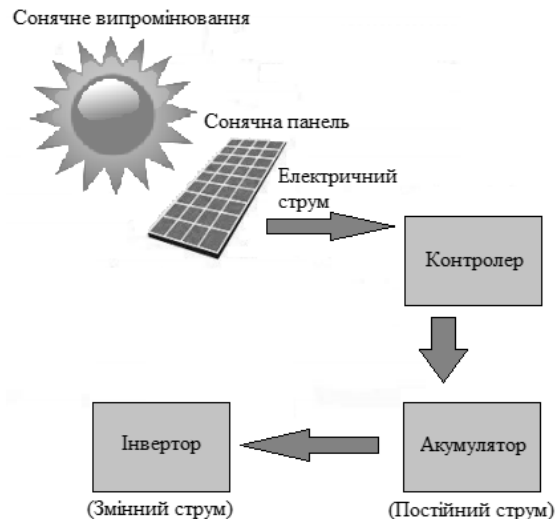


Рисунок 2 – Схема роботи СЕС

СЕС можуть бути двох типів:

- мережеві, які є більш потужними, вони підключаються до зовнішньої електричної мережі, більшість виробленої ними електричної енергії передається в мережу через окремий лічильник, величина навантаження власного споживання незначна;

- автономні, які призначені в першу чергу покривати потреби навантаження власного споживання, тому вони розраховуються на меншу потужність (що визначається переліком власних електроприймачів), вони також підключаються до зовнішньої електричної мережі і лише надлишки електричної енергії передають в мережу через окремий лічильник.

Завдяки діючому в Україні законодавству громадяни нарівні з організаціями можуть продавати енергію, що генерується їх альтернативним джерелом, за спеціальними «зеленим» тарифом [17], який являє собою тарифну сітку, згідно з якою уряд від імені державної компанії «Енергоринок» набуває у комерційних організацій і приватних осіб електричну енергію, генеровану із застосуванням відновлювальних джерел за високими цінами.

Такий тариф на сонячну електроенергію забезпечує можливість оптимальної експлуатації конструкцій СЕС для постачання електроенергії до житлових будівель і підвищення їх рентабельності. Впровадження «зеленого» тарифу стало також потужним стимулом для розвитку промислової генерації фотоелектричних продуктів в Україні.

Активне впровадження СЕС у світі стимулює інтенсивний розвиток ринку комплектуючих для СЕС. Сьогодні великий попит мають китайські фотоелектричні панелі, так як їх вартість на порядок нижче, ніж системи виробництва США та Європи. Також свою продукцію на ринку пропонують виробники Японії, оцінна вартість якої тримається на одному рівні з європейськими та американськими конкурентами. Серед провідних виробників сонячних

модулів, які зарекомендували себе завдяки якості продукції та значній кількості поставок, слід відмітити наступних: Abi-Solar, Panasonic (SolarCity), Viessmann, Jinko Solar, Trina Solar, Canadian Solar, JA Solar, Hanwa Q CELLS, Yingli Green Energy (YGE), First Solar та інші.

Перше місце за обсягом поставок сонячних панелей зайняла китайська компанія JinkoSolar з результатом 6,6-6,7 ГВт, яка посунула на друге місце колишнього лідера, також китайську компанію Trina Solar (6,3-6,55 ГВт). На третьому місці знову китайська компанія (але з канадською назвою) Canadian Solar (5,073-5,173 ГВт). Четверте місце зайняла компанія JA Solar, також з Китаю з об'ємом поставок 4,9-5 ГВт. На п'ятому місці - корейська Hanwha Q Cells (4,8-5 ГВт), на шостому - китайська GCL System Integration Technology (4,6-5 ГВт). Американська компанія First Solar посіла сьоме місце (2,8-2,9 ГВт поставлених сонячних модулів).

Вітчизняні виробники у світовому рейтингу конкурувати не в змозі, але вони також представлені на ринку України значною кількістю продукції. Серед найбільш відомих з них є ПАО «Квазар» (м. Київ), ЗАО «Пілар» (м. Київ), Prolog Semikor LLC (м. Київ), ТОВ «Сілікон» (Світловодськ Кіровоградської обл.). Плоскі сонячні колектори для гарячого водопостачання в Україні випускає тільки компанія «Сінтек» (Запоріжжя) під ТМ SintSolar.

Тобто на сьогоднішній день ринок геліоенергетики в Україні широко забезпечений комплектуючими для СЕС і надає можливість задовольнити досить вибагливі вимоги до комплектації СЕС, які вводяться в експлуатацію.

#### Економічна ефективність використання СЕС.

Ефективності та доцільності використання сонячної енергії в Україні присвячено багато досліджень. Коефіцієнт корисної дії СЕС непостійний і залежить від декількох факторів. Головний з них – інтенсивність і тривалість інсоляції, яка, в свою чергу, визначається погодними умовами, тривалістю дня і ночі, тобто широтою місцевості. Величезне значення має і тип встановлених сонячних батарей.

Економічна ефективність використання СЕС визначається величиною чистого дисконтованого доходу, який пропонується застосовувати в якості коефіцієнта економічної ефективності використання установки і розраховується за виразом:

$$K_{\text{ефi}} = \text{ЧДД} = \sum_{t=1}^T \frac{D_t}{(1+E)^t} - K_H, \quad (5)$$

де  $D_t$  – дохід, що одержаний за рік  $t$ ;

$K_H$  – капіталовкладення, наведені в часі до початку розрахункового періоду;

$E$  – прийнята процентна ставка (норма дисконту).

Річний інвестиційний дохід визначається за виразом:

$$D = \text{ЧП} + V_{\text{ан}}, \quad (6)$$

де ЧП – приріст чистого прибутку (ЧП);

$V_{\text{ан}}$  – витрати на амортизацію нового обладнання.

Приріст ЧП визначається з урахуванням податку на прибуток і на майно:

$$\text{ЧП} = (\Pi - \text{ПМ}) \cdot \left(1 - \frac{C_{\text{ПП}}}{100}\right), \quad (7)$$

де  $\Pi$  – прибуток;

$C_{\text{ПП}}$  – діюча ставка податку на прибуток, %;

$\text{ПМ}$  – податок на майно.

Прибуток при впровадженні СЕС визначається наступним чином:

$$\Pi = \Delta E - V_e, \quad (8)$$

де  $\Delta E$  – вартість зекономлених ресурсів;

$V_e$  – поточні витрати, пов'язані з експлуатацією нових технічних засобів.

Поточні витрати становлять:

$$V = V_{\text{ан}} + V_{\text{рон}}, \quad (9)$$

де  $V_{\text{ан}}$  – витрати на амортизацію нового обладнання;

$V_{\text{рон}}$  – витрати на ремонт та обслуговування нового обладнання.

Складові поточних витрати визначаються наступним чином:

$$V_{\text{ан}} = \alpha_a \cdot K_H, \quad (10)$$

$$V_{\text{рон}} = \alpha_{\text{po}} \cdot K_H, \quad (11)$$

де  $\alpha_a$  – норма відрахувань на амортизацію обладнання;

$\alpha_{\text{po}}$  – норма відрахувань на ремонт та обслуговування обладнання;

$K_H$  – капіталовкладення в нове обладнання.

Дисконтування капіталовкладень здійснюється наступним чином:

$$K_H = \sum_{t=0}^{T_{\text{стр}}} \frac{K_t}{(1+E)^t}, \quad (12)$$

де  $K_t$  – капіталовкладення в спорудження установки за рік  $t$ ;

$T_{\text{стр}}$  – тривалість спорудження установки в роках.

Капіталовкладення в спорудження установки  $K_t$  визначаються як сума капіталовкладень в будівельні конструкції  $K_{\text{ок}}$ , капіталовкладень в окремі елементи СЕС  $K_{\text{об}}$  та супутніх капіталовкладень, які включають передвиробничі витрати на передінвестиційні дослідження, проектування та розробку техніко-економічного обґрунтування, тощо  $K_{\text{суп}}$ :

$$K = K_{\text{ок}} + K_{\text{об}} + K_{\text{суп}}. \quad (13)$$

Термін окупності при цьому становить:

$$T_o = \frac{K}{D_t} \quad (14)$$

Критерієм економічної ефективності використання СЕС є максимум чистого дисконтованого доходу :

$$K_{\text{ефі}} \rightarrow \max . \quad (15)$$

Запропонований критерій економічної ефективності дозволить обґрунтувати доцільність використання СЕС.

Алгоритм вибору СЕС передбачає послідовне виконання розрахунків та порівнянь, необхідних для обґрунтованого визначення структури СЕС та її комплектуючих. Розроблений алгоритм вибору СЕС представлено на рис. 3.

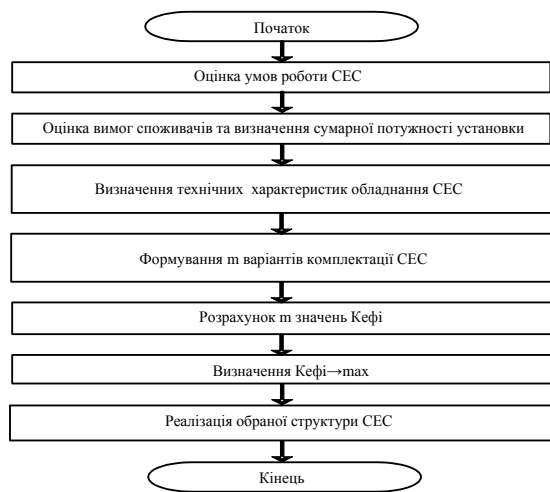


Рисунок 3 – Алгоритм вибору СЕС

Для прикладу був розглянутий варіант побудови СЕС для автономного живлення будівлі, розташованої на південній території Харківської області. Характеристика навантаження такої будівлі представлена у табл. 3.

Таблиця 3 – Характеристика навантаження будівлі для живлення від СЕС

Споживачі енергії	Кількість, шт.	Потужність, кВт	Загальна потужність, кВт
Холодильник	1	1	1
Телевізор	4	0,08	0,32
Пральна машина	1	2,5	2,5
Електрочайник	1	2,2	2,2
Персональний комп'ютер	2	0,3	0,6
Пилосос	1	0,8	0,8
Праска	1	2	2
Мікрохвильова піч	1	1	1
Освітлення	20	0,02	0,4
Інші прилади	1	0,15	0,15
<b>Загалом, кВт.</b>		<b>10,97</b>	

Використовуючи викладену методику розрахунку, було складено декілька варіантів побудови СЕС та визначений найбільш ефективний з них. Результати розрахунку представлені в табл. 4.

Таблиця 4 – Результати розрахунку різних варіантів СЕС

Варіант	Обладнання	К, дол.	Д, дол.	Т <sub>о</sub> , років	К <sub>ефі</sub>
1	Perlight PLM 270P-60 InfiniSolar 3P 10 кВт. ATABA NP-12-200	11616	1221	9,5	1704
2	Risen RSM60-6-270P Growatt 10000 HY Altek 6FM200AGM	12481	1221	10,2	839
3	Altek ALM-265P InfiniSolar 3P 10 кВт. ALVA AD12-200 AGM	11841	1221	9,7	1479
4	KV7-270P InfiniSolar 3P 10 кВт. ATABA NP-12-200	12870	1221	10,5	450
5	Perlight Solar PLM-280M Growatt 10000 HY Ventura GPL 12-200	13375	1221	10,9	-55

Для практичної реалізації було обрано варіант 1, оскільки для нього К<sub>ефі</sub> має найбільше значення з усіх розглянутих.

Для прийнятого варіанту СЕС визначаємо індекс дохідності за виразом

$$ID = \frac{ЧДД}{K_H} + 1. \quad (16)$$

Для розглянутої мережі ID = 1,15, що свідчить про гарні перспективи впровадження розробленого проекту СЕС.

На рис. 4 представлено графік терміну окупності проекту введення в експлуатацію запропонованої СЕС.

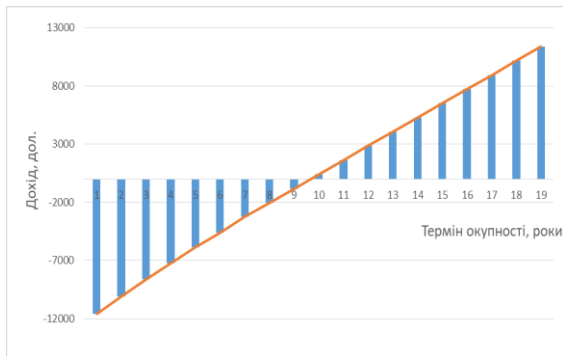


Рисунок 4 – Графік терміну окупності проекту введення в експлуатацію СЕС

Результати остаточного вибору комплектуючих для СЕС представлені в табл. 5.

Таблиця 5 – Вибір комплектуючих для СЕС

Назва обладнання	Характеристики	Кількість
Сонячний модуль Perlight	Тип кремнію: полікристал. Клас фотомодулю: "А". Номінальна потужність: 270 Вт. Напруга при макс. потужності: 31.22 В. Струм при макс. потужності: 8.65 А. Струм короткого замикання: 9.13 А. Напруга холостого ходу: 38.23 В. Розміри: 1640x992x35 мм.	38
Гібридний інвертор InfiniSolar 10 кВт	Макс. потужність сонячної електростанції, що підключається: 14850 Вт. Діапазон напруг відстеження точки макс. потужності: 400-800 В. 2 МРРТ трекера. Безтрансформаторний. 3-фази. Клас захисту IP 65	1
Акумуляторна батарея 200 А·год., 12 В	Батарея акумуляторна 12 В 200А·год, 331 * 175 * 216 мм.	5

Розроблена СЕС призначена для зниження витрат на споживання електроенергії з мережі та генерації в електричну мережу з наступним продажем за «зеленим» тарифом, а також для резервування споживачів на випадок відключення основної мережі з запасом енергії від 12 кВт·год. в акумуляторному блоці.

Представлене рішення є досить ефективним для установки на житловому будинку, на котеджному або дачному будинку при виробництві з середньодобовим споживанням від 5 кВт·год. на добу.

#### Висновки:

1. Проведений аналіз сучасного стану та перспектив розвитку геліоенергетики в Україні свідчить про позитивні напрямки та тенденції успішного розвитку сонячної енергетики, законодавчо закріплені та втілювані на державному рівні.

2. Аналіз зміни структури генеруючих потужностей в Україні показує збільшення доли відновлюваної енергетики в загальному виробництві

електричної енергії, значна частка в цьому секторі відводиться сонячній енергетиці.

3. Оцінка потенціальних можливостей вироблення електричної енергії СЕС, розташованими на території України, та аналіз сучасного ринку геліоенергетики доводять широкі можливості побудови різноманітних за структурою СЕС.

4. Розроблений алгоритм вибору СЕС дозволяє обґрунтовано приймати рішення щодо структури та комплектації СЕС, впроваджуваних в експлуатацію.

5. Запропонована методика оцінки економічної ефективності використання СЕС дозволяє кількісно оцінити можливості та перспективи доцільності вироблення сонячної енергії розробленими установками і може бути використана для характеристики сучасних інвестиційних проектів, присвячених розвитку геліоенергетики.

#### Список літератури

1. Обзор отрасли солнечной энергетики от Nitol Solar Limited. – Режим доступу: <http://www.nitolsolar.com/ru/industryfacts/>
2. Sen, Z. Solar energy in progress and future research trends // Progress in Energy & Combustion Science. – 2004. – V. 30. – P. 367-416.
3. World energy assessment: energy and the challenge of sustainability/ United Nations Development Programme – NY- [edited by Jose Goldemberg ], p. 235-247.
4. Атлас енергетичного потенціалу відновлених та нетрадиційних джерел енергії. – К.: Изд. Института возобновляемой энергетики НАН Украины, 2005. – 44 с.
5. Шкурупская И.А. Оценка перспектив развития гелиоэнергетики в Украине. – Режим доступу: [http://www.confcontact.com/2008febr/6\\_shkurup.php](http://www.confcontact.com/2008febr/6_shkurup.php)
6. Дюжев, В. Г. Роль комплексной социально-экономической и природоохранной оценки потенциала энергосберегающих инноваций в повышении их инновационной восприимчивости для предприятий и организаций Украины / В. Г. Дюжев, С. В. Сусликов // Вісник Національного політехнічного університету «Харківський політехнічний інститут». Технічний прогрес і ефективність виробництва. – 2008. – № 21.
7. Сусликов, С.В. Совершенствование метода прогнозирования изменения стоимости энергоресурсов в рамках расчета эффективности внедрения технологий гелиоэнергетики / С.В. Сусликов // Энергобережение. Энергетика. Энергоаудит. – Харьков : НТУ «ХПИ». – 2011. – № 6. – С. 63–67.
8. Міністерство енергетики та вугільної промисловості України. Проект оновленої «Енергетичної стратегії України на період до 2035 року». [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/n0002120-13>
9. Mahat P. Control and Operation of Islanded Distribution System / Mahat P. – Aalborg: Aalborg University, 2010. – 174 p.
10. IEEE 1547. Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems. – Режим доступу: <http://qrouper.ieee.org/groups/scc21/1547/1547index.html>
11. Кириленко О. В. Технічні аспекти впровадження джерел розподільної генерації в електричних мережах / Кириленко О. В., Павловський В. В., Лук'яненко Л. М. // Технічна електродинаміка. – 2011. – №1. – С. 46–51.
12. Стребков Д.С. Перспективы развития возобновляемой энергетики / Д.С. Стребков // Труды международной научно-технической конференции энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве. – 2012. – С. 3-13.
13. Бацала Я.В., Гладь І.В., Николин У.М. Аналіз показників якості електроенергії сонячної електростанції / Я.В. Бацала, І.В. Гладь, У.М. Николин // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2013. - № 4(49). – С. 81-90.
14. Калиниченко, В. А. Возобновляемые источники энергии / В. А. Калиниченко, Р. Титко. – Варшава – Краков – Полтава, 2010. – 525 с.
15. Дудюк, Д. Л. Нетрадиционная возобновляемая энергетика / Д. Л. Дудюк, С. С. Мазепа. Львов, 2009. – 188 с.

16. Немировский И.А. Современные источники энергии: учебное пособие / И.А. Немировский. – Х.: НТУ «ХПИ», 2015. – 167 с.

17. Закон України від 04.06.2015 № 514-19 Про внесення змін до деяких законів України щодо забезпечення конкурентних умов виробництва електроенергії з альтернативних джерел енергії / Відомості Верховної Ради України (ВВР). – 2015. – N 33. – С.324. – Режим доступу: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/514-19>.

#### References (transliterated)

1. Overview of the solar industry from Nitol Solar Limited. - Rezhym dostupu: <http://www.nitolsolar.com/enindustryfacts/>

2. Sen, Z. Solar energy in progress and future research trends // Progress in Energy & Combustion Science. - 2004. - V. 30. - P. 367-416.

3. World energy assessment: energy and the challenge of sustainability / United Nations Development Programme - NY- [edited by Jose Goldemberg], p. 235-247.

4. The Atlas of the energetic potential of visions and non-traditional dzhерel energies. - K.: Ed. Institute of Renewable Energy NAS of Ukraine, 2005. - 44 p.

5. Shkurupskaya I.A. Evaluation of the prospects for the development of solar energy in Ukraine. - Rezhym dostupu: [http://www.confcontact.com/2008febr/6\\_shkurup.php](http://www.confcontact.com/2008febr/6_shkurup.php)

6. Dyuzhev, VG The role of a complex socio-economic and environmental assessment of the potential of energy-saving innovations in enhancing their innovative susceptibility for Ukrainian enterprises and organizations / VG Dyuzhev, SV Suslikov // News of the National Polytechnic University Kharkiv Polytechnical Institute ". Tehnicheskiy progress i effektivnist vibrobitvtva. - 2008. - No. 21.

7. Suslikov, S.V. Perfection of the method of forecasting changes in the cost of energy resources in the context of calculating the efficiency of the introduction of solar energy technologies / S. V. Suslikov // Energoz-berezhennya. Energy. Energoaudit. - Khar'k: NTU "KhPI". - 2011. - No. 6. - P. 63-67

8. Ministry of Energy and Vocational Promi-word of Ukraine. The project of the "Energetic Strategy of Ukraine for the period up to 2035".

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Довгалик Оксана Миколаївна (Довгалик Оксана Николаевна, Dovgalyuk Oksana Mykolayivna)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри передачі електричної енергії, м. Харків; тел.: (057) 707-62-46; e-mail: [Dovgalyuk\\_O@khp.edu.ua](mailto:Dovgalyuk_O@khp.edu.ua).

**Безкостний Павло Ігорович (Безкостный Павел Игоревич, Bezkostnyi Pavlo Igorovich)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент; тел.: (096) 227-18-00; e-mail: [bezkostniy@ukr.net](mailto:bezkostniy@ukr.net).

Укладач: С. О. Федорчук, аспірант.

[The electronic resource]. - Rezhym dostupu: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/n0002120-13>

9. Mahat P. Sontrol and Operation of Islanded Distribution System / Mahat P. - Aalborg: Aalborg University, 2010. - 174 p.

10. IEEE 1547. Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems. - Rezhym dostupu: [http://grouper.ieee.org/groups/scc21/tysyachi\\_p'yat-sot\\_sorok\\_sim/1547index.html](http://grouper.ieee.org/groups/scc21/tysyachi_p'yat-sot_sorok_sim/1547index.html)

11. Kyrylenko O. V. Tekhnichni aspekty Vprovadzheniya dzhерel rozpodil'noyi heneratsiyi v elektrychnykh merezh. / Kyrylenko O. V., Pavlovskyy V. V., Luk'yanenko L. M. // Tekhnichna elektrodinamika. - 2011. - №1. - P. 46-51.

12. Strebkov DS Prospects for the development of renewable energy / DS. Strebkov // Works of the International Scientific and Technical Conference Energy Supply and Energy Saving in Agriculture. - 2012. – P. 3-13.

13. Batsa YA.V., Hlad' I.V., Nykolyn U.M. Analiz pokaznykiv yakosti elektroenerhiyi Sonyachnoyi elektrostantsiyi / YA.V. Batsan, I.V. Hlad', U.M. Nykolyn // Rozvidka ta rozrobka naftovykh y hazovykh rodovyshe. - 2013. - № 4 (49). - P. 81-90.

14. Kalinichenko, VA Renewable sources of energy / VA Kalinichenko, R. Titko. - Warsaw - Krakow - Poltava, 2010. - 525 p.

15. Dudyuk, DL Unconventional renewed energy / DL Duduk, SS Mazepa. Lviv, 2009. - 188 p.

16. Nemirovsky IA Modern sources of energy: a textbook / IA. Nemirovsky. - H.: NTU "KhPI", 2015. - 167 p.

17. Закон Украйны vid 04.06.2015 № 514-19 Pro vnesennya zmin do deyaky Zakoniv Украйны otosytel'no zabezpechennya konkurentnykh umov vyrobnytstva elektroenerhiyi z al'ternatyvnykh dzhерel enerhiyi / Vidomosti Verkhovnoyi Rady Украйны (VVR). – 2015. – № 33. – P. 324. – Rezhym dostupu: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/514-19>.

*Надійшла (received) 18.01.2018*

УДК 621.311

*О. М. ДОВГАЛЮК, О. П. ЛАЗУРЕНКО, Ю. О. ЖУКОВ, М. І. ЛУХТУРА, Ш. Н. САЇДОВ***ЗАСТОСУВАННЯ МАЛИХ ГЕС ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РЕЗЕРВУ ПОТУЖНОСТІ В ЧАС ПІК ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ**

Проведено аналіз умов розвитку гідроенергетики та виявлені пріоритети розвитку гідропотенціалу України. Розроблено автоматизовану систему управління режимами роботи малих ГЕС для видачі оптимальної потужності при покритті графіку навантаження електроенергетичної системи в час пік. Проведено оцінку економічної ефективності використання малих ГЕС для регулювання видачі потужності з метою забезпечення потреб навантаження електроенергетичної системи в час пік.

**Ключові слова:** гідроенергетика, мала ГЕС, навантаження, автоматичне керування, прогнозування, нейронна мережа, економічна ефективність, керуючий вплив.

*О. Н. ДОВГАЛЮК, А. П. ЛАЗУРЕНКО, Ю. А. ЖУКОВ, Н. И. ЛУХТУРА, Ш. Н. САИДОВ*  
**ПРИМЕНЕНИЕ МАЛЫХ ГЭС ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РЕЗЕРВА МОЩНОСТИ В ЧАС ПИК ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

Проведен анализ условий развития гидроэнергетики и выявлены приоритеты развития гидропотенциала Украины. Разработана автоматизированная система управления режимами работы малых ГЭС для выдачи оптимальной мощности при покрытии графика нагрузки электроэнергетической системы в час пик. Проведена оценка экономической эффективности использования малых ГЭС для регулирования выдачи мощности с целью обеспечения потребностей нагрузки электроэнергетической системы в час пик.

**Ключевые слова:** гидроэнергетика, малая ГЭС, нагрузка, автоматическое управление, прогнозирование, нейронная сеть, экономическая эффективность, управляющее воздействие.

*О. М. DOVGALYUK, O. P. LAZURENKO, YU. O. ZHUKOV, M. I. LUKHTURY, SH. N. SAIDOV*  
**THE USE OF SMALL HYDROPOWER PLANTS TO PROVIDE POWER RESERVE IN THE PEAK HOUR OF THE ELECTRIC POWER SYSTEM**

Analysis of the conditions for the development of hydropower has been carried out and the priorities for the development of the hydropower potential of Ukraine have been identified. The automated system for controlling the operating conditions of small hydropower plants for the delivery of optimum power when covering the load schedule of the electric power system during peak hours has been developed. Estimation of the economic efficiency of using small hydropower plants to regulate the output of power in order to meet the needs of the load of the electric power system during peak hours was carried out.

**Keywords:** hydropower, small hydropower plant, load, automatic control, forecasting, neural network, economic efficiency, control effect.

**Вступ.** Гідроелектричні станції (ГЕС) на сьогоднішній день є одними з екологічно чистих джерел енергії, що виробляють дешеву електроенергію. Енергетичний потенціал гідроенергетики в світі складає 8100 млрд. кВт·год, в якому на частку малих ГЕС (МГЕС) припадає 10%. Через постійно зростаючі ціни на енергоносії вартість електроенергії на традиційних електростанціях постійно підвищується. Використання енергії води, а в даному випадку гідроенергетичного потенціалу малих річок, сприятиме децентралізації об'єднаної енергетичної системи (ОЕС).

Мала гідроенергетика в Україні є одним з перспективних напрямків розвитку відновлюваної енергетики [1, 2]. «Зелений» тариф і наявність вже існуючої інфраструктури забезпечують інтерес інвесторів до даного сегменту ринку. МГЕС можуть значно поліпшити енергопостачання віддалених і важкодоступних районів України, сприяючи їх

економічному розвитку.

На сьогоднішній день при переході до нової моделі енергоринку вирішення питання покриття нерівномірного графіку навантаження електроенергетичної системи (ЕЕС) найбільш доцільними та економічно ефективними засобами стає особливо гострим. Для ОЕС України добовий графік навантаження характеризується двома піками (ранковим і вечірнім) і двома провалами (більш глибоким нічним і денним). Саме ГЕС і ГАЕС, що мають високу маневреність і великий регульовальний діапазон, високі швидкості зміни навантаження, мінімальний час набору потужності, пуску і зупинки агрегатів, виконують складну задачу покриття найбільш складної пікової і напівпікової частини графіка навантажень. Слід зазначити, що гідроенергетичний потенціал більшості ГЕС переважно вичерпаний, тому важливу роль починають відігравати саме МГЕС.

© О. М. Довгалюк, О. П. Лазуренко, Ю. О. Жуков, М. І. Лухтура, Ш. Н. Саїдов, 2018



Таким чином, дослідження можливостей застосування МГЕС для забезпечення резерву потужності в час пік ЕЕС є важливою та своєчасною задачею для електроенергетики України.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідженню особливостей та перспектив розвитку гідроенергетики присвячено багато наукових робіт

[1-6]. Значна кількість розробок визначає шляхи підвищення ефективності роботи ГЕС, їх функціонування в ОЕС та автоматизації процесів регулювання режимів [7-9].

Оператором основних гідроенергетичних потужностей в Україні є ПАТ «Укргідроенерго» – гідроенергуюча компанія, до складу якої входять дев'ять станцій на річках Дніпро та Дністер. Гідроенергетичні потужності розміщуються на ГЕС Дніпровського (3940 МВт), Дністровського (744 МВт) каскадів і на діючих малих ГЕС (до 100 МВт). Експлуатуються Київська ГАЕС (235 МВт), два агрегати Ташлицької ГАЕС (302 МВт) та перша черга Дністровської ГАЕС (302 МВт) [2].

Загальний гідроенергетичний потенціал України складає понад 44 млрд. кВт·год. (в тому числі МГЕС – приблизно 3,0 млрд. кВт·год.). На сьогодні економічно ефективний потенціал становить близько 17,5 млрд. кВт·год., з них вже використовується близько 11 млрд. кВт·год. (більше 60 %). Таким чином, невикористаний ефективний потенціал становить близько 6,5 млрд. кВт·год. [10].

Слід зазначити, що гідроенергетичний потенціал Дніпра переважно вичерпаний. Окрім того, інтенсивна експлуатація, протягом десятків років, Дніпровських ГЕС має свої негативні наслідки. Фізично та морально застаріле обладнання має низький (у порівнянні із сучасним) коефіцієнт корисної дії (ККД), не забезпечує підтримку необхідних параметрів регулювання, здійснює значний вплив на довкілля.

Крім того існуюча на даний час структура потужностей генерування електроенергетики формує дефіцит маневрених та резервних потужностей ОЕС України [2]. Надлишок потужності в нічні години, при дуже обмежених можливостях маневрування ускладнює не тільки стійкість роботи ОЕС України, але й спроможність підтримувати необхідну якість регулювання міждержавних перетоків енергії у рамках синхронної роботи ОЕС України із системами інших країн. Вимога забезпечення якості електроенергії та надійності енергосистеми в умовах відхилення фактичних величин потужностей генераторів і споживачів системи протягом доби, вимагає існування належного рівня маневрених потужностей.

У зв'язку з цим важливу роль на даний час починає відігравати саме гідроенергетика, яка виступає головним джерелом високомобільного резерву. Однак, сьогодні у балансі потужностей ОЕС України потужність гідроелектростанцій складає біля 10 %, проти 16 % оптимальних відповідно до прогнозу Енергетичної стратегії України на період до 2030 року [10]. Для забезпечення належного рівня

маневрових та резервних потужностей необхідно особливу увагу приділяти розвитку саме МГЕС.

**Мета статті.** Дослідити можливість та визначити економічну ефективність використання МГЕС для покриття потреб навантаження в час пік ЕЕС.

Основні матеріали дослідження. Єдиного для всіх країн поняття МГЕС немає, в якості основної характеристики таких ГЕС прийнята їх встановлена потужність. У світі не існує єдиної класифікації малих ГЕС і час від часу відбуваються зміни в прийнятих класифікаціях. За існуючою нині класифікацією ООН, до малих належать ГЕС потужністю від 1 до 30 МВт.

У табл. 1 представлена інформація щодо найбільш поширених на сьогоднішній день в світі класифікацій МГЕС. Найчастіше до МГЕС відносять гідроенергетичні установки, встановлена потужність яких не перевищує 5 МВт.

Таблиця 1 - Класифікація малих ГЕС

Країна	Встановлена потужність малих ГЕС
Латвія, Швеція	до 2 МВт
Австрія, Німеччина, Польща, Іспанія, Китай	до 5 МВт
Білорусь	до 6 МВт
Греція, Ірландія, Португалія, Україна	до 10 МВт
США, Таджикистан	до 30 МВт

Будівництво МГЕС є доцільним як з екологічної, так і з економічної точки зору. Ефективність будівництва МГЕС визначається їх мінімальним впливом на навколишнє середовище, а також невеликими інвестиціями, термінами будівництва й окупності.

Стимулюючими факторами будівництва МГЕС є:

- постійна оновлюваність водних ресурсів;
- мінімальний вплив на навколишнє середовище;
- низька собівартість електроенергії в порівнянні з тепловими станціями;
- значна економія мінерального палива;
- поліпшення комунально-побутових умов та праці людей;
- МГЕС не вимагає тривалих термінів будівництва;
- низька капіталомісткість, короткий інвестиційний цикл.

Все це зумовило активний розвиток МГЕС в світі [1-5]. Загальноновизнаним лідером у розвитку малої гідроенергетики є Китай, де діє близько 83 тисяч МГЕС. Їх річний виробіток електроенергії перевищує 160 млрд. кВт·год і становить 30% в загальному виробленні електроенергії ГЕС в країні. У США є більше 10 тис. діючих МГЕС сумарною потужністю понад 7 млн. кВт, частка малої гідроенергетики досягає 50% від всієї гідроенергетики США. В Японії діє 1350 МГЕС сумарною потужністю 7 млн. кВт, і в той же час передбачено введення ще понад 900

МГЕС. Інтенсивно йде будівництво і введення потужностей в країнах Західної Європи, в Австрії їх кількість перевищує 950, в Італії 1200, в Норвегії 500, у Фінляндії 170, у Франції 1100, у ФРН 800, в Швеції 1350 МГЕС. Загальне вироблення електроенергії МГЕС для європейських країн складає близько 10% від споживаної електроенергії.

У Таджикистані ГЕС є базовими генеруючими джерелами країни і складають 98% від виробленої електроенергії. На сьогоднішній день кількість МГЕС в Таджикистані становить 282 одиниці загальною потужністю понад 25 тис. кВт і річним виробленням понад 100 млрд. кВт·год [5].

В Україні є 150 МГЕС, з яких на сьогодні функціонує близько 80 загальною потужністю 111 МВт, що складає 5% технічно досяжного гідроенергетичного потенціалу країни. При цьому потенціал малих річок в Україні становить як мінімум 3 млрд. кВт·год на рік [10].

Аналіз розподілу енергетичного потенціалу малих річок по областях України [10] свідчить про те, що МГЕС, міні- та мікро ГЕС можуть стати потужною основою енергозабезпечення для всіх регіонів Західної України, а для деяких районів Закарпатської та Чернівецької областей - джерелом повного самоенергозабезпечення. Для вирішення проблем розвитку малої гідроенергетики Україна має достатній науково-технічний потенціал і значний досвід в області проектування і розробки конструкцій гідротурбінного обладнання, дослідження гідроенергетичного потенціалу малих річок, вирішення водогосподарських і екологічних проблем при будівництві ГЕС. Українські підприємства мають необхідний виробничий потенціал для створення вітчизняного обладнання для МГЕС.

Україна, як і більшість країн світу, законодавчо закріпила основні напрямки розвитку даної галузі. Згідно [10] прогнозується зростання частки відновлюваної енергетики до рівня 20% у валовому кінцевому енергоспоживанні. Передбачається постійне розширення використання всіх видів відновлюваної енергетики, яка стане одним з інструментів забезпечення енергетичної безпеки держави.

Зберігатиметься стійкість розвитку гідроенергетичної галузі. Очікується, що загальна встановлена потужність гідроенергетики досягне не менше 15% загальної встановленої потужності в ОЕС України. Додатковий потенціал розвитку гідроенергетики може бути реалізований за рахунок саме малої гідроенергетики [10].

Розвиток малої гідроенергетики України передбачає:

- оновлення і реконструкцію діючих МГЕС;
- будівництво нових МГЕС в районах децентралізованого енергопостачання;
- будівництво МГЕС в регіонах централізованого енергопостачання на наявних перепадах водосховищ та водотоків;
- нове будівництво МГЕС з концентрацією напору.

Без сумніву, наявність цієї бази стане основою для подальшого розвитку малої гідроенергетики.

МГЕС позитивно впливають на роботу енергосистеми. Тобто є можливість виробляти електроенергію в пік навантажень і накопичувати воду в водосховищах при надлишку потужності в енергосистемі, тобто бути активним учасником балансууючого сегмента ринку.

З метою зменшення собівартості виробництва електричної енергії на МГЕС проводиться автоматизація управління їх режимами.

Експлуатація МГЕС має ряд особливостей в порівнянні з традиційними джерелами енергії [4-11]:

- невелика одинична потужність ГЕС (від 100 кВт до 20 МВт) і часто низький коефіцієнт використання встановленої потужності протягом доби не дозволяють отримувати значні надходження від реалізації електроенергії, що призводить до необхідності максимально скорочувати експлуатаційні витрати;

- одному суб'єкту енергоринку може підпорядковуватися 10 і більше МГЕС, розташованих в різних областях і регіонах країни, що, з огляду на практичну відсутність промислових каналів зв'язку, істотно ускладнює централізацію диспетчерського управління ними;

- підвищення вимог енергоринку щодо автоматизованих систем комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ) в частині оперативності обміну інформацією між операторами і споживачами вимагає вдосконалення засобів інформаційного забезпечення, встановлених на МГЕС;

- продуктивність МГЕС в значній мірі залежить від фактично непередбачуваного впливу навколишнього середовища, що призводить до ускладнень в процесі планування режимів їх роботи;

- неузгодженість норм і правил експлуатації водних ресурсів у поєднанні з людським фактором накладає штучні, часто необґрунтовані, обмеження в задачах забезпечення ефективності роботи МГЕС.

Слід підкреслити, що визначення і реалізація оптимальних режимів енергосистеми стає все більш складним завданням внаслідок зростання числа спільно працюють теплових і гідроелектростанцій, створення великих каскадів ГЕС, суттєвої різниці у фактичних технічних, техніко-економічних і експлуатаційних характеристиках електростанцій, нестаціонарного характеру навантаження. При довгостроковій оптимізації режиму в якості критерію оптимальності зазвичай використовують мінімум експлуатаційних витрат або витрат палива для всієї енергосистеми при заданому рівні припливу води з урахуванням роботи теплових електростанцій.

Для забезпечення ефективної експлуатації МГЕС необхідним є впровадження засобів автоматизації процесу вироблення електроенергії. При цьому автоматизовані системи управління, що розробляються і впроваджуються, повинні забезпечувати виконання наступних завдань:

- управління поточним режимом, здійснюване диспетчерським персоналом і вирішальне завдання

формування і корекції режимів роботи протягом доби при неминучих відхиленнях від сформованої при короткостроковому плануванні завдання;

- повна автоматизація інформаційного обміну між ГЕС та розрахунково-диспетчерським центром (в перспективі - оператором енергоринку) для вирішення завдань комерційного обліку електроенергії;

- безперервний контроль стану і режимів роботи обладнання, запобігання порушенню нормального режиму, ліквідації аварійних ситуацій, відновлення нормального режиму після аварійних відмов і забезпечення надійності роботи ГЕС в цілому;

- забезпечення централізованого управління основними процесами, маневреності ГЕС та максимальної ефективності використання первинної енергії протягом заданого періоду роботи;

- мінімізація необхідної кількості обслуговуючого персоналу для АСУ та ГЕС в цілому.

Для дослідження можливостей МГЕС щодо забезпечення резерву потужності була розглянута Північна енергетична система, для якої була визначена величина навантаження в ЕЕС та проаналізовані можливості ефективно і своєчасно забезпечити видачу потужності МГЕС для задоволення визначеної потреби ЕЕС у покритті навантаження.

З метою визначення величини потужності, яку кожна МГЕС має виробити в потрібний момент часу для покриття потреб навантаження ЕЕС, використано прогнозування за допомогою багатошарової штучної нейронної мережі ANNSTLF [12, 13], схема якої показана на рис. 1.

Багатошарова штучна нейронна мережа складається з  $n$  вхідних вузлів,  $h$  вузлів прихованого шару та  $m$  вихідних вузлів, з'єднаних в режимі подачі вперед за допомогою мультиплікативних ваг  $W_{ij}$ . Входи ( $X_i$ ) множаться на вагу сполуки ( $W_{ij}$ ) і передаються нейронам в вузлах прихованого шару. Нейрони в прихованому і вихідному шарах мають S-подібну нелінійну передавальну функцію, відому як «функція активації сигмоїда». Зважені входи, отримані сигмовидним вузлом, підсумовуються і пропускаються через цю нелінійну функцію для отримання виходу.

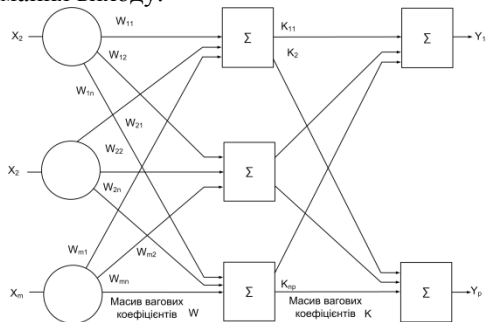


Рисунок 1 – Багатошарова штучна нейронна мережа для прогнозування навантаження

Для навчання використовується алгоритм зворотного поширення помилок [14], з використанням

якого визначаються відповідні значення для  $W_{ij}$  і кількість необхідних нейронів в прихованому шарі.

На рис. 2 показано блок-схему багатошарової штучної нейронної мережі ANNSTLF, яка складається з трьох модулів: двох модулів прогнозу навантаження БПН1 і БПН2 та адаптивного об'єднувача АО. Обидва модулі прогнозу навантаження отримують однаковий набір входів і створюють прогноз навантаження в той же день, але для цього використовуються різні стратегії. Функція модуля об'єднувача полягає в тому, щоб змішувати два прогнози з метою отримання остаточного прогнозу [14].

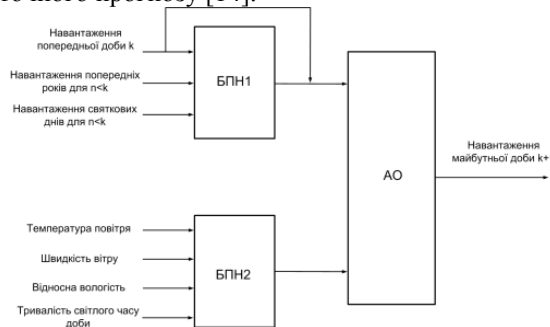


Рисунок 2 – Блок-схема багатошарової штучної нейронної мережі ANNSTLF

Результати прогнозування навантаження мережі представлені на рис. 3. Для прогнозу було використано 30 нейронів прихованого шару, максимальна помилка прогнозування за весь період складає -12%.

Одержаний графік визначає величину сумарної генеруючої потужності в ЕЕС, яка оптимальним чином повинна розподілятися між станціями та їх блоками. В покритті цього графіку в часи пік важливу роль відіграють саме маневрені МГЕС, для яких в автоматичному режимі вирішується задача оптимального розподілу потужності між станціями та блоками з метою покриття потреб споживачів та забезпечення ефективної роботи ЕЕС [15].

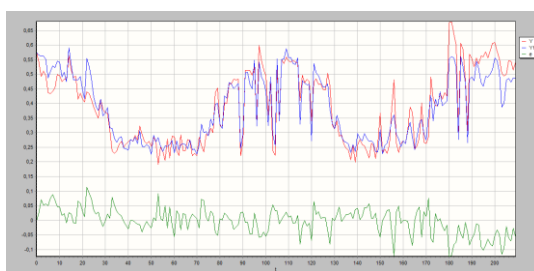


Рисунок 3 – Результати прогнозування навантаження

Для вирішення цієї задачі застосовуємо метод невизначених множників Лагранжа [16]. Цільова функція при вирішенні задачі має вигляд:

$$\sum T_j(P_j) \rightarrow \min, \quad (1)$$

де  $\sum T_j(P_j)$  - сумарні годинні витрати на вироблення електроенергії агрегатами ЕЕС.

Крім того, враховуємо обмеження, пов'язані із забезпеченням балансу потужності та особливостями технологічного процесу роботи електростанцій:

$$P_{je} < P_{jopt} < P_{just}, \quad (2)$$

де  $P_{je}$  – потужність економічного режиму станції,  $P_j$  – оптимальна потужність станції,  $P_{j\text{уст}}$  – встановлена потужність МГЕС.

Із врахуванням еквівалентних витратних характеристик станцій, які знаходимо із витратних характеристик кожного блоку, значення оптимальної потужності та потужності економічного режиму станції визначаємо за виразами [16]:

$$P_{je} = \sqrt{\frac{b_{0j}}{b_{2j}}}, \quad (3)$$

$$P_{j\text{опт}} = \frac{P_H - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^n \frac{b_{1j} - b_{1k}}{2b_{2k}}}{1 + b_{2j} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^n \frac{1}{b_{2k}}}, \quad (4)$$

де  $b_{0j}$ ,  $b_{1j}$ ,  $b_{2j}$  – коефіцієнти еквівалентних витратних характеристик станцій.

На наступному етапі перевіряємо умову (2) для кожної станції. Результати розрахунку оптимальної потужності для МГЕС Північної енергетичної системи при покритті потреб навантаження в час пік представлені у табл. 2.

**Розробка автоматизованої системи управління для видачі потужності МГЕС.** Одним із шляхів підвищення ефективності використання малої гідроенергетики в світі на сьогоднішній день є застосування технічних засобів АСУ ТП їх режимами [4-11]. Такі системи дозволяють оптимально завантажувати блоки маневрених МГЕС, що в свою чергу забезпечить покращення експлуатаційних характеристик таких ГЕС при роботі їх в енергосистемі і поліпшить режим ЕЕС.

Таблиця 2 – Розрахунок оптимальної потужності для МГЕС Північної енергетичної системи

№	Назва	Потужність економічного режиму, кВт	Оптимальна потужність, кВт	Встановлена потужність, кВт
1	Кунцівська ГЕС	235	268	400
2	Мало-Ворожбянська ГЕС	176	224	350
3	Михайлівська ГЕС	68	128	180
4	Низівська ГЕС	258	395	480
5	Опішнянська ГЕС	75	192	225
6	Остап'євська ГЕС	127	188	218
7	Сухорабівська ГЕС	194	284	330
8	Червонооскільська ГЕС	2125	2735	3680
9	Шишацька ГЕС	214	382	550

Для реалізації зазначених завдань необхідною умовою є забезпечення можливості централізованого управління режимами роботи ГЕС в реальному часі з урахуванням особливостей функціонування електростанцій та графіків електроспоживання. Це може бути досягнуто при впровадженні автоматичної системи управління режимами МГЕС, структурна схема такої системи показана на рис. 4. Дана АСУ являє собою централізовану систему оперативного управління з децентралізацією функцій реального часу за рахунок застосування локальних (в перспективі адаптивних) систем автоматичного управління (САУ).

Ієрархічний принцип побудови системи дозволяє найкращим чином врахувати особливість структурної побудови та взаємозв'язку окремих елементів ЕЕС, а також характер процесів в ній.

До першого рівня відносяться автоматичні регулятори потужності блоків (АРПБ). З їх допомогою на ГЕС в процесі регулювання виконується розподіл станційного сигналу позапланової потужності  $P_{\text{пзплі}}$  між агрегатами  $\Delta P_{гij}$ , при цьому

$$P_{\text{внплі}} = \sum_{j=1}^m \Delta P_{гij}, \quad (5)$$

де  $P_{\text{внплі}}$  – величина позапланової потужності і-ої станції;  $\Delta P_{гij}$  – значення зміни потужності j-ого блоку і-ої станції; m – число блоків і-ої станції.

Другий ієрархічний рівень (станційний) представлений автоматичними регуляторами потужності станцій (АРПС). Заданою уставкою для станційної частини САУ є величина сигналу позапланової потужності від системної частини  $P_{\text{пзплі}}$ , яка коригується за поточною частотою  $f_{\phi}$ .

$$P_{\text{пзплі}} = \sum_{i=1}^n \Delta P_{ci}, \quad (6)$$

де  $\Delta P_{ci}$  – значення зміни потужності і-ої станції; n – число станцій в ЕЕС.

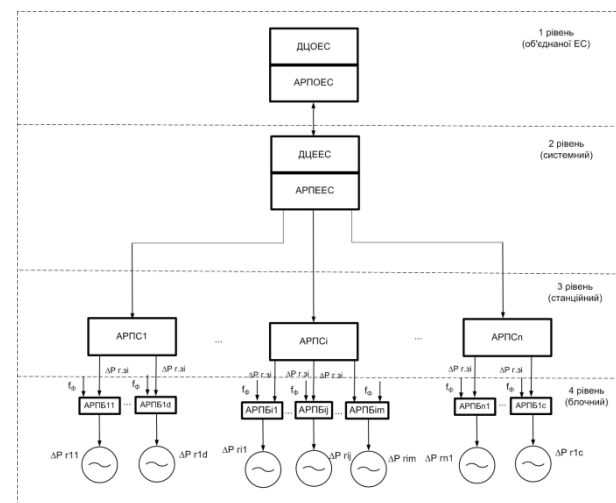


Рисунок 4 – Структурна схема автоматичної системи управління режимами МГЕС

У відповідності зі своїми законами регулювання АРПС виробляють керуючі впливи на станційному рівні (реалізуючи оптимальні значення розподілу виробляємої станціями потужності, необхідної для покриття сумарного графіку навантаження). При розподілі навантаження між ГЕС необхідно враховувати такі основні фактори: потужність водотоку, наявність добового регулювання і об'єм водосховища. Потужність ГЕС за період регулювання повинна узгоджуватися з потужністю водотоку, так як вироблення електроенергії ГЕС пов'язано з кількістю припливної (проточної) води.

На третьому (системному) ієрархічному рівні знаходиться загальносистемна частина, до складу якої входить блок автоматичного регулювання потужності електроенергетичної системи (АРПЕЕС) і диспетчерський центр електроенергетичної системи (ДЦЕЕС).

Вхідними величинами АСУ є фактична частота в ОЕС  $f_{\phi}$  і перетоки активної потужності  $P_{\text{пер}}$  по зовнішніх міжсистемних лініях зв'язку, значення яких від датчиків потужності (ДП) передаються прямими каналами передачі даних (ПКПД). При виникненні небалансу активної потужності визначаються фактичні значення частоти і перетоків потужності  $P_{\text{пер}}$ . Відповідно до прийнятого закону регулювання на основі фактичних значень  $f_{\phi}$  і  $P_{\text{пер}}$  на системному рівні САУ визначаються позапланові завдання за активною потужністю  $P_{\text{пзплі}}$ , які передаються по зворотних каналах передачі даних (ЗКПД) на регулюючі станції.

$$P_{\text{внплОЕС}} = \sum_{k=1}^K \Delta P_{\text{ЕЕСк}} \quad (7)$$

де  $\Delta P_{\text{ЕЕСк}}$  – значення зміни потужності k-ої ЕЕС; K – кількість ЕЕС в ОЕС.

На верхньому ієрархічному рівні (об'єднаної енергосистеми) управління здійснюється такими елементами САУ, як блок автоматичного регулювання потужності ОЕС (АРПОЕС) і диспетчерський центр ОЕС (ДЦОЕС).

З огляду на структурну і апаратну складність даної системи управління, а також вимоги щодо мінімізації капітальних і експлуатаційних витрат, розробка і впровадження АСУ передбачає детальне техніко-економічне обґрунтування всіх етапів реалізації поставленого завдання [8].

Крім апаратної реалізації впровадження АСУ МГЕС вимагає розробки відповідного математичного і програмного забезпечення, яке для окремої ГЕС (особливо ГЕС рівня II) потребує значних капітальних витрат і витрат часу. Але економічний ефект, пов'язаний з поліпшенням керованості і маневреності ГЕС, з підвищенням надійності роботи та ефективності використання водного потенціалу, за приблизними оцінками дозволить компенсувати всі зазначені вище витрати протягом 3 - 4 років [17].

Рішення завдання управління режимами ГЕС вимагає впровадження локальних систем управління блоками ГЕС, структурна схема такої системи представлена на рис. 5.

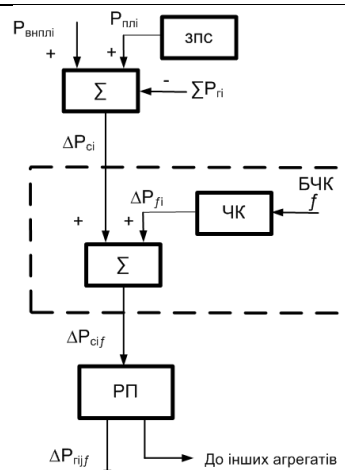


Рисунок 5 – Структурна схема управління режимами блоків ГЕС

Планове завдання активної потужності  $P_{\text{пл}}$  регулятор АСУ отримує від персоналу через задатчик потужності станції (ЗПС), а позапланове значення  $P_{\text{пзпл}}$  – від системної частини АСУ. Сигнали  $P_{\text{плі}}$  і  $P_{\text{пзплі}}$  подаються на суматор, на який також подається сумарна фактична потужність гідроагрегатів (ГА). Вихідним сигналом суматора є зміна потужності станції  $\Delta P_{\text{сі}}$ :

$$\Delta P_{\text{сі}} = P_{\text{плі}} + P_{\text{внплі}} - \sum_{j=1}^m P_{\text{гїj}} \quad (8)$$

де  $\sum_{j=1}^m P_{\text{гїj}}$  – сумарна потужність генераторів i-ої

станції, m – кількість генераторів на i-ій станції.

Вихідний сигнал з суматора подається на блок частотної коригування (БЧК), на суматор якого також подається сигнал  $\Delta P_f$  з частотного коректора (ЧК), який визначається статизмом  $k_{\text{стг\%}}$  ЧК і фактичною поточною частотою f.

Вихідний сигнал з БЧК подається на блок розподілу потужності (РП), який визначає величину зміни потужності для кожного окремого агрегату для заданого значення  $\Delta P_{\text{сі}}$  при відомих витратних характеристиках і кількості працюючих агрегатів m. При цьому вирішується оптимізаційна задача видачі потужності з мінімальними економічними витратами з урахуванням технічних обмежень і забезпеченні максимальної якості електроенергії.

Вихідним сигналом блоку РП є зміна потужності генераторів, яка коригується з урахуванням поточної частоти [14]:

$$\Delta P_{\text{гїjф}} = \Delta P_{\text{гїj}} + \Delta P_{\text{фїj}} = \Delta P_{\text{гїj}} + \frac{\Delta f \cdot P_{\text{гїj ном}} \cdot 100\%}{f \cdot k_{\text{стгї\%}}} \quad (9)$$

де  $P_{\text{гїj ном}}$  – номінальна потужність j-го генератора i-ої станції,  $k_{\text{стгї\%}}$  – коефіцієнт статизму j-го генератора i-ої станції.

При практичній реалізації системи управління режимами роботи МГЕС необхідною умовою є узгодження роботи розробленої АСУ з іншими

видами системної автоматики, що дозволить підвищити ефективність функціонування енергосистеми в цілому.

Застосування розробленої системи управління режимами роботи МГЕС дозволить найбільш точно і ефективно покривати графік навантаження ОЕС в цілому або окремих ЕЕС в часи пік (рис. 6).

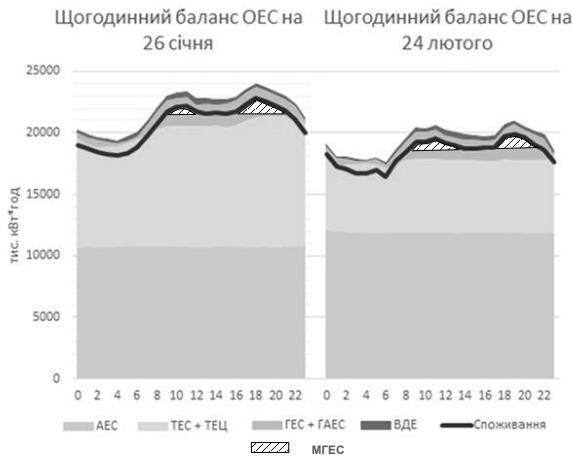


Рисунок 6 – Участь електростанцій ОЕС у покритті графіку навантаження

**Оцінка ефективності використання МГЕС для регулювання видачі потужності.** В якості критерію ефективності використання МГЕС для регулювання навантаження ЕЕС розглянемо величину чистого прибутку, який одержує МГЕС за видачу потужності в час пік навантаження ЕЕС:

$$\Pi = V_{\text{ЕЕП}} - V_{\text{сум}}, \quad (10)$$

де  $V_{\text{ЕЕП}}$  – вартість електричної енергії, виробленої МГЕС в час пік навантаження;  $V_{\text{сум}}$  – сумарні витрати виробництва МГЕС при виробленні електричної енергії.

Вартість виробленої в час пік електроенергії визначається за виразом

$$V_{\text{ЕЕП}} = W_{\text{ЕЕП}} \cdot C_{\text{ЕЕП}}, \quad (11)$$

де  $W_{\text{ЕЕП}}$  – кількість електричної енергії, виробленої МГЕС в час пік навантаження;  $C_{\text{ЕЕП}}$  – вартість електричної енергії, виробленої МГЕС в час пік навантаження.

Кількість електричної енергії, що виробляється МГЕС в час пік навантаження визначається відповідно до графіку навантаження за виразом:

$$W_{\text{ЕЕП}} = \sum_{i=m}^k (P_{\text{Hi}} - P_{\text{Gi}}) \cdot t_i, \quad (12)$$

де  $P_{\text{Hi}}$ ,  $P_{\text{Gi}}$  – величина потужності навантаження та генерації для  $i$ -ої ступені графіка навантаження;  $t_i$  – тривалість  $i$ -ої ступені графіка навантаження у годинах доби;  $m$ ,  $k$  – години доби, які відповідають початку та закінченню часу пік навантаження ЕЕС.

Вартість електричної енергії, виробленої МГЕС в час пік навантаження, повинна враховувати складність процесу видачі такої потужності, у зв'язку

із чим в умовах енергоринку її величина визначається наступним чином:

$$C_{\text{ЕЕП}} = C_{\text{ЕЕ}} \cdot k_{\text{ЕЕП}}, \quad (13)$$

де  $C_{\text{ЕЕ}}$  – вартість електричної енергії, відповідно до діючого тарифу;  $k_{\text{ЕЕП}}$  – коефіцієнт надбавки до тарифу за маневреність МГЕС при виробленні електричної енергії в час пік навантаження.

Сумарні витрати виробництва визначають як суму витрат на амортизацію, поточний ремонт і обслуговування для МГЕС  $V_{\text{Г}}$  і лінії  $V_{\text{Л}}$ , а також вартості втрат електроенергії  $V_{\Delta W}$  [18]:

$$V_{\text{сум}} = V_{\text{Г}} + V_{\text{Л}} + V_{\Delta W}, \quad (14)$$

При цьому:

$$V_{\text{Г}} = (p_{\text{ар}} + p_{\text{рг}} + p_{\text{ор}}) \times K_{\text{Г}}, \quad (15)$$

$$V_{\text{Л}} = (p_{\text{ал}} + p_{\text{рл}} + p_{\text{ол}}) \times K_{\text{Л}}, \quad (16)$$

де  $p_{\text{ар}}$ ,  $p_{\text{рг}}$ ,  $p_{\text{ор}}$ ,  $p_{\text{ал}}$ ,  $p_{\text{рл}}$ ,  $p_{\text{ол}}$  – норми відрахувань на амортизацію, поточний ремонт і обслуговування ГЕС та лінії відповідно, у відносних одиницях;  $K_{\text{Г}}$ ,  $K_{\text{Л}}$  – капітальні вкладення в ГЕС та лінії, по яким видається потужність в мережу.

Приймаємо для ПЛ  $(p_{\text{ал}} + p_{\text{рл}} + p_{\text{ол}}) = 0,028$ , для МГЕС  $(p_{\text{ар}} + p_{\text{рг}} + p_{\text{ор}}) = 0,094$ .

Вартість втрат електроенергії визначаємо як:

$$V_{\Delta W} = C_{\text{ЕЕ}} \times \Delta W_{\text{л}}, \quad (17)$$

$$\Delta W_{\text{л}} = \tau \times \sum_{j=1}^m \Delta P_{\text{л}j}, \quad (18)$$

$$\Delta P_{\text{л}j} = \frac{S_{\text{л}j}^2}{U_{\text{ном}}^2} \times r_{\text{л}j}, \quad (19)$$

де  $\Delta W_{\text{л}}$  – сумарні втрати електроенергії у лінії, по якій МГЕС видає потужність в мережу;  $\tau$  – час найбільших втрат;  $\Delta P_{\text{л}j}$  – втрати активної потужності в  $j$ -ій лінії;  $r_{\text{л}j}$  – активний опір  $j$ -ої лінії;  $S_{\text{л}j}$  – потік повної потужності по  $j$ -ій лінії;  $U_{\text{ном}}$  – номінальна напруга мережі;  $m$  – кількість ліній.

Собівартість виробництва електричної енергії МГЕС визначаємо як

$$C_{\text{ЕЕ}} = \frac{V_{\text{сум}}}{W_{\text{ЕЕП}}}. \quad (20)$$

Для ЕЕС, що розглядається, виконано розрахунок чистого прибутку МГЕС при покритті потреб навантаження в час пік. Результати представлені в табл. 3.

Таблиця 3 – Розрахунок чистого прибутку МГЕС при покритті потреб навантаження в час пік

Назва показника	Позначення	Кількісне значення показника
Кількість електричної енергії, виробленої МГЕС в час пік навантаження	$W_{\text{ЕЕП}}$	28776 кВт·год
Вартість електричної енергії	$V_{\text{ЕЕП}}$	86328 тис. грн.
Сумарні витрати виробництва	$V_{\text{сум}}$	6980,208 тис. грн.
Чистий прибуток	$\Pi$	79347,792 тис. грн.
Собівартість виробництва електричної енергії	$S_{\text{ЕЕ}}$	0,24 грн.

Отриманий результат вказує на досить високий показник економічної ефективності використання МГЕС для покритті графіку навантаження в час пік Північної енергетичної системи.

**Висновки.** Проведена оцінка економічної ефективності використання МГЕС для регулювання видачі потужності з метою забезпечення потреб навантаження в ЕЕС в час пік з використанням автоматизованої системи управління режимами роботи МГЕС та прогнозування короткострокового навантаження за допомогою штучної нейронної мережі показала обґрунтованість та доцільність використання 9 МГЕС для покритті потреб навантаження в час пік Північної енергетичної системи.

Таким чином, МГЕС являють собою найбільш мобільну групу енергообладнання щодо забезпечення резерву потужності, який має використовуватися в системі регулювання частоти та потужності ОЕС України. Реконструкція та розвиток гідроенергетики України дозволить гарантувати стійкість, надійність та ефективність роботи ОЕС України, підвищити економію органічного палива за рахунок збільшення частки електроенергії, виробленої на ГЕС в енергетичному балансі країни.

#### Список літератури

1. Осадчук В. А. Современные проблемы гидроэнергетики // Энергетика и электрификация. – 2007. – № 1. – С. 13 – 16.
2. Сучасний стан, проблеми та перспективи розвитку гідроенергетики України : аналіт. доп. / О. М. Суходоля, А. А.

Сидоренко, С. В. Бегун, А. А. Білуха. – К. : НІСД, 2014. – 112 с. – (Сер. «Національна безпека», вип. 8).

3. Smail Khennas, Andrew Barnett. Best Practices For Sustainable Development Of Micro Hydro Power In Developing Countries (Final synthesis report). – The Department for International Development, UK, The World Bank. – 2000. – 119 p.

4. Celso Penche. Layman's Handbook On How To Develop A Small Hydro Site (Second Edition). – DG XVII European Commission 200 rue de la Loi B-1049 Bruselas Belgica. – 1998. – 266 p.

5. Нурмахматов Д.Н., Ландау Ю.А., Шпатенко С.А. Проблемы и направления развития гидроэнергетики республики Таджикистан. Монография. – К.: Либра, 2007. – 296 с.

6. Анализ состояния и перспективы развития малой гидроэнергетики в Украине / Ю. Вихарев, А. Карамушка, А. Никиторович, В. Рябошапка // Энергетическая политика Украины. – 2005. – № 6. – С. 90 – 96.

7. Гидроэнергетика и окружающая среда/ Под ред. Ю.А.Ландау и Л.А.Сиренко. Монография. – К.:Либра, 2004. – 484 с.

8. Нікіторович О.В., Лежнюк П.Д., Кулик В.В. Підвищення ефективності експлуатації малих ГЕС засобами автоматичного керування // Гідроенергетика України. – 2007. – №3. – С. 38–41.

9. Артюх С. Ф. Сучасний стан проблеми і перспективи малої енергетики України / С. Ф. Артюх // Науковий вісник НУ «ХПІ». – № 6. – 2008. – С. 102–108.

10. Енергетична стратегія України до 2030 року. Схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 24.07.2013. № 1071.

11. Відновлювані джерела енергії в розподільних електричних мережах [П.Д. Лежнюк, О.А. Ковальчук, О.В. Нікіторович, В.В. Кулик]: Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2014. – 205 с.

12. [http://elektrovesti.net/54990\\_poyavilas-interaktivnaya-karta-vsekh-obektov-vie-v-ukraine](http://elektrovesti.net/54990_poyavilas-interaktivnaya-karta-vsekh-obektov-vie-v-ukraine)

13. Вороновский Г.К., Махотило К.В., Сергеев С.А. Проблемы и перспективы использования искусственных нейронных сетей в энергетике. – Проблемы загалльної енергетики. – 2006. – №6. – С. 25–32.

14. D. E. Rumelhart and J.L. McClelland, Parallel Distributed Processing, vol. 1, MIT Press, 1986.

15. Овчаренко Н.И. Автоматика электрических станций и электроэнергетических систем: учебник для вузов / под ред. А.Ф. Дьякова. – М.: Изд-во НИЦ ЭНАС, 2001. – 504 с.

16. Управление режимами энергосистем и вопросы автоматизации: учеб. пособ. / А.А. Минченко, В.Н. Яровой. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2009. – 189 с.

17. Лежнюк П.Д., Кулик В.В., Бурикин О.Б. Ковальчук О.А. Оптимізація режимів електричних мереж з малими ГЕС в умовах адресного електропостачання // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск: Проблеми сучасної електротехніки. Ч. 3. – 2010. – С. 31–34.

18. Економіка в енергетиці: навч. посіб / О. М. Проскурня, О. І. Ганус. - Х.: Підручник НТУ ХПІ, 2012. - 272 с.

#### References (transliterated)

1. Osadchuk V. A. Sovremennyye problemy gidroenergetiki // Energetika i elektrifikaciya. – 2007. – № 1. – S. 13 – 16.

2. Suchasnij stan, problemi ta perspektivi rozvittu gidroenergetiki Ukraini : analit. dop. / O. M. Suhodolya, A. A. Sidorenko, S. V. Byegun, A. A. Biluha. – K. : NISD, 2014. – 112 s. – (Ser. «Nacionalna bezpeka», vip. 8).

3. Smail Khennas, Andrew Barnett. Best Practices For Sustainable Development Of Micro Hydro Power In Developing Countries (Final synthesis report). – The Department for International Development, UK, The World Bank. – 2000. – 119 p.

4. Celso Penche. Layman's Handbook On How To Develop A Small Hydro Site (Second Edition). – DG XVII European Commission 200 rue de la Loi B-1049 Bruselas Belgica. – 1998. – 266 p.

5. Nurmahmatov D.N., Landau Yu.A., Shpatenko S.A. Problemy i napravleniya razvitiya gidroenergetiki respubliki Tadjikistan. Monografiya. – K.: Libra, 2007. – 296 s.

6. Analiz sostoyaniya i perspektivy razvitiya maloj gidroenergetiki v Ukraine / Yu. Viharev, A. Karamushka, A. Nikitorovich, V. Ryaboshapka // Energeticheskaya politika Ukrainy. – 2005. – № 6. – S. 90 – 96.

7. Гідроенергетика і окрузхайушaya sereda/ Pod red. Yu.A.Landau i L.A.Sirenko. Monografiya. – K.:Libra, 2004. – 484 s.
8. Nikitorovich O.V., Lezhnyuk P.D., Kulik V.V. Pidvishennya efektyvnosti ekspluatatsiyi malih GES zasobami avtomatichnogo keruvannya // Gidroenergetika Ukraini. – 2007. – №3. – S. 38–41.
9. Artyuh S. F. Suchasnij stan problemi i perspektivi maloyi energetiki Ukraini / S. F. Artyuh // Naukovij visnik NU «HPI». – № 6. – 2008. – S. 102–108.
10. Energetichna strategiya Ukraini do 2030 roku. Shvaleno rozporядzhennyam Kabinetu Ministriv Ukraini vid 24.07.2013. № 1071.
11. Vidnovlyuvani dzhherela energiyi v rozpodilnih elektrichnih mrezhah [P.D. Lezhnyuk, O.A. Kovalchuk, O.V. Nikitorovich, V.V. Kulik]: Monografiya. – Vinnitsya: UNIVERSUM-Vinnitsya, 2014. – 205 s.
12. [http://elektrovesti.net/54990\\_poyavilas-interaktivnaya-karta-vsekh-obektov-vie-v-ukraine](http://elektrovesti.net/54990_poyavilas-interaktivnaya-karta-vsekh-obektov-vie-v-ukraine)
13. Voronovskij G.K., Mahotilo K.V., Sergeev S.A. Problemy i perspektivy ispolzovaniya iskusstvennyh nejronnyh setej v energetike. – Problemy zagalnoi energetiki. – 2006. - №6. – S. 25-32.
14. D. E. Rumelhart and J.L. McClelland, Parallel Distributed Processing, vol. 1, MIT Press, 1986.
15. Ovcharenko N.I. Avtomatika elektricheskikh stancij i elektroenergeticheskikh sistem: uchebnik dlya vuzov / pod red. A.F. Dyakova. – M.: Izd-vo NC ENAS, 2001. – 504 s.
16. Upravlenie rezhimami energosistem i voprosy avtomatizacii: ucheb. posob. / A.A. Minchenko, V.N. Yarovoj. – Harkov: NTU «HPI», 2009. – 189 s.
17. Lezhnyuk P.D., Kulik V.V., Burikin O.B. Kovalchuk O.A. Optimizaciya rezhimiv elektrichnih mrezh z malimi GES v umovah adresnogo elektropostachannya // Tehnichna elektrodinamika. Tematichnij vipusk: Problemy suchasnoyi elektrotehniki. Ch. 3. – 2010. – S. 31–34.
18. Ekonomika v energetici: navch. posib / O. M. Proskurnya, O. I. Ganus. - H.: Pidruchnik NTU HPI, 2012. - 272 s.

Надійшла (received) 18.01.2018

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Довгалюк Оксана Миколаївна (Довгалюк Оксана Николаевна, Dovgalyuk Oksana Mykolayivna)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри передачі електричної енергії, м. Харків; тел.: (057) 707-62-46; e-mail: [Dovgalyuk\\_O@khp.edu.ua](mailto:Dovgalyuk_O@khp.edu.ua).

**Лазуренко Олександр Павлович (Лазуренко Александр Павлович, Lazurenko Alexander Pavlovich)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри електричних станцій, м. Харків; тел.: (057) 707-65-65; e-mail: [Lazurenkoap@i.ua](mailto:Lazurenkoap@i.ua).

**Жуков Юрій Олексійович (Жуков Юрий Алексеевич, Zhukov Yuriy Alekseevich)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент, м. Харків; тел.: (057) 707-65-65; e-mail: [yu.zhukov@gmail.com](mailto:yu.zhukov@gmail.com).

**Лухтура Микола Іванович (Лухтура Николай Иванович, Luhtura Nikola Ivanovich)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент, м. Харків; тел.: (057) 707-62-46; e-mail: [kolia.lukhtura@gmail.com](mailto:kolia.lukhtura@gmail.com).

**Сайдів Шералі Нуралійович (Саидов Шерали Нуралиевич, Saidov Sherali Nuralievich)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент, м. Харків; тел.: (057) 707-65-65; e-mail: [Saidov.sh.n@gmail.com](mailto:Saidov.sh.n@gmail.com).

Укладач: С. О. Федорчук, аспірант.



УДК 621.311.171

*Р. В. ЗАЙЦЕВ, М. В. КІРІЧЕНКО, Д. С. ПРОКОПЕНКО***ВИСОКОВОЛЬТНА СИСТЕМА ВІДБОРУ ПОТУЖНОСТІ ДЛЯ СОНЯЧНОЇ СТАНЦІЇ**

Проведено аналіз роботи фотоелектричної станції на основі гібридних фотоенергетичних модулів. На основі виявлених недоліків запропоновано схему відбору потужності на основі підвищуючого перетворювача. Розроблена принципова електрична схема регульованого мостового резонансного підвищуючого перетворювача з цифровим керуванням, що забезпечує надійність роботи, швидке і точне знаходження точки максимальної потужності і ефективність перетворення до 0,956. Проведено його реалізацію та апробації у складі фотоелектричної станції

**Ключові слова:** гібридний фотоенергетичний модуль, підвищуючий перетворювач, фотоелектрична станція, коефіцієнт корисної дії

*Р. В. ЗАЙЦЕВ, М. В. КИРИЧЕНКО, Д. С. ПРОКОПЕНКО***ВИСОКОВОЛЬТНАЯ СИСТЕМА ОТБОРА МОЩНОСТИ ДЛЯ СОЛНЕЧНОЙ СТАНЦИИ**

Проведен анализ работы фотоэлектрической станции на основе гибридных фотоэнергетических модулей. На основе выявленных недостатков предложена схема отбора мощности на основе повышающего преобразователя. Разработана принципиальная электрическая схема регулируемого мостового резонансного повышающего преобразователя с цифровым управлением, обеспечивает надежность работы, быстрое и точное нахождение точки максимальной мощности и эффективность преобразования до 0,956. Проведено его реализацию и апробации в составе фотоэлектрической станции

**Ключевые слова:** гибридный фотоэнергетический модуль, повышающий преобразователь, фотоэлектрическая станция, коэффициент полезного действия

*R. ZAITSEV, M. KIRICHENKO, D. PROKOPENKO***HIGH-VOLTAGE POWER TAKE-OFF SYSTEM FOR SOLAR STATION**

Mathematical modeling of the heat exchange unit main parameters for photoenergy system based on general models with forced circulation of heat transfer fluid. To determine the coefficient of heat transfer at a given coolant temperature and surfaces temperature necessary to determine the temperature gradient in the wall of the heat exchanger. Temperature gradients can be determined by solving the equation of energy, which depends on the distribution of the flow rate in the flow. In general, a solution of convective heat transfer fluid to flow along the plane comes to a decision system of differential equations. In work features the selection of theoretical basis and mathematical modeling of thermal processes in the heat exchange unit for combination photoenergy system. As a result of the simulation conducted to improve and develop high-efficiency heat exchange unit with microchannels. Testing of the proposed unit proved its high efficiency through the implementation of turbulent flow of coolant with heat transfer coefficient at 18 kW/(m<sup>2</sup>·K). Analytical testing of the heat exchanger allowed showing that heat exchanger unit provides a stable operating temperature at less than 50°C with the coolant flow rate is less than 0.3 m/s. Novelty of proposed heat exchanger in the optimal design of microchannels to improve the heat transfer coefficient. The use of this heat exchanger will improve the quality and uniformity of cooling solar panels and reduce energy costs for circulation of fluid.

**Keywords:** hybrid photoenergy module, rising converter, photovoltaic station, efficiency

**Вступ.** Розв'язання завдання конкурентоспроможності фотоелектричних електростанцій на енергетичному ринку в порівнянні з електричною енергією, що виробляється традиційними джерелами, є необхідною умовою для широкомасштабного використання енергії Сонця в наземних умовах.

Для вирішення цього завдання було реалізовано конструктивно-технологічне рішення гібридних фотоенергетичних модулів (ФЕМ) на основі монокристалічних кремнієвих ФЕМ, оснащених системою охолодження для забезпечення вироблення максимальної електричної потужності в процесі експлуатації модуля. Оснащення модулів в складі фотоелектричної станції блоком охолодження для зниження робочої температури [1] фотоелектричних перетворювачів дозволяє збільшити їх електричну потужність в процесі експлуатації і термін служби окремих ФЕМ, а при одночасному використанні концентраторів сонячного випромінювання, дозволяє домогтися практично дворазового збільшення електричної потужності, що виробляється фотоелектричними модулями. Монтаж таких

фотоенергетичних модулів на трекері - пристрої стеження за сонячним випромінюванням, дозволить отримати до 30% збільшення електричної потужності, що виробляється фотоелектричними модулями.

Однак виникає проблема при використанні стандартних елементів системи перетворення постійної напруги, що виробляється гібридними фотоенергетичним модулем в електроенергію промислової частоти.

**Мета.** Виходячи з викладеного вище, метою роботи була розробка схемотехнічного і конструктивного рішень DC-DC перетворювача для системи відбору потужності фотоелектричної станції на основі гібридних фотоенергетичних модулів. Розробка такого приладу проводилася на основі розрахунку резонансного кола DC-DC перетворювача і параметрів його роботи з подальшою розробкою принципової електричної схеми та виготовленням приладу.

1. Вибір схемотехнічного рішення.

За попередньою оцінкою, проведеною раніше, найкращими схемотехнічними рішеннями є мостовий резонансний перетворювач і трьохкаскадний

паралельно-послідовний перетворювач, що містить два резонансних перетворювача і знижуюче-підвищуючий перетворювач [2, 3]. Дані схемотехнічні рішення забезпечують найвищий ККД у всьому діапазоні робочих вхідних параметрів, а також простоту реалізації системи управління транзисторами, включаючи можливість застосування спеціалізованих інтегральних мікросхем. Високе значення ККД зводить до мінімуму труднощі реалізації охолодження перетворювача. В якості корпусу зручно використовувати наявні на ринку герметичні металеві корпуси з алюмінієвих сплавів. Вибір максимальної вхідної потужності і вхідної напруги перетворювача, що відповідають параметрам одного ФЕМ є оптимальним, оскільки дозволяє застосовувати спеціалізовані інтегральні мікросхеми і дешеві транзистори, які використовуються в автомобільній і комп'ютерній техніці, а також легко дозволяє організувати охолодження силових компонентів. Іншою позитивною властивістю роботи перетворювача на один ФЕМ є більш повне використання потужності світлового потоку і можливість віддаленого моніторингу стану кожного ФЕМ.

З огляду на широкий діапазон коефіцієнта передачі DC-DC перетворювача в робочих діапазонах вхідних і вихідних напруг, більше число активних і пасивних компонентів при реалізації трьохкаскадного паралельно-послідовного перетворювача, вибір схемотехнічного рішення регульованого мостового резонансного перетворювача (рисунок 1) є оптимальним по співвідношенню вартості реалізації, числа компонентів і технічних характеристик перетворювача.

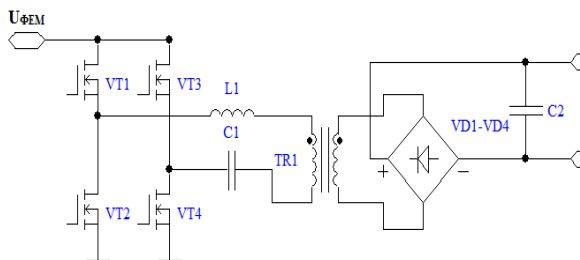


Рис. 1 - Мостовий резонансний LLC перетворювач

2. Розрахунок підвищуючого DC-DC перетворювач для високоефективної системи відбору потужності

Коефіцієнт передачі регульованого мостового резонансного перетворювача:

$$G = K \cdot n, \quad (1)$$

де  $K$  – коефіцієнт передачі резонансного LLC кола;

$n$  – відношення числа витків вторинної обмотки до числа витків первинної обмотки трансформатора TR1.

Оскільки резонансний перетворювач має максимальну ефективність при  $K = 1$ , обчислимо  $n$  з

умови максимальної ефективності в номінальному режимі роботи перетворювача:

$$n = \frac{U_{in.nom.}}{U_{out.nom.}} = \frac{30}{630} = \frac{1}{21}, \quad (2)$$

де  $U_{in.nom.}$  – номінальна вхідна напруга перетворювача;

$U_{out.nom.}$  – номінальна вихідна напруга перетворювача.

Коефіцієнт передачі резонансного LLC кола повинен приймати максимальне значення  $K_{max}$  при поєднанні мінімальної вхідної ( $U_{in.min.}$ ) і максимальної вихідної напруги ( $U_{out.max.}$ ), і мінімальне значення  $K_{min}$  при поєднанні максимальної вхідної ( $U_{in.max.}$ ) і мінімальної вихідної ( $U_{out.min.}$ ) напруги:

$$K_{max} = n \cdot \frac{U_{out.max.}}{U_{in.min.}} = \frac{1}{21} \cdot \frac{700}{23} \approx 1,45; \quad (3)$$

$$K_{min} = n \cdot \frac{U_{out.min.}}{U_{in.max.}} = \frac{1}{21} \cdot \frac{600}{42} \approx 0,68 \quad (4)$$

Для розрахунку параметрів резонансного LLC кола скористаємося еквівалентною схемою заміщення резонансного кола (рисунок 2) [4].

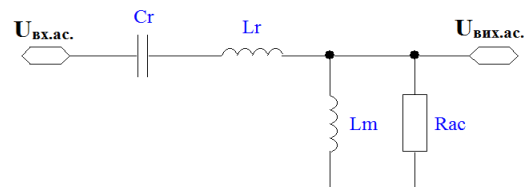


Рис. 2 - Еквівалентна схема заміщення резонансної ланцюга LLC

Для наведеної схеми заміщення коефіцієнт передачі резонансного LLC кола описується виразом:

$$K = \left| \frac{U_{in}}{U_{out}} \right| = \frac{F_x^2 (m-1)}{\sqrt{(mF_x^2 - 1) + F_x^2 (F_x^2 - 1)^2 (m-1)^2 Q^2}}, \quad (5)$$

$$\text{Де } Q = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} \text{ – добротність;}$$

$$R_{ac} = \frac{8}{\pi^2} n^{-2} \frac{U_{out}}{I_{out}} \text{ – приведений опір}$$

навантаження;

$U_{in}$  – вхідна напруга перетворювача;

$U_{out}$  – вихідна напруга перетворювача;

$I_{out}$  – вихідний струм перетворювача;

$F_x = \frac{f_s}{f_r}$  – нормалізована частота перемикання

транзисторів;

$f_s$  – частота перемикання транзисторів перетворювача;

$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}}$  – резонансна частота контуру  $L_r$ ,

$C_r$ ;

$L_r$  – резонансна індуктивність;

$C_r$  – резонансна ємність;

$$m = \frac{L_r + L_m}{L_r} - \text{відношення сумарної вхідної індуктивності контуру до резонансної індуктивності};$$

$L_m$  – індуктивність намагнічування трансформатора.

Мінімальний приведений опір навантаження  $R_{ac.min.}$  відповідає мінімальній вихідній напрузі та максимальній вихідній потужності ( $P_{in.max.}$ ) при очікуваному максимальному коефіцієнті корисної дії 98%:

$$R_{ac.min.} = \frac{8}{\pi^2} n^2 \frac{U_{out.min.}^2}{P_{in.max.} \cdot \eta} = \frac{8}{3,14^2} \cdot 0,047619^2 \cdot \frac{600^2}{300 \cdot 0,98} \approx 2,25 \text{ Ом. (6)}$$

Алгоритм розрахунку параметрів резонансного ланцюга представлений на рисунку 3.

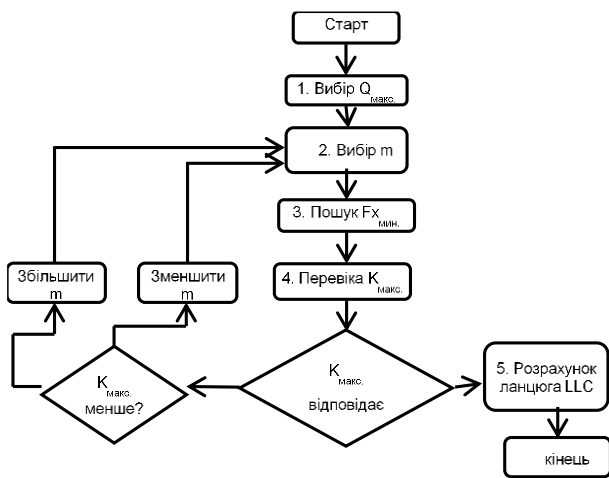


Рис. 3 - Алгоритм розрахунку параметрів резонансного ланцюга

Крок 1. Вибір максимальної добротності  $Q_{max}$ . Добротність контуру LLC приймає максимальне значення при мінімальному наведеному опорі навантаження  $R_{ac.min.} = 2,25 \text{ Ом}$ . При низькому значенні добротності потрібна велика частота комутації транзисторів перетворювача для досягнення мінімального коефіцієнта передачі резонансного LLC контуру  $K_{min}$  [5]. Отже, зростають динамічні втрати в транзисторах і діодах. При високому значенні добротності неможливо досягти максимального коефіцієнта передачі резонансного LLC контуру  $K_{max}$ . На рисунку 4 представлений приклад залежності коефіцієнта передачі резонансного контуру від нормалізованої частоти перемикачів транзисторів при фіксованих значеннях добротності. Область частоти перемикачів транзисторів, що знаходиться ліворуч від точки перегину кривої, відповідає емнісному характеру навантаження і є забороненою, зважаючи на «жорстке» перемикачів транзисторів з великою швидкістю наростання напруги, що приводить до виходу транзисторів з ладу.

З прикладу видно, що для діапазону  $K$  від 0,8 до 1,2 значення добротності 0,5 є оптимальним.

Крок 2. Вибір значення відносини сумарної вхідної індуктивності контуру до резонансної індуктивності  $m$ . Дане відношення є постійним і залежить тільки від параметрів моткових компонентів. При зниженні значення  $m$  збільшується коефіцієнт передачі резонансного контуру  $K$ , але також зростає реактивний струм, що збільшує статичні втрати перетворювача. Значення  $m$  слід вибирати максимально можливим, при якому коефіцієнт  $K$  може приймати необхідне значення  $K_{max}$ .

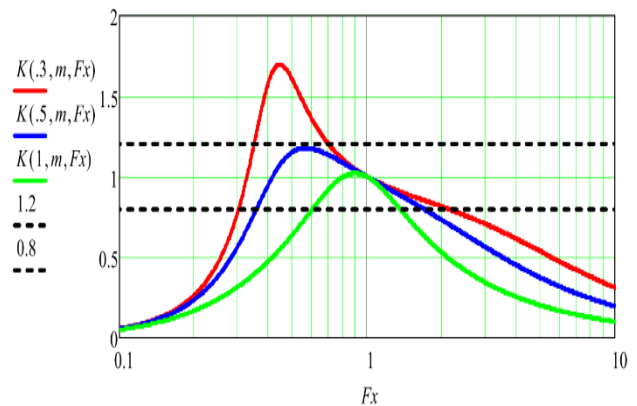


Рис. 4 - Приклад залежності коефіцієнта передачі LLC контуру від нормалізованої частоти при різних значеннях добротності

Крок 3. Знаходження мінімальної нормалізованої частоти за умови зберігання індуктивного характеру струму на вході LLC контуру при мінімальній добротності. Мінімальна нормалізована частота перемикачів транзисторів  $F_{x.min.}$ , При якій струму на вході LLC контуру має індуктивний характер визначається за графіком залежності коефіцієнта передачі резонансного контуру від нормалізованої частоти перемикачів транзисторів при максимальному значенні добротності за умови:

$$\frac{d}{dF_x} K(Q_{max.}, m, F_{x.min.}) = 0. \quad (7)$$

Крок 4. Перевірка значення максимального коефіцієнта передачі резонансного контуру  $K_{max.}$  при отриманих вище значеннях  $Q_{max.}$ ,  $m$ ,  $F_{x.min.}$ . Дану перевірку слід виконувати по співвідношенню для добротності або за допомогою комп'ютерного моделювання. При не відповідності  $K_{max.}$  значенням 1,45 слід змінюючи значення  $m$  досягти цієї відповідності.

Крок 5. Після визначення значень  $Q_{max.}$ ,  $m$ ,  $F_{x.min.}$ . Далі визначають резонансний індуктивність і ємність, індуктивність намагнічування трансформатора.

Правильний розрахунок резонансного кола дозволяє отримати оптимальні характеристики перетворювача. Алгоритм дозволяє в кілька ітерацій розрахувати необхідні параметри резонансного LLC кола. Використовуючи наближений розрахунок і уточнюючи його за допомогою моделювання можна отримати досить вірні результати при значній економії часу.

Мінімальна вхідна напруга DC-DC перетворювача відповідає максимальній температурі

ФЕП, освітленості  $200 \text{ Вт/м}^2$ , тобто вхідній потужності ( $P_{in.min.}$ ) не більше:

$$P_{in.min.}(23V) \leq 23V \cdot I_{in.ном.} \cdot \frac{200 \text{ Вт/м}^2}{1000} = 37,6 \text{ Вт} \quad (8)$$

З огляду на широкий діапазон вхідних і вихідних параметрів DC-DC перетворювача, особливості регулювання резонансного перетворювача і залежність ефективності від параметрів LLC контуру, задамо залежність максимальної вхідної потужності від вхідної напруги з метою отримання максимального значення коефіцієнта корисної дії і оптимального поєднання з використовуваними ФЕМ. Задана залежність максимальної вхідної потужності від вхідної напруги представлена на рисунку 5.

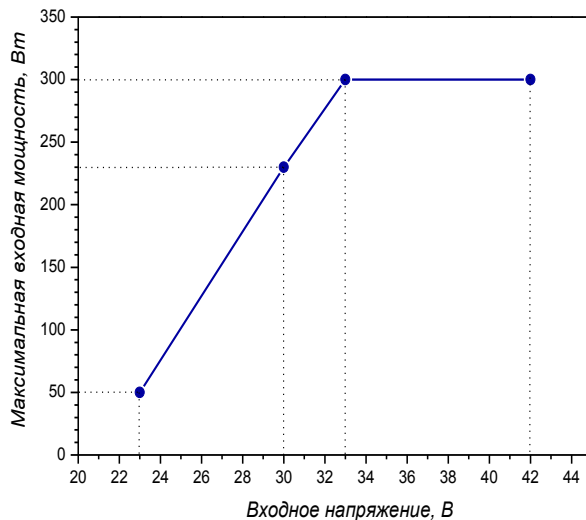


Рис. 5 - Залежність максимальної вхідної потужності DC-DC перетворювача від вхідної напруги

Максимальне значення добротності відповідає максимальному вихідному струму. Вихідний струм приймає максимальне значення при мінімальній вихідній напрузі та максимальній вихідній потужності. Значення мінімального наведеного опору навантаження  $R_{ac.min.} = 2,25 \text{ Ом}$  відповідає максимальній добротності LLC контуру, при цьому максимальне значення коефіцієнта передачі резонансного кола  $K_{max} = 1,45$  потрібно при вхідній потужності 50 Вт і вихідній напрузі 700 В. За виразом для  $R_{ac}$  визначається значення мінімального наведеного опору навантаження  $R_{ac.min.}$  для вхідної напруги 23 В:

$$R_{ac.min.}(23V) = \frac{8}{3,14^2} * 0,047619^2 * \frac{600^2}{50 * 0,98} \approx 13,5 \text{ Ом} \quad (9)$$

Діаграми і дані для частоти резонансу 100 кГц, отримані за алгоритмом розрахунку параметрів резонансного ланцюга шляхом декількох ітерацій з перевіркою комп'ютерним моделюванням, представлені на рисунку 6 і в таблиці 1. Значення відносини сумарної вхідної індуктивності контуру до резонансної  $m = 11$ .

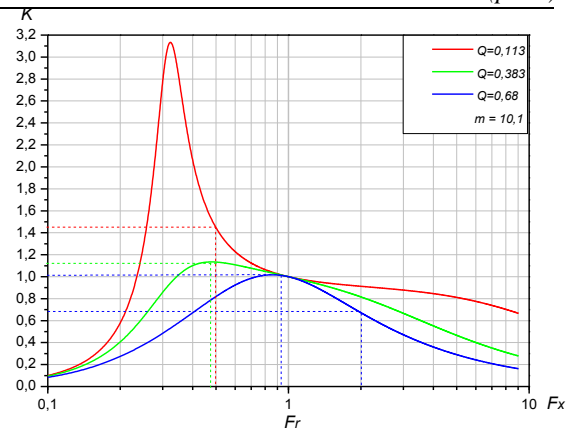


Рис. 6 - Залежність коефіцієнта передачі LLC контуру від нормалізованої частоти при заданих значеннях добротності

Таблиця 1 - Параметри резонансного кола

$U_{in}$ , В	$P_{in}$ , Вт	$K_{max}$	$K$	$R_{ac.max.}$ , Ом	$Q_{max}$	$F_x$
23	50	1,45	3,13	13,5	0,113	0,33
30	230	1,11	1,134	3,995*	0,383*	0,48*
33	300	1,01	1,026	2,25	0,68	0,86
42	300	0,79	1,026	2,25	0,68	0,972

\* Значення  $R_{ac.min.}$  відповідає максимальній вихідній напрузі і  $K_{max}$ .

Виберемо значення резонансної ємності з ряду Е6  $0,94 \text{ мкФ}$  (два конденсатора по  $0,47 \text{ мкФ}$  в паралель), при частоті резонансу  $F_r = 110,7 \text{ кГц}$  отримаємо значення резонансної індуктивності  $L_r = 2,2 \text{ мкГн}$  і при  $m = 10,1$  значення індуктивності намагнічування трансформатора  $L_m = 20 \text{ мкГн}$ .

На рисунку 7 представлена модельна тимчасова діаграма струму резонансного дроселя і струму первинної обмотки трансформатора при різних поєднаннях вхідних і вихідних параметрів DC-DC перетворювача.

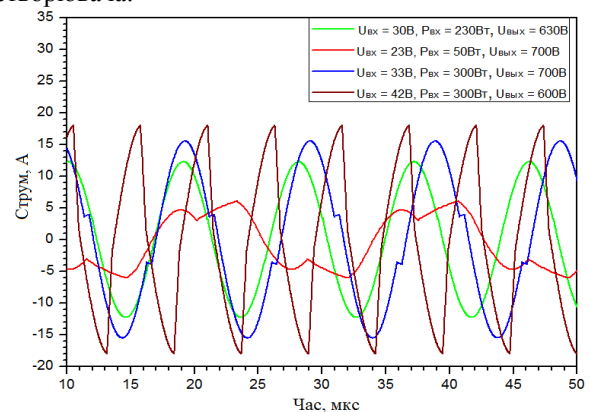


Рис. 7 - Модельна тимчасова діаграма струму дроселя

Як резонансний конденсатор застосовано паралельно з'єднані конденсатори В32652А3474J000 ( $250\text{В } 0,47 \text{ мкФ}$ ) з поліпропіленовим діелектриком. Як резонансна індуктивність застосований дросель В82559А4222А020 ( $2,2 \text{ мкГн}$ ,  $43 \text{ А}$ ).

Трансформатор складається з сердечника ETD44 з магнітним зазором 0,5 мм. Вторинна обмотка складається з двох частин по 74 і 73 витка високочастотного дроту ЛЕШО 14x0,1, з'єднаних послідовно. Первинна обмотка містить 7 витків високочастотного дроту ЛЕПКО 175x0,1 і розташовується між двома частинами вторинної обмотки. Вимірювальна обмотка містить 7 витків дроту ПЕТВ-2 0,3.

Результати.

1. Розробка принципової електричної схеми DC-DC перетворювача

На рисунку 8 представлена функціональна схема DC-DC перетворювача. Напряга фотоелектричного модуля надходить на вхід DC-DC перетворювача. Формування параметрів перетворювача і перемикання транзисторів здійснюється за допомогою цифрового мікроконтролера МС. Сигнал керування на затвори транзисторів VT1 – VT4 надходить з МС через драйвери Dr.1 – Dr.4. Транзистори в межах кожного плеча моста перемикаються синхронно. Живлення драйверів і мікроконтролера здійснюється через стабілізований знижуючий перетворювач постійної напруги власних потреб. МС вимірює вихідний сум ФЕМ за допомогою шунта R3 і підсилювача, вихідної напруги ФЕМ через дільник на резисторах R1 – R2. МК на виходах G1 та G2 формує два протифазних меандри для перемикання транзисторів з необхідною частотою і час затримки між перемиканнями діагоналей моста («мертвий» час). Напряга середньої точки напівмоста транзисторів VT1 та VT2 використовується при визначенні адаптивного «мертвого» часу (мінімально достатнього) для максимальної ефективності перетворювача, через дільник на резисторах R4 та R5 поступає в компаратор МС. Додаткова обмотка трансформатора N3, підключена до випрямного мосту VD1, служить для контролю вихідної напруги і, спільно з сигналом напруги середньої точки напівмоста, бере участь в алгоритмі детектування наближення до емнісного характеру струму резонансного LLC кола. Детектування наближення до емнісного характеру струму резонансного кола вкрай необхідно при запуску перетворювача, а також при відносно різких змінах величини напруги на вихідному перетворювачі – мережі постійного струму 600 В – 700 В.

Резонансне LLC коло утворене дроселем L1, конденсатором C1 і трансформатором T1. Резонансна індуктивність включає в себе індуктивність дроселя L1 та індуктивність розсіювання трансформатора T1. Вихідна напруга з трансформатора надходить на випрямляч, утворений доданими мостом VD2 і конденсатором C3. Вихідна напруга випрямляча є вихідною напругою перетворювача.

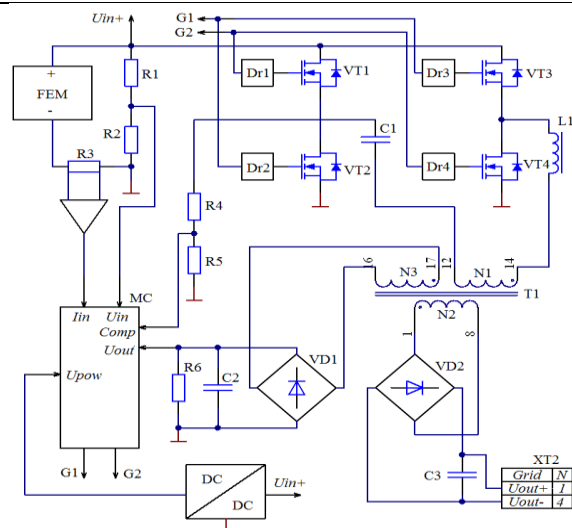


Рис. 8- Функціональна електрична схема DC-DC перетворювача

Відстеження точки максимальної потужності ФЕМ здійснюється мікроконтролером за алгоритмом «Збурення і спостереження» [6]. Мікроконтролер обчислює вхідну потужність перетворювача, далі на невелику величину змінює вхідний опір зміною частоти комутації транзисторів, внаслідок чого змінюється вхідна напруга і обчислює потужність, якщо потужність збільшується – контролер продовжує змінювати напругу в цьому ж напрямку, поки потужність не перестане збільшуватися. Цифрове керування перетворювачем дозволяє здійснювати алгоритм відстеження точки максимальної потужності «Збурення і спостереження», формування адаптивного «мертвого» часу, детектування струму емнісного характеру в навантаженні моста. За допомогою мікроконтролера стає можлива реалізація інформаційної кабельної або бездротової мережі, наприклад, RS-485 або ZigBee, для моніторингу параметрів ФЕМ та перетворювачів, надання оперативної інформації про несправності, тощо.

Перетворювач складається з трьох функціональних блоків А1-А3, представлених на рисунку 9.

Джерело живлення власних потреб (ДВП) призначене для формування стабілізованої напруги живлення 3,3 В і напруги живлення драйверів транзисторів перетворювача 12 В. ДВП складається з двох послідовних каскадів понижуючих імпульсних перетворювачів постійної напруги без гальванічної розв'язки. ДВП має високу ефективність і стабілізує вихідну напругу в широкому діапазоні вхідної напруги.

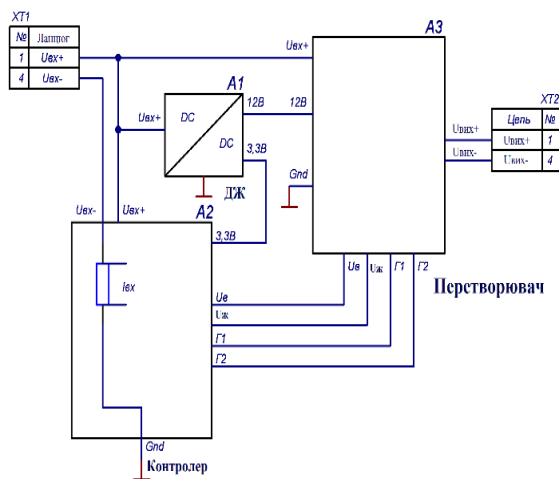


Рис. 9 - Принципова електрична схема DC-DC перетворювача

Контролер. В якості мікроконтролера використовується 32 розрядний ARM Cortex M-4. Сигнали зворотного зв'язку після перетворення рівнів і фільтрації надходять в АЦП мікроконтролера. Сигнал струму з шунта посилюється диференціальним підсилювачем до необхідного рівня і далі надходить в АЦП. На мікросхемі DA6 виконане джерело опорної напруги АЦП. Компаратори виконані на швидкодіючих інтегральних мікросхемах LMV7235M5. Сигнали керування транзисторами надходять до кола G1 та G2 на входи драйверів.



Рис. 10 - Розроблений і виготовлений DC-DC перетворювач

Перетворювач складається з: чотирьох транзисторів MOSFET VT1 – VT4; двох драйверів напівмоста на мікросхемах DA7, DA8; конденсаторів кола живлення; резонансного кола RLC на дроселі L4, трансформатора T1, конденсаторів C46, C47; сигнального випрямляча на діодах VD – VD12; вихідного випрямляча на діодах VD13 – VD16 і конденсаторів C52, C53. В якості транзисторного моста застосовані високошвидкісні MOSFET транзистори з низьким зарядом затвора і опором відкритого каналу 2,8 мОм. У вхідному випрямлячі застосовані діоди на основі карбіду кремнію, що дозволяє помітно підвищити ефективність в області частот перемикання транзисторів вище значення резонансної частоти, за рахунок відсутності втрат на зворотне відновлення діодів на основі карбіду кремнію.

## 2. Реалізація DC-DC перетворювача

На рисунку 10 приведено створений на основі запропонованої схеми DC-DC перетворювачів для безпосередньої установки на гібридні фотоенергетичні модулі, що дозволяє істотно збільшити ефективність перетворення вироблюваної ними енергії.

### Висновки.

1. Регульований резонансний перетворювач є доцільним схемотехнічним рішенням, що дозволяє домогтися високих значень ефективності перетворення електричної енергії для фотоелектричної станції на основі гібридних фотоелектричних модулів. Складність визначення оптимальних параметрів резонансного ланцюга для застосування в DC-DC перетворювачі з широким діапазоном вхідних і вихідних робочих характеристик є перешкодою для застосування резонансного перетворення. Застосування комп'ютерного моделювання та алгоритму з численними ітераціями значно полегшує розрахунок оптимальних значень характеристик резонансного LLC контуру.

2. Цифрове управління DC-DC перетворювачем відкриває широкі можливості для створення алгоритмів управління, що забезпечують надійність і ефективність перетворення, швидке і точне знаходження точки максимальної потужності. Цифрове управління дозволяє реалізувати інформаційну мережу для моніторингу параметрів ФЕМ та перетворювачів в складі фотоелектричної станції.

### Список літератури

1. **Kriukov Yu.A.** Influence of operating temperature on efficiency of silicon photovoltaic devices / **Yu.A. Kriukov, A.Ye. Zaitsev, A.A. Feshchenko, A.V. Gorshkov** // *International Journal of Applied Engineering Research*. - 2015. - Vol.10. - No.15. - P.35446-35450.
2. **Мелешин В.** Управление транзисторными преобразователями электроэнергии / **В. Мелешин, Д. Овчинников** - М.: «Техносфера», 2011. - 576 с.
3. **Розанов Ю.К.** Силовая электроника в системах с нетрадиционными источниками электроэнергии / **Ю.К. Розанов, Н.Н. Баранов, Б.М. Антонов, Е.Н. Ефимов, А.В. Соломатин** // *Электричество*. - 2002. - №3. - С.20-28.
4. **Gu Yi.** A simple structure of LLC resonant DC-DC converter for multi-output applications / **Yi. Gu, L. Hang, H. Chen, Z. Lu** // *Applied Power Electronics Conference and Exposition*. - 2005. - Vol.3. - P.1485-1490.
5. **Abdel-Rahman S.** Resonant LLC converter: Operation and Design 250W 33Vin 400Vout Design Example / **S. Abdel-Rahman** // Infineon Technologies Application Note AN 2012-09 V1.0, 2012.
6. **Freeman D.** Introduction to photovoltaic systems maximum power point tracking. Texas Instruments Application Report SLVA446, 2010.

### References (transliterated)

1. **Kriukov Yu.A., Zaitsev A.Ye., Feshchenko A.A., Gorshkov A.V.** Influence of operating temperature on efficiency of silicon photovoltaic devices. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2015, **10**(15), 35446-35450.
2. **Melyoshin V., Ovchinikov D.** Upravlenie tranzistornymi preobrazovatelayami elektroenergii - Moscow, Technosfera Publ., 2011. 576 p.

3. **Rozanov Yu.K., Baranov N.N., Antonov B.M., Efimov E.N., Solomatin A.V.** Silovaya elektronika v sistemah s netraditsionnymi istochnikami elektroenergii. *Electricity*, 2002, **3**, 20-28.

4. **Gu Yi., Hang L., Chen H., Lu Z.** A simple structure of LLC resonant DC-DC converter for multi-output applications. *Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 2005, **3**, 1485-1490, doi: 10.1109/APEC.2005.1453229.

5. **Abdel-Rahman S.** Resonant LLC converter: Operation and Design 250W 33Vin 400Vout Design Example. Infineon Technologies Application Note AN 2012-09 V1.0, 2012.

6. **Freeman D.** Introduction to photovoltaic systems maximum power point tracking. Texas Instruments Application Report SLVA446, 2010.

Поступила (received) 08.05.2017

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Зайцев Роман Валентинович (Zaitsev Roman Valentnovich)** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», в.о. завідувача кафедрою фізичного матеріалознавства для електроніки та геліоенергетики; м. Харків, Україна; e-mail: zaitsev.poman@gmail.com.

**Кіриченко Михайло Валерійович (Kirichenko Michailo Valerivich)** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», с.н.с. кафедри фізичного матеріалознавства для електроніки та геліоенергетики; м. Харків, Україна; e-mail: kirichenko.mv@gmail.com.

**Прокопенко Дмитро Сергійович (Prokopenko Dmitro Sergiyovich)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент кафедри фізичного матеріалознавства для електроніки та геліоенергетики; м. Харків, Україна; e-mail: prokopenko25ds@gmail.com.

Укладач: С. О. Федорчук, аспірант.

**Л.В. ЗАЙЦЕВА****ЕМКОСТНЫЕ ДАТЧИКИ ДЛЯ ДЛИННОВОЛНОВОГО АКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ**

Рассматриваются с общих позиций состояние, перспективы и возможности применения емкостного метода неразрушающего контроля. Разработана математическая модель процесса возбуждения акустических волн (продольной и поверхностной) с помощью конденсатора, позволяющая проводить расчет выходного сигнала, для последующего выбора методов и средств приема данных акустических колебаний. Разработан макет устройства для реализации емкостного метода. Установлена возможность возбуждения и приема акустических колебаний емкостными преобразователями.

**Ключевые слова:** преобразователь, акустический контроль, длинноволновое излучение, волна.

**Л.В. ЗАЙЦЕВА****ЄМНІСНІ ДАТЧИКИ ДЛЯ ДОВГОХВИЛЬОВОГО АКУСТИЧНОГО КОНТРОЛЮ**

Розглядаються з загальних позицій стан, перспективи і можливості застосування ємнісного методу неруйнівного контролю. Розроблено математичну модель процесу збудження акустичних хвиль (подовжньої і поверхневої) за допомогою конденсатора, що дозволяє проводити розрахунок вихідного сигналу, для подальшого вибору методів і засобів прийому даних акустичних коливань. Розроблено макет пристрою для реалізації ємнісного методу. Встановлено можливість порушення і прийому акустичних коливань ємнісними перетворювачами.

**Ключові слова:** гібридний фотоенергетичний модуль, підвищуючий перетворювач, фотоелектрична станція, коефіцієнт корисної дії.

**L. V. ZAITSEVA****CAPACITIVE SENSORS FOR THE LONG-WAVE ACOUSTIC CONTROL**

Consider from the common position present-day state, prospects and the possibility of non-destructive testing capacitive method using. Developed mathematical model of the process of acoustic wave's excitation (longitudinal and surface) with a capacitor allow carrying out the output signal calculation for the subsequent choice of methods and devices for receiving the acoustic oscillations data. A device layout has been developed for realization of capacitive method. The possibility of excitation and reception of acoustic vibrations by capacitive transducers it has been established. As a result of the theoretical calculation of the propagation of acoustic waves, it is established that it is possible to receive such waves with a sufficiently high level of the electric signal in the low-frequency range of frequencies. In order to increase the level of the output signal of the capacitive converter, the geometrical parameters of the receiving and exciting capacitive converter are investigated.

**Keywords:** transducer, acoustic control, the long-wave radiation wave.

**Введение.** Одно из доминирующих положений в неразрушающем контроле (НК) занимает акустический метод, поскольку он имеет хорошо развитую теоретическую и экспериментальную базу. Классический метод возбуждения и приема акустических волн с помощью пьезоэлектрического преобразователя имеет ряд недостатков. Заполнить эту нишу возможно с помощью бесконтактных методов контроля с использованием электромагнитно-акустических [1–3] и емкостных преобразователей (ЕП). ЕП имеют ряд преимуществ (бесконтактность, широкий частотный диапазон, простота изготовления). Ранее упоминалось [4], что данный преобразователь обладает низкой чувствительностью 100 В/мкм. Однако в работах [5, 6] было экспериментально доказано, что он имеет достаточную чувствительность для практического использования в НК. Благодаря широкому рабочему частотному диапазону, одной из областей, где можно применить ЕП, является исследование протяженных участков трубопроводов с использованием длинноволнового низкочастотного излучения направленными волнами. Данная область является новой и малоизученной, о чем говорят первые стандарты по длинноволновому излучению (Италия – UNI/TS 11317 – 2009 г., Япония – JIS – NDIS 2427 – 2010 г., США – ASTM E2775 – 2011 г.). Сейчас это один из наиболее быстро развивающихся методов по исследованию качества трубопроводов. Длинноволновой метод (ДМ) позволяет проводить сплошной контроль труб на большие расстояния, без снятия изоляции. ДМ значительно ускоряет

проведение контроля, поскольку нет необходимости сканировать весь трубопровод, достаточно иметь доступ к небольшому участку трубы.

Метод длинноволнового излучения использует частоты и волны порядка 100 кГц, известные как нормальные или волны Лэмба. Нормальные волны распространяются только в объектах с толщиной, которую можно сравнить с длиной волны. Более подробно процесс распространения волн рассмотрен в [7]. В данной статье рассматриваются лишь продольные нормальные волны. В случае трубы направление распространения волны известно. Она работает как волновод, импульсы распространяются на очень длинные расстояния (до 100 м). Коэффициент затухания, его частотная зависимость и коэффициент отражения от поверхности рассмотрены в [8]. Для труб существует дополнительное осложнение: режим распространения волны зависит от диаметра трубы и толщины стенки. На практике используют приборы, которые используют программное обеспечение для расчёта скорости в зависимости от частоты колебаний, диаметра трубы и толщины стенки. Поскольку скорость распространения волн изменяется в зависимости от толщины стенки, то соответственно волны чувствительны к коррозии, где бы она не находилась снаружи или внутри, к трещинам, при условии, что они составляют значительную область перпендикулярную оси трубы. Разными исследовательскими группами проводится систематическая работа по улучшению методик и программ по оценке размеров дефектов. Несмотря на



это, технология направленных волн все еще далека от точных оценок толщины стенки трубы и в основном используется для точного определения дефектных участков трубы.

**Цель работы.** Целью данной работы является разработка модели и решение задачи возбуждения акустических волн в упругой среде с помощью емкостного преобразователя, а также исследование возможности использования ЕП для длинноволнового излучения направленными волнами.

Изложение основного материала.

#### 1 Распределение продольной волны

Сила между обкладками конденсатора создается путем подачи на него поляризующего напряжения и определяется соотношением:

$$F = \frac{dW_c}{dz} \quad (1)$$

где  $W_c$  – энергия конденсатора,

$z$  – переменная интегрирования, характеризующая расстояние между обкладками.

Выражение для энергии плоского конденсатора имеет простой вид:

$$W_c = \frac{cU_{\approx}^2}{2} = \frac{\varepsilon_0 S U_{\approx}^2}{2d} \quad (2)$$

где  $U_{\approx}$  – переменное напряжение, подаваемое на обкладки конденсатора,

$\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды,

$\varepsilon_0$  – диэлектрическая постоянная,

$S$  – площадь обкладки,

$d$  – расстояние между обкладками.

Приняв во внимание, что напряжение на обкладках конденсатора изменяется по закону  $U_{\approx} = U_0 \sin \omega t$ , где  $U_0$  – максимальное значение переменного напряжения, и сила  $F$  действует строго перпендикулярно к площади электрода, запишем выражение для зондирующего давления  $P_0$  на поверхность объекта контроля (ОК), которое создается электростатической силой  $F$ . Проинтегрировав выражение (1) с учетом формулы (2), получим:

$$P_0 = \frac{\varepsilon_0 U_0^2 \sin^2 \omega t}{2d^2} \quad (3)$$

Поскольку  $\sin^2 \omega t = \frac{1}{2}(1 - \cos 2\omega t)$ , то

выражение (3) примет вид:

$$P_0 = \frac{\varepsilon_0}{4d^2} (U_0^2 - U_0^2 \cos 2\omega t) \quad (4)$$

Как видно из выражения (4) при подаче на конденсатор переменного напряжения с частотой  $\omega$  амплитуда давления  $P_0$  изменяется во времени с удвоенной частотой  $2\omega$ . Для устранения данной особенности применяется поляризация конденсатора путем подачи на его обкладки постоянного напряжения  $U$ .

В таком случае, выражение для давления  $P_0$  примет вид:

$$P_0 = \frac{\varepsilon_0}{4d^2} (U_0 \sin \omega t + U_{\approx})^2 = \quad (5)$$

$$\frac{\varepsilon_0}{4d^2} (2U_0 U_{\approx} \sin \omega t - U_0^2 \sin^2 2\omega t) + \frac{\varepsilon_0}{4d^2} (U_0^2 + U_{\approx}^2)$$

Характерной особенностью полученных выражений является то, что амплитуда возбуждающего давления  $P_0$  по сути не зависит ни от формы, ни от площади электрода. Увеличение амплитуды давления, а, следовательно, и амплитуды акустических колебаний, можно осуществить путем увеличения амплитуды переменного и поляризующего напряжений, подбора соответствующего материала с высокой диэлектрической проницаемостью в качестве прослойки между электродом и поверхностью ОК, или уменьшения расстояния  $h$  между обкладками конденсатора.

Емкостные преобразователи с диэлектрической прослойкой (ДП) возбуждают продольную волну в ОК, создаваемую генераторами поляризующих (ГПИ) и возбуждающих импульсов (ГВИ) (рис. 1).

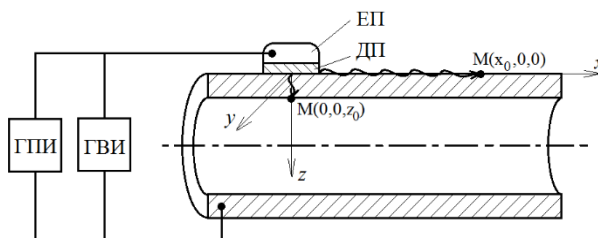


Рис. 1 – Распространение продольной волны вдоль оси  $z$  и поверхностной волны вдоль оси  $x$ :  $M(x_0, 0, 0)$  – точка наблюдения с координатами  $(x_0, 0, 0)$ ;  $M(0, 0, z_0)$  – точка наблюдения с координатами  $(0, 0, z_0)$ .

Рассмотрим сдвиг материальных точек ОК вдоль оси  $z$ , вызванный переменным давлением  $P_0$ . Расположим точку контроля с координатами  $M_I(0, 0, z_0)$  на обратной поверхности ОК (рис. 1).

Используем базовую формулу, которая позволяет рассчитать величину смещения акустической волны для произвольной точки контроля, которая принадлежит ОК:

$$U_z(M_I) = -\frac{1}{4\pi K_0} \iiint_{z \geq z_0} \frac{P(x, y, z, t)}{\left(\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2}\right)^3} dx dy dz \quad (6)$$

где  $P(x, y, z, t)$  – пространственно-временное распределение давления на поверхности образца;

$x, y, z$  – текущие координаты выбранной точки;

$x_0, y_0, z_0$  – координаты точки  $M_I$ ;

$K_0$  – коэффициент, который характеризует материал образца и выражается через известные параметры, которые определяют свойства материала:

$$K_0 = \left(2 + \frac{2\mu}{1-2\mu}\right) G; \quad (7)$$

где  $G$  – модуль сдвига;

$\mu$  – коэффициент Пуассона.

Для точки наблюдения с координатами  $M_I(0, 0, z_0)$ , выражение для смещения примет вид:

$$U_z(0,0,z_0,t) = -\frac{1}{4\pi K_0} \iiint_{z_0} \frac{(z-z_0) \cdot P(x,y,z,t)}{\left(\sqrt{x^2+y^2+(z-z_0)^2}\right)^{3/2}} dx dy dz \quad (8)$$

Решением этого уравнения для точки  $M_1(0,0,z_0)$  является функция:

$$U_z(0,0,z_0,t) = -\frac{P_0}{8\pi K_0 z_0} \left[ \frac{7}{3} \cos(k \cdot z_0) - \frac{13}{3} \frac{\sin(k \cdot z_0)}{(k \cdot z_0)} + 2 \cdot \frac{1 - \cos(k \cdot z_0)}{(k \cdot z_0)} - \frac{8}{3} \frac{1}{(k \cdot z_0)^2} \left( \cos(k \cdot z_0) - \frac{\sin(k \cdot z_0)}{(k \cdot z_0)} \right) \right] \cdot S \quad (9)$$

где  $P_0$  – давление на поверхность ОК;

$z_0$  – координата точки по оси  $z$ ;

$S$  – площадь преобразователя;

$k$  – волновое число  $k = \omega/a$ ;

где  $a$  – фазовая скорость волны;

$\omega$  – круговая частота  $\omega = 2\pi f$ ;

$f$  – частота.

Как видно из этого соотношения, амплитуда смещения не зависит от формы возбуждающего электрода.

## 2. Распределение поверхностной волны

При исследовании поверхностных колебаний нас интересует точка  $M_2$  с координатой  $z_0=0$  (рис. 1). Более того, мы предполагаем, что координата  $y_0=0$ , то есть, мы считаем, что акустическая волна распространяется от края электрода вдоль координаты  $x$ .

Тогда выражение для смещения точек поверхности вдоль оси  $z$  примет вид:

$$U_z(x_0,0,0,t) = \frac{1}{4\pi K_0} \iiint_{R^2} \frac{z \cdot P(x,y,z,t)}{\left(\sqrt{(x-x_0)^2+y^2+z^2}\right)^3} dx dy dz$$

(10)

Для точки наблюдения с координатами  $M_2(x_0,0,0)$ , выражение для смещения в цилиндрической системе координат приобретает вид:

$$U_z(M_2) = -\frac{P_0 \sin \omega t}{4\pi K_0} \int_0^r \int_0^{2\pi} \left( \frac{\sin\left(\frac{\omega}{c} R \sqrt{1 - \frac{2x_0}{r} \cos^2 \phi}\right)}{\frac{\omega}{c} r \sqrt{1 - \frac{2x_0}{r} \cos^2 \phi}} - \frac{1 - \cos\left(\frac{\omega}{c} r \sqrt{1 - \frac{2x_0}{r} \cos^2 \phi}\right)}{\frac{\omega}{c} r \sqrt{1 - \frac{2x_0}{r} \cos^2 \phi}} \right) d\phi dr \quad (11)$$

где  $R$  – радиус датчика;

$c$  – скорость распространения звука в ОК;

$r$  – радиус емкостного преобразователя;

$\phi$  – сферическая координата.

Как видно из этого соотношения, подынтегральная функция зависит от формы и размера электрода.

## 3. Макет для проведения контроля емкостным преобразователем

При реализации возбуждения и приема акустических колебаний емкостным

преобразователем, к возбуждающей и приемной аппаратуре необходимо предъявлять достаточно жесткие и одновременно противоречивые требования [12]. Для обеспечения возбуждения акустической волны в объекте контроля с помощью возбуждающего емкостного преобразователя (ВЕП) необходимо использовать высокочастотный генератор синусоидальных колебаний с амплитудой выходного сигнала более 500 В. Приемный емкостной преобразователь (ПЕП) и предварительный усилитель (У), обеспечивающий процесс преобразования акустического сигнала в электрические импульсы, необходимо синхронизировать (устройство синхронизации УС) с возбуждающим генератором в широком диапазоне периода следования электрических импульсов генератора. При приеме на ЕП необходимо подавать постоянное напряжение не менее 100 В. Данное условие требует создания специального высокостабильного по амплитуде генератора разнополярных поляризующих импульсов с варьируемой скважностью. В работе разработан макет, который позволяет реализовать предложенный способ неразрушающего контроля (рис. 2).

На возбуждающий емкостной преобразователь, состоящий из обкладки конденсатора и объекта контроля, который представляет собой вторую обкладку конденсатора, подается поляризующее напряжение порядка 500 В с генератора поляризующих импульсов. Также на пластину конденсатора с генератора возбуждающих импульсов дается пакет синусоидальных импульсов с амплитудой около 500 В.

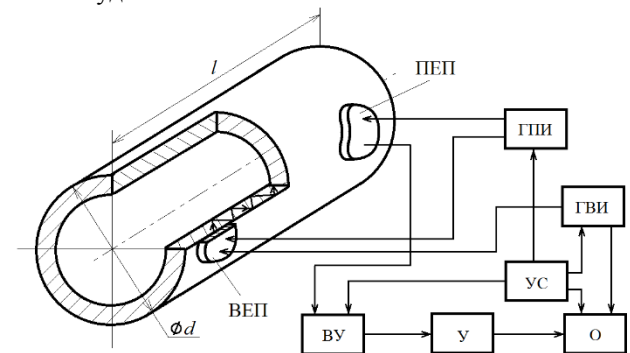


Рис. 2 – Макет прибора для акустического контроля емкостным способом: ВУ – входное устройство; О – осциллограф;  $d$  – диаметр трубы;  $l$  – длина трубы.

**Обсуждение результатов.** Емкостной преобразователь создает сплошной фронт волны, который обеспечивает возможность проведения контроля трубы по всему объему. Для проведения контроля необходим доступ к небольшому участку трубы, на который устанавливаются ЕП (рис. 2). В эксперименте использовалась труба  $d = 50$  мм,  $l = 500$  мм, датчик в виде пластины радиуса  $r = R = 75$  мм. Параметры датчика и среды: толщина диэлектрической прослойки  $h = 0.1$  мм, ее диэлектрическая проницаемость  $\epsilon = 40$  (промасленная бумага), ОК – сталь,  $\rho = 7.8$  кг/м<sup>3</sup>,  $c = 5 \cdot 10^3$  м/с,

напряжения, подаваемые на обкладки конденсатора  $U_+ = 500 \text{ В}$ ,  $U_- = 500 \text{ В}$ .

При приеме акустических сигналов с помощью ПЕП, его емкость  $C_0$  будет изменяться из-за модуляции воздушного зазора между обкладками конденсатора под действием акустической волны. Таким образом, в режиме приема акустических колебаний получим:

$$\Delta C = \frac{\varepsilon_0 S}{h \pm \Delta h}, \quad (12)$$

где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды;

$\varepsilon_0$  – диэлектрическая постоянная;

$h$  – начальное расстояние между обкладками конденсатора;

$\Delta h$  – прирост расстояния между обкладками конденсатора в результате поверхностных колебаний ОК и колебаний электрода.

При этом амплитуда выходного сигнала ПЕП определяется по формуле:

$$U_{\text{вых}} = \frac{U_z \cdot U_{\approx}}{h}, \quad (13)$$

где  $U_z$  – амплитуда смещения материальных точек поверхности.

Как видно из формулы, выходное напряжение не зависит от площади электрода и диэлектрических свойств изолирующего слоя. При этом, величина  $h$  может быть значительно уменьшена за счет выбора диэлектрического слоя с высокой диэлектрической проницаемостью. Например, в качестве электрода может быть использована алюминиевая пластина, покрытая пленкой оксида  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , которая имеет хорошие диэлектрические свойства и высокую механическую прочность.

На рис. 3 приведены временные диаграммы работы устройства акустического контроля с ЕП.

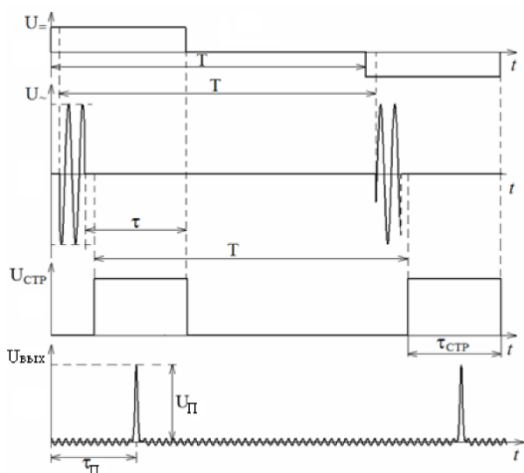


Рис. 3 – Временные диаграммы работы устройства для акустического контроля емкостным способом

На диаграмме изображены поляризующие импульсы ( $U_+$ ) и пакетные импульсы ( $U_-$ ). Здесь  $T$  – период зондирования ОК,  $\tau$  – время, на протяжении которого принимаются акустические импульсы из

ОК. Работой ГВИ и ГПИ управляет устройство синхронизации. При подаче зондирующего импульса на пластине приемного емкостного преобразователя за счет прямой передачи электрического сигнала наводится сигнал, который может привести к повреждению приемного канала установки.

Для исключения этого во входном устройстве ВУ происходит запираение входной цепи на время прохождения зондирующего импульса под влиянием управления УС. В системе ВЕП – ОК – ПЕП происходит преобразование электрического сигнала в акустическую волну, прохождение ее по ОК и вторичное преобразование акустической волны в электрический сигнал. Сигнал после такого преобразования приходит позже сигнала наведенного зондирующими импульсами, что позволяет разделить их по времени. Для этого УС формирует стробирующий импульс с длительностью  $\tau_{СТР}$  (рис. 3), который отпирает во входном устройстве приемный канал. Сигнал с ЕП поступает на предварительный усилитель У. Выходной сигнал после предварительного усиления поступает на осциллограф О. При использовании двухканального осциллографа на второй канал можно подавать сигнал с генератора возбуждающих импульсов. На рис. 3 изображен принятый сигнал ( $U_{\text{вых}}$ ), прошедший через ОК, где  $\tau_{П}$  – время прохождения акустической волны через ОК,  $U_{П}$  – амплитуда принятого сигнала.

В случае возбуждения и приема акустических волн целесообразно использовать низкочастотный диапазон. На рис. 4 представлен график зависимости выходного сигнала от расстояния между преобразователями для частоты 100 кГц для частоты 100 кГц и  $d_l = 75 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .

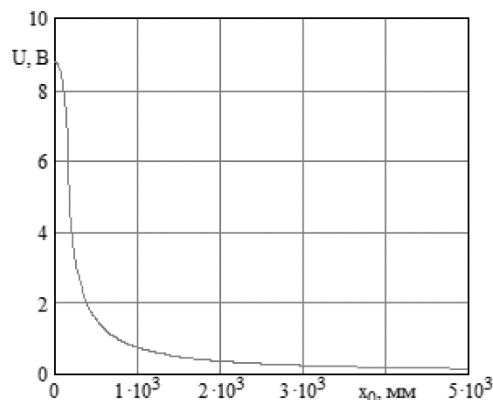


Рис. 4 – График зависимости выходного сигнала от расстояния между преобразователями для частоты 100 кГц

На расстоянии 5 м уровень акустического сигнала на уровне 100 мВ, что позволяет использовать этот тип преобразователя для неразрушающего контроля объектов с использованием длинноволнового излучения направленными волнами.

В таблице приведены расчетные  $U_p$  и полученные экспериментальным путем  $U_{\approx}$  данные

уровня выходного сигнала в зависимости от расстояния между ПЕП и ВЕП.

Таблица 1 – Расчетные  $U_p$  и полученные экспериментальным путем  $U_\Sigma$  данные уровня выходного сигнала в зависимости от расстояния между ПЕП и ВЕП

$h$ , мм	$U_p$ , В	$U_\Sigma$ , В
$1 \cdot 10^3$	0,70	0,80
$2 \cdot 10^3$	0,35	0,40
$3 \cdot 10^3$	0,20	0,23
$4 \cdot 10^3$	0,17	0,20
$5 \cdot 10^3$	0,10	0,12

Расхождение в данных составляет порядка 20%, что свидетельствует о правильности выбора методики расчета и аппаратуры для проведения электрического метода неразрушающего контроля.

**Выводы.** В результате теоретического расчета распространения акустических волн установлено, что имеется возможность приема таких волн с достаточно высоким уровнем электрического сигнала в низкочастотном диапазоне частот. В целях повышения уровня выходного сигнала емкостного преобразователя исследованы геометрические параметры приемного и возбуждающего емкостного преобразователя.

#### Список літератури

1. Сучков, Г.М. О главном преимуществе ЭМА способа / Г.М. Сучков // *Дефектоскопия*. – 2000. – № 10. – Р. 67-70.
2. Себко, В.П. Новый способ обнаружения дефектов металлов с помощью электромагнитно – акустических преобразователей / В.П. Себко, Г.М. Сучков, Б.М. Горкунов // *Электроэнергетика и преобразовательная техника*. – 2003. – № 1. – Р. 54-58.
3. Сучков, Г.М. Исследование особенностей распространения упругих волн, возбуждаемых ЭМА способом / Г.М. Сучков // *Контроль. Диагностика*. – 2003. – № 12. – С. 26-39.
4. Ермолов, И.Н. Неразрушающий контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге // *Справочник: В 7 т. Том 3: Ультразвуковой контроль* - М.: Машиностроение, 2004. - 864 с.
5. Дробот, Ю.Б. Возбуждение коротких упругих импульсов емкостным методом / Ю.Б. Дробот, А.И. Кондратьев, В.А. Луговой // *Дефектоскопия*. – 1983. – № 3. – С. 36–41.

6. Сучков, Г.М. Возбуждение ультразвуковых импульсов емкостным способом / Г.М. Сучков, Л.В. Глебова // *Вестник НТУ “ХПИ”*: Тематический выпуск “Приборы и методы контроля и определения состава вещества”. – 2010. – №12. – С. 192-195.

7. Кузнецов, С.В. Волны Лэмба в анизотропных пластинах (обзор) / С.В. Кузнецов // *Акустический журнал*. – 2014. – Т.60. – №1. – С. 90-100.

8. Мансфельд, А.Д. О возможности измерения коэффициента затухания ультразвука в слоистых средах при одностороннем доступе к объекту / А.Д. Мансфельд, А.М. Рейман // *Акустический журнал*. – 2011. – Т.57. – №2. – С. 211-218.

#### References (transliterated)

1. Suchkov G.M. O glavnom preimushestve EMA sposoba [The main advantage of EMA method]. *Defektoskopia [Defectoscopy]*, 2000, 10, 67-70.
2. Sebko V.P., Suchkov G.M., Gorkunov B.M. Noviy sposob obnaruzhenia defektov metallov s pomoshyu electro-akusticheskikh preobrazovateley [A new way to detect metal defects with the help of electromagnetic-acoustic transducers]. *Electroenergetika i preobrazovatel'naya tekhnika [Power engineering and conversion technology]*, 2003, 1, 54-58.
3. Suchkov G.M. Issledovanie osobennostey rasprostraneniya uprugih voln, vzbuzhdaemykh EMA sposobom [Investigation of the propagation of elastic waves excited by the EMA method]. *Kontrol. Diagnostika [Control. Diagnostics.]*, 2003, 12, 36-39.
4. Ermolov I.N. Nerazrushayushiy kontrol [Unbrakable control]. *Spravochnik. T. 3: Ultrazvukovoy kontrol [Ultrasonic control]*, Moscow: Mashynostroenie, 2003, 864 p.
5. Drobot U.B., Kondratyev A.I., Lugovoy V.A. Vzbuzhdenie korotkikh uprugih impulsov emkostnym metodom [Excitation of short elastic pulses by the capacitive method], *Defektoskopia [Defectoscopy]*, 1983, 3, 36-41.
6. Suchkov G.M., Glebova L.V. Vzbuzhdeniye ul'trazvukovykh impuls'ov yemkostnym sposobom [Excitation of ultrasonic pulses by capacitive method], *Vestnik NTU “KhPI”: Tematicheskii vypusk “Pribory i metody kontrolya i opredeleniya sostava veshchestva” [Bulletin of NTU “KhPI”: Thematic issue “Devices and methods for monitoring and determining the composition of matter”]*, 2010, 12, 192-195.
7. Kuznecov S.V. Volny Lemba v anizotropnykh plastinakh (obzor) [Lamb waves in anisotropic plates (review)], *Akusticheskii zhurnal [Acoustic Journal]*, 2014, 60(1), 90-100.
8. Mansfeld A.D., Reyman A.M. O vozmozhnosti izmereniya koeffitsiyenta zatukhaniya ul'trazvuka v sloistykh sredakh pri odnostoronnnem dostupe k ob'yektu [On the possibility of measuring the attenuation coefficient of ultrasound in layered media with one-sided access to the object], *Akusticheskii zhurnal [Acoustic Journal]*, 2011, 57(2), 211-218.

Поступила (received) 16.05.14

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Зайцева Лілія Василівна (Зайцева Лилия Васильевна, Zaitseva Lilia Vasilivna)** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський авіаційний інститут» ім. М.Е. Жуковського, старший викладач кафедри фізики; м. Харків, Україна; e-mail: [zaitseva.lilia@gmail.com](mailto:zaitseva.lilia@gmail.com).

Укладач: С. О. Федорчук, аспірант.

**А. В. ІВАХНОВ, О. П. ЛАЗУРЕНКО, С. О. ФЕДОРЧУК**

### **СИСТЕМИ АКУМУЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ, АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ ТА ЇХ ПОЄДНАННЯ ДЛЯ ЗАСТОСУВАННЯ В ЕНЕРГОСИСТЕМІ**

Проведено літературний огляд існуючих систем акумуляції електроенергії, визначені їх позитивні та негативні сторони, практичне застосування. Проаналізовані варіанти гібридних систем акумуляції. Зроблено висновок про доцільність подальшого розвитку гібридних систем накопичення електроенергії

**Ключові слова:** гідроакумуляційна електростанція, пневмоакумулятор, супермаховик, системний накопичувач електроенергії, паливна комірка, проточний редокс-акумулятор, суперконденсатор, індуктивний надпровідниковий накопичувач.

**А. В. ИВАХНОВ, О. П. ЛАЗУРЕНКО, С. О. ФЕДОРЧУК**

### **СИСТЕМЫ АККУМУЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ, АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ И ИХ СОЧЕТАНИЙ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ**

Проведен литературный обзор существующих систем аккумуляции электроэнергии, определены их положительные и отрицательные стороны, практическое применение. Проанализированы варианты гибридных систем аккумуляции. Сделано вывод о дальнейшей целесообразности дальнейшего развития гибридных систем накопления электроэнергии.

**Ключевые слова:** гидроаккумуляционная электростанция, пневмоаккумулятор, супермаховик, сетевой накопитель электроэнергии, топливная ячейка, проточный редокс-акумулятор, суперконденсатор, индуктивный сверхпроводящий накопитель.

**A. V. IVAKHNOV, O. P. LAZURENKO, S. O. FEDORCHUK**

### **POWER STORAGE SYSTEMS, OPPORTUNITIES ANALYSIS AND THEIR COMBINATIONS FOR USE IN THE POWER SYSTEM**

A literature review of existing electric power storage systems, their positive and negative sides, practical application was made. The variants of hybrid storage systems are analyzed. A conclusion is made about the further expediency of the hybrid systems development for the accumulation of electric power.

**Keywords:** pumped hydro storage, compressed air energy storage, flywheel, battery, fuel cell, flow battery, supercapacitor, superconducting inductive energystorage.

**Вступ.** Широкий розвиток відновлювальної генерації та її залежність від параметрів навколишнього середовища, а також недостатня кількість резервів регулюючих потужностей в деяких регіонах вимагає впровадження систем акумуляції електроенергії. Відповідно цій проблемі в Україні, був присвячений, окремий блок на Українському енергетичному форумі (від 28-29го вересня) 2017 в м. Одеса, під лозунгом: «Сучасні електро-акумуляційні системи – один зі шляхів негайного рішення існуючої проблеми відсутності достатніх потужностей для надання додаткових послуг в ОЕС України» [1]. Додатковими послугами є системи акумуляції електроенергії що приймають участь у балансуванні електроенергії.

**Традиційна система** «Традиційною» системою участі у балансуванні електроенергії та її акумуляції є, відповідно, ГЕС та ГАЕС. До

позитивної сторони в цій технології можна віднести її повну екологічну безпеку для людини, а також високу швидкість маневрування потужністю в порівнянні до такої спроможності теплових та атомних станцій, як показано в табл.1. Негативною їх стороною є складність вибору будівельного майданчика, затоплення великої площі родючих земель, і спірний момент відносно великої маневреності – вона не достатня для регулювання миттєвих стрибків потужності в енергосистемі, окремо для ГАЕС, недоліком також є тривалий час переходу від режиму генератора в насосний і навпаки.

Взагалі, в балансуванні потужності в енергосистемі може брати участь також будь-яка електростанція. Існує багато обмежень щодо їх участі через особливості кожної. Дані щодо регулюючих потужностей та участі у балансуванні деяких електростанцій наведено в табл.1:

Таблиця 1 – Характеристика регулюючих можливостей різних типів електростанцій [2]

Тип електростанції	Технічний мінімум навантаження, в % (відношення мінімально допустимої потужності відносно номінальної)	Регулювальний діапазон, в %	Час набору повної потужності, хв.	
			Після зупинки	З гарячого стану
АЕС	85-90	10-15	390-660	60
Потужні ТЕС	70-80	20-30	90-180	20-50
ГТУ	0	100	15-30	0,5
ГЕС	0	100	1-2	0,25-0,5*
ГАЕС	0	200	1-2	0,25-0,5*

\*При обертанні в режимі холостих обертів

**Види систем накопичення** На сучасному етапі існує велика кількість систем акумуляції,

основними з яких, за принципом роботи та тривалістю зберігання, є:

- 1) Механічні накопичувачі
  - Гідроакумуляючі електростанції (ГАЕС, PHS, довгострокове зберігання [3]);
  - Пневмоакумулятори (CAES, довгострокове зберігання [3]);
  - Супермаховики (Fly wheels, короткострокове зберігання [3]).
- 2) Електрохімічні накопичувачі
  - Акумуляторні батареї або системні накопичувачі електроенергії (СНЕ, довгострокове зберігання [3]);
  - Паливні комірки (fuel cells, довгострокове зберігання [3]);
  - Проточні редокс-акумулятори (ПРА, Flow battery, довгострокове зберігання [3]);
  - Суперконденсатори (super capacitors, короткострокове зберігання [3]).
- 3) Електромагнітні накопичувачі
  - Індуктивні надпровідникові накопичувачі (SIES, довгострокове [3]).

Кожен з цих видів має свої особливості. На рис. 1 показано, як ці системи співвідносяться між собою за тривалістю розряду та потужністю, згідно даних компанії Siemens.

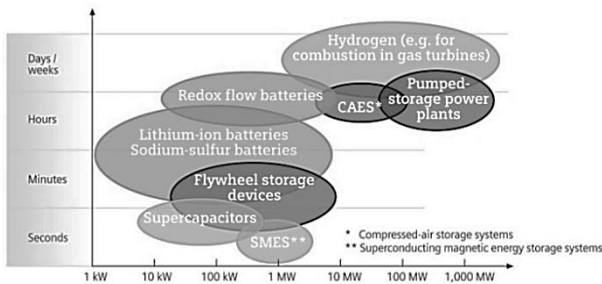


Рис. 1 – Системи накопичення електроенергії за тривалістю енергопостачання та потужності [4]

**Системні накопичувачі електроенергії.** В своєму простому вигляді це звичні для усіх видів споживачів акумулятори, що живлять мобільні телефони, ноутбуки та всі інші типи портативних електронних пристроїв. У відношенні до електроенергетики - це є системи накопичення електроенергії СНЕ великої ємності. Існує багато типів акумуляторних батарей, які відрізняються за електролітом – Li-ion, Na/NiCl, Ni-Cd, Ni-Fe, Ni-H<sub>2</sub>, Ni-MH, Ni-Zn, Pb, Ag-Zn, Ag-Cd, Zn-Br, Zn-Cl. Електроліт кожного з цих типів наділяє акумулятор певними характеристиками, що робить їх вигідними для застосування в певних сферах. Для електроенергетики найчастіше застосовуються: літій-іонні, свинцево-кислотні, нікель-кадмієві, цинк-бромні. Найновішим прикладом такої системи є, збудована восени 2017 року американською фірмою Tesla, в Австралії Large-Scale Powerpack, ємністю 129 МВт-год та потужністю 100 МВт [5]. Установка виконана на основі Li-ion технології, та буде забезпечувати достатнє безперебійне живлення для більш, ніж 30 тис. будинків. Заряд цієї системи запроєктовано від вітряної електростанції Hornsdale, що розташована поблизу міста Джеймстаун, в період

низьких навантажень на енергосистему електроенергії з вітропарку під-заряджатиме систему накопичення, а в часи піків споживання буде видавати потужність до системи. В контракті на будівництво було передбачено 100 днів на реалізацію проекту, компанія впоралася швидше запланованого терміну. Це вказує на те що перевагою накопичення електроенергії за допомогою хімічних пристроїв є:

- 1) Швидке встановлення;
- 2) Модульність конструкції – дає змогу розширювати ємність, проводити швидко заміну пошкоджених елементів, а також доставляти окремі попередньо заряджені модулі в регіони де сталася надзвичайна подія;
- 3) Час переходу між режимами заряд/розряд, залежить лише від часу перемикання комутуючих пристроїв, настільки малий що в розрахунках його допускається приймати за 0 сек.;
- 4) Частина зараз використовуваних акумуляторів є абсолютно безпечними для навколишнього середовища;
- 5) Відсутні рухомі частини;
- 6) Усі перемикання відбуваються в автоматичному режимі, що зменшує вплив людського фактору практично нанівець.

А. Недоліки:

- 1) Складна утилізація після закінчення терміну служби акумуляторних елементів;
- 2) Обмеженість циклів заряду/розряду;
- 3) Частина акумуляторів є токсичними, що сильно підвищує складність експлуатації

**Паливні комірки:** Це пристрої, що генерують електроенергію від хімічної реакції (за участю водню, з парового риформінгу метану, вугілля, окису вуглецю, спиртів, гідразину, інших органічних речовин, а в якості окиснювача – повітря, перекис водню, хлор, бром, азотна кислота та ін.) в спеціальній, для цієї технології, комірці (Fuel cells). У випадку водню це, так назване, «холодне горіння» водню. Технологія паливних комірок є дуже перспективною завдяки своїй автономності та можливості застосуванню в будь-яких сферах, від маленьких електронних пристроїв до великих систем накопичення електроенергії.

В. Примір встановлення – Південна Корея, місто Хвазонг, де встановлені паливні комірки потужністю 2,8 МВт кожна, на загальну потужність 59 МВт [6]. Переваги:

- 1) Не мають викидів, результат їх роботи – електроенергія, вода та тепло;
- 2) Довговічні;
- 3) Швидкий перезаряд;
- 4) Незначна залежність коефіцієнту корисної дії від коефіцієнту завантаження.

Недоліками даної технології є:

- 1) Залежність від температури навколишнього середовища;
- 2) Перезарядка відбувається шляхом зовнішнього завантаження;
- 3) Складність зберігання водню;

4) У випадку водню - низька питома енергія на одиницю об'єму, що вимагає його зберігання під дуже високим тиском;

5) В значній мірі - інертні, що в умовах пікових чи імпульсних навантажень потребують певного запасу потужності або застосування інших технічних рішень (СНЕ, ПРА чи суперконденсаторів)

**Проточні редокс-акумулятори.** В першому приближенні це акумулятор з рідким електролітом (Flow Battery). Принцип їх роботи заснований на взаємодії двох рідких «заряджених» електролітів, що прокачуються через спеціальну комірку за допомогою насосів. В комірці і відбувається продукування електричного струму. Кожен електроліт має свій бак, а в комірці при протіканні вони розділені мембраною-сепаратором, через яку проходять іони так як і в звичайному електрохімічному акумуляторі. Через те що, в випадку ПРА, ці електроліти грають роль позитивного та негативного електродів, то їх часто так і називають – «рідкі електроди». Примір встановлення – Сан Дієго (Каліфорнія), пілотна система зберігання на 2МВт/8МВт з застосуванням ванадію[7]. До переваг можна віднести:

1) Розділення речовини, що відповідає за зберігання енергії (електролітів), від пристрою в якому виробляється струм.

2) Завдяки першій перевазі, перезаряд може відбуватися не тільки звичайним підключенням до джерела струму, але й просто заміною спрацьованого електроліту на новий, така перезарядка займе лишень декілька хвилин, що є дуже зручним в випадку доставляння модулів системи акумуляування в місце надзвичайної ситуації, або якщо застосовувати такі системи в автомобілях;

3) Надійні та довговічні, кількість циклів заряду-розряду більше ніж 10 000;

4) Роздільне зберігання активних речовин та єдиний генеруючий модуль запобігає виникненню короткого замикання та перегрівання.

Недоліки:

1) Складна система в порівнянні зі звичайними акумуляторами;

2) Сильна залежність від температури навколишнього середовища;

3) Мала щільність зберігання енергії;

4) Складність виготовлення мембран необхідних для роботи;

5) Мають рухомі частини – насос.

**Суперконденсатори:** Відмінність від звичайного конденсатора тим, що має дуже велику ємність. Суперконденсатор зберігає енергію за допомогою статичного заряду. Існує три основних види: електростатичний з сухим сепаратором, електролітичний, суперконденсатор. Відрізняються ємністю і сферою застосування відповідно до виду. Приклад встановлення – в якості допоміжного в гібридній системі, як доповнення до електрохімічних акумуляторів. На сонячній станції компанії Duke Energy, США, потужністю 277 кВт[8]. Переваги:

1) Дуже швидка зарядка і розрядка;

2) Велика кількість циклів заряду/розряду (в годинах – понад 30 тис. год.);

3) Великий діапазон робочої температури;

4) Велика питома потужність до 10тис.Вт/кг

Недоліками даної технології є:

1) Невелика питома енергоємність 5 Вт·год/кг;

2) Короткочасний термін зберігання електроенергії;

3) Робота з високою напругою може знизити термін служби конденсатору;

4) Високий саморозряд;

5) Лінійний характер розряду не дозволяє використовувати всю накопичену енергію.

**Гідроакумуляючі електростанції.** ГАЕС є традиційними й давно відомими об'єктами для накопичення електроенергії. Принцип роботи, як і гідроелектростанцій, оснований на використанні перепаду рівнів води, з різницею в тому, що верхній б'єф це - великий басейн, а гідромашина працюють у двох режимах: під час генерування - як турбіна, що приводиться в рух водою накопиченою в басейні, а в період накопичення - як насос, що заповнює басейн. Прикладом є ГАЕС «Бас Каунті», що побудована в США, Вірджинія потужністю 3003 МВт. Перепад б'єфів 380 м. Запасає енергію для більш ніж 60 мільйонів людей в 13 штатах [9]. Тут перевагами є:

1) Екологічно чисті;

2) Невисокі затрати;

3) Тривалий строк служби, та можливість його подовження капітальним ремонтом;

4) Довготривале зберігання;

5) Можливість використовувати в якості басейну старі закриті шахти.

Недоліки проявляються в наступному:

1) Складність вибору місця для будівництва;

2) Довготривале спорудження нових потужностей;

3) Дуже інертні в порівнянні до нових видів акумуляування – довгий час переходу з турбінного в насосний режим. Хоча зміна потужності чи його зупинка потребують декількох секунд, та запуск в турбінному режимі з зупиненого положення з синхронізацією та набором потужності складає 1-2 хв., а при холостому ході 15-30 сек.;

4) Не реагують на імпульсні стрибки напруги;

5) Наявність великої кількості рухомих частин.

**Пневмоакумулятори.** Акумулятори що запасають енергію в вигляді стисненого повітря. В момент накопичення вмикається компресор, що стискає повітря в спеціальний резервуар під великим тиском. Коли необхідно повернути електроенергію до системи, то повітря з енергією високого тиску направляється до турбіни, що з'єднана з генератором. В першому приближенні за принципом роботи цей спосіб зберігання енергії можна порівняти з ГАЕС. Приклад встановлення – Хунторф, Німеччина, 290 МВт [10]. Тут перевагами є:

1) Довготривале зберігання потенційної енергії;

2) Швидкий перехід поміж режимами заряд/розряд, відбувається за декілька секунд;

3) Позичуються як пожежобезпечна технологія;

4) Енергоємність в 2-3 рази вище ніж у хімічних акумуляторів;

5) Екологічно чисті

Недоліки цієї технології такі:

1) Робота з високим тиском;

2) Наявність рухомих частин;

3) Виділення тепла під час стискання що погіршує коефіцієнт корисної дії.

**Супермаховики.** Один з видів маховика, що призначений для накопичення механічної енергії, на відміну від звичайних маховиків здатний накопичувати більше енергії завдяки застосуванню в конструкції магнітних підшипників та розташуванню обертОВОї частини маховика у вакуумі. Приклад встановлення – США, Стефентаун, компанія Weason збудувала 20 МВт систему накопичення на супермаховиках [11]. Переваги:

1) Довговічність, хоча кількість циклів заряд/розряд обмежена;

2) Не зважаючи на те, що конструкція передбачає обертОВІ частини, які рухаються з надзвичайно високою швидкістю, проте заходи безпеки роблять його безпечним при пошкодженні;

3) Коефіцієнт корисної дії досягає 98%;

4) Простіший та дешевший в виготовленні, ніж хімічний акумулятор;

5) Екологічно чисті;

6) Швидке накопичення енергії;

7) Здатні працювати в будь-якому температурному діапазоні.

Недоліки:

1) Наявність гіроскопічного ефекту обумовленого високим моментом імпульсу маховика, що обертається, та який перешкоджає зміні напрямку осі обертання маховика. Це ускладнює транспортування маховиків, що вже накопили енергію. Тому різницею стаціонарних та мобільних супермаховиків є наявність у мобільних карданового підвісу, який дає змогу транспортувати «заряджені» супермаховики, проте ускладнює та здорожує конструкцію;

2) Неможливість встановлювати в якості джерела живлення для автомобілів. Проте в цьому напрямку ведуться розробки суперваріатора, для плавного відбору енергії;

Таблиця 2 – Коротка інформація про сучасні технології зберігання та придатності впровадження в різних вузлах [13]

Технологія в фокусі дослідників	Традиційна генерація	Відновлювальна генерація	Відновлювальні міні-мережі	В вузлах передачі	В вузлах розподілення	В вузлах навантаження
ГАЕС	Придатно	Розвивається	Непридатно	Придатно	Розвивається	Непридатно
Пневмоакумулятори	Придатно	Розвивається	Непридатно	Придатно	Розвивається	Непридатно
Електрохімічні	Розвивається	Розвивається	Розвивається	Придатно	Придатно	Придатно
Хімічні	Розвивається	Розвивається	Розвивається	Розвивається	Непридатно	Розвивається
Електромагнітні	Непридатно	Розвивається	Розвивається	Придатно	Придатно	Непридатно
Теплова (маневрування джерелом енергії)	Придатно	Розвивається	Розвивається	Розвивається	Розвивається	Придатно

3) Швидкий розряд.

**Індуктивні надпровідникові накопичувачі.** Накопичують енергію в магнітному полі індукційної котушки, в якій струм циркулює без втрат. Примір встановлення – Японія, Чубу, потужністю 1 МВА [12]. Переваги:

1) Включення в роботу займає мілісекунди, що дає змогу реагувати на імпульсні зміни в енергосистемі;

2) Винятково екологічно чисті – не відбувається ніяких хімічних реакцій, не має ніяких відходів в процесі роботи, не використовуються шкідливі речовини;

3) Можливе довгострокове зберігання в формі магнітної енергії;

4) Важлива перевага з практичної точки зору є можливість живлення установки від джерела з малою електричною потужністю;

5) Можливість видачі в момент імпульсу великих значень струму (відповідно потужності), що обмежена лише пропускну здатністю комутуючих та провідникових пристроїв;

6) Можливість аварійного скидання енергії без використання баластних опорів.

Недоліки:

1) Необхідність дорогої та складної системи охолодження та термостатування для досягнення і підтримання надпровідного стану;

2) Необхідність компенсації великих електродинамічних зусиль в активній зоні;

3) Велика кількість обертОВИХ елементів;

4) Робота з низькими температурами.

**Можливість застосування.** Як видно вище, кожна з технологій має свої переваги та недоліки, через які технології можуть бути застосовані в тих чи інших вузлах, або навпаки не можуть. У табл. 2 наведено дані результатів дослідження американського департаменту енергетики (The US DOE) 2015 року, що показують можливість застосування різних технологій акумулювання в певних вузлах енергосистеми.



Ці дані представлені як ознайомчі, через те що базуються на типовому їх використанні, можуть відрізнятися в певних умовах.

### Гібридні системи накопичення енергії.

Гібридна СНЕ складається з двох або більше систем акумулявання, як показано на рис. 2. У випадку з двома системами: одна відповідає за покриття потужних довготривалих просідань та піків, а друга відповідно за компенсацію короткострокових відхилень та інших перехідних процесів системи. Логічним є що для цих систем різні вимоги, до першої це велика потужність та допустимість брати до уваги меншу кількість циклів заряду/розряду, а друга навпаки має витримувати велику кількість циклів заряду/розряду, швидкий час відклику та відповідно мати швидкодіючі комутуючі пристрої. Переваги гібридних систем [14]:

- 1) Менші інвестиції в будівництво, за рахунок розподілення енергії та потужності;
- 2) Збільшення ефективності системи, і як наслідок якість електричної енергії;
- 3) Збільшення терміну зберігання енергії та терміну роботи системи, за рахунок оптимізації роботи та зниження динамічного напруження.



Рис. 2 – Базова структура системи накопичення електроенергії [14]

Огляд літератури показує, що наразі створення саме гібридних систем є дуже перспективним, і такі системи показують відмінні результати в різних сферах застосування. В автономних micro-grid системах частіше використовується поєднання індуктивних напівпровідникових накопичувачів та літій-іонних батарей [15]. В такому сполученні акумулятори компенсують глибокі та довготривалі піки, так як мають обмежене число циклів заряду/розряду, але здатні тривалий час зберігати енергію, а індуктивні накопичувачі приймають на себе короточасні різкі піки завдяки необмеженому числу заряду/розряду та миттєвому відклику на зміни

в мережі. На рис.3 показано результати моделювання гібридної системи поєднання індукційного надпровідникового накопичувача та літій-іонних батарей при відпрацюванні випадкового навантаження. За таким самим принципом працює гібридна система «суперконденсатор/літій-іонний акумулятор» [16].

Схожі поєднання застосовуються в автомобільній техніці – «суперконденсатор/акумулятор» [17], а також «акумулятор/паливна комірка» [18] та домогосподарствах: один будинок [19], району споживачів, регіону побутових споживачів [20].

Для окремо розташованих відновлювальних джерел генерації [21], [22] також застосовуються комбінації «суперконденсатор/акумулятор». Модель та осцилограма роботи такої системи показана на рис. 4. Осцилограма моделі демонструє спроможність такої гібридної системи повністю реагувати на усі коливання в системі.

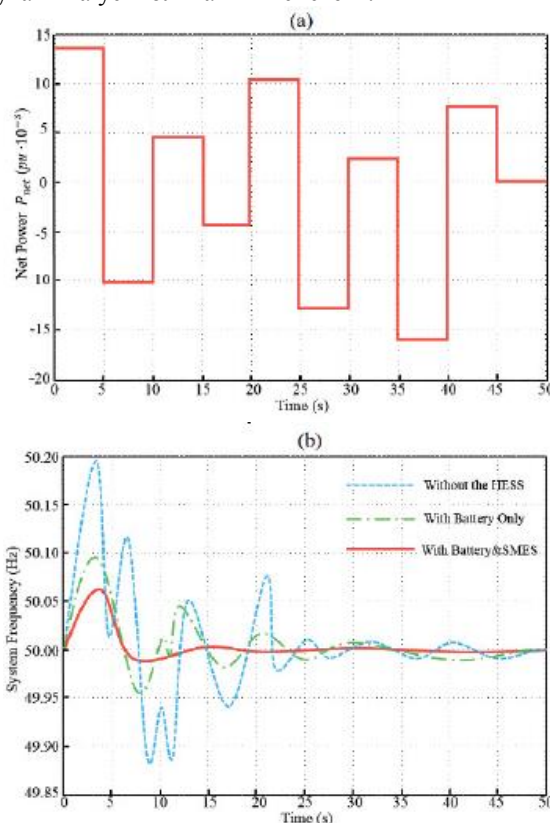


Рис. 3 – Ефект роботи гібридної системи на стабілізацію частоти в мережі [15]:

- а) випадкове навантаження;
- б) осцилограми частоти мережі.

Окрім розглянутих варіантів можуть компонуватися й інші, що взаємодоповнюють одна одну – виключаючи недоліки одне одного.

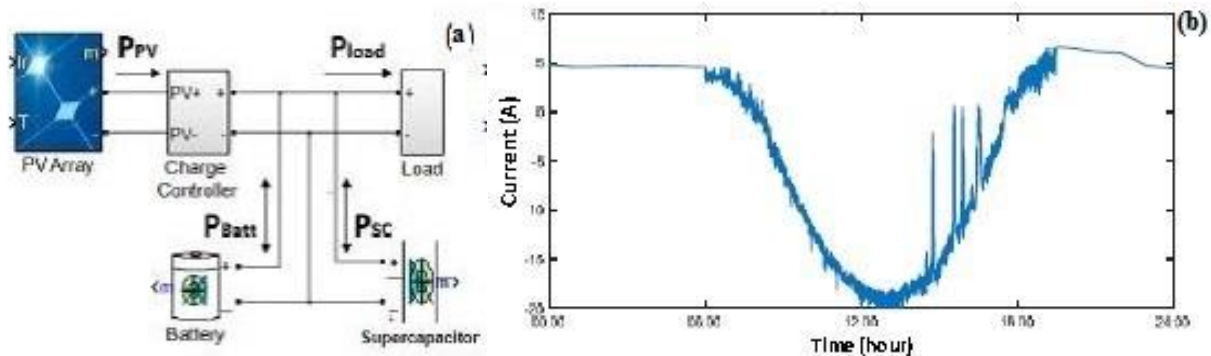


Рис. 1 – Модель та результати роботи гібридної системи суперконденсатор/акумуляторна батарея  
 а – модель; б –результат роботи

**Висновок.** Огляд літератури показує що гібридні накопичувачі є дуже перспективним напрямком що бурхливо розвивається, під впливом наростаючої кількості потужностей відновлювальної генерації що має залежність від багатьох факторів, а також для регіонів де зберігається традиційна генерація у великих масштабах що провокує проблему маневрених потужностей для підтримки балансу, та їх просто нестача.

Необхідна розробка математичної та комп'ютерної моделей, на основі яких досліджувати взаємну роботу різних типів накопичувачів енергії. Окрім цього, в рамках України, також видно що, є необхідність нової системи енергоринку, де будуть широко застосовуватися накопичувачі електроенергії, в тому числі й гібридні. Це вимагає нових методик розрахунку потужності балансування за допомогою накопичувачів для різних вузлів встановлення.

#### Список літератури

1. Вимоги сучасності - технічна необхідність та економічна доцільність модернізації ринку електричної енергії [Електронний ресурс] // *cigre*. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: [http://cigre.org.ua/files/2017.09.28\\_06.suchasni-elektro--akumulyuyuchi-sistemi---dlya-nadannya-dopomijnih-poslug--v-oes-ukrayini.pdf](http://cigre.org.ua/files/2017.09.28_06.suchasni-elektro--akumulyuyuchi-sistemi---dlya-nadannya-dopomijnih-poslug--v-oes-ukrayini.pdf).
2. Розвиток теплоенергетики та гідроенергетики [Електронний ресурс] / [Е. Т. Базеев, Б. Д. Билека, Е. П. Васильев та ін.] // *Енергетика: історія, теперішнє та майбутнє*. – 2012. – Режим доступу до ресурсу: <http://energetika.in.ua/ru/books/book-3>.
3. A. Andrijanovits, H. Hoimoja, D. Vinnikov. Comparative Review of Long-Term Energy Storage Technologies for Renewable Energy Systems // *Electronics and Electrical Engineering*. – Kaunas: Technologija, 2012. – No. 2(118). – P. 21–26.
4. Smart Grids and Energy Storage Bottled Sunlight [Електронний ресурс] // *Pictures of the Future*. – 2014. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.siemens.com/innovation/en/home/pictures-of-the-future/energy-and-efficiency/smart-grids-and-energy-storage-bottled-sunlight.html>.
5. Tesla запустила найбільший у світі акумулятор [Електронний ресурс] // *Факти*. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: <http://fakty.ua/251724-tesla-zapustila-samyj-bolshoj-v-mire-akkumulyator>.
6. World's Largest Fuel Cell Plant Opens in South Korea [Електронний ресурс] // *Power*. – 2014. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.powermag.com/worlds-largest-fuel-cell-plant-opens-in-south-korea/>.
7. SDG&E and Sumitomo unveil largest vanadium redox flow battery in the US [Електронний ресурс] // *Energy Storage*. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.energy-storage.news/news/sdge-and-sumitomo-unveil-largest-vanadium-redox-flow-battery-in-the-us>.

8. A Hybrid Approach to Energy Storage [Електронний ресурс] // *Electronic Design*. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.electronicdesign.com/power/hybrid-approach-energy-storage>.

9. Bath County Pumped Storage Station [Електронний ресурс] // Retrieved. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: [www.virginiaplaces.org](http://www.virginiaplaces.org).

10. Creating renewable energy storage out of hot air [Електронний ресурс] // *New atlas*. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: <https://newatlas.com/ricas-2020-aa-compressed-air-energy-storage/48661/>.

11. Fact Sheet: The Department of Energy's Loan Programs [Електронний ресурс] // U.S. Department of Energy. – 2010. – Режим доступу до ресурсу: <https://web.archive.org/web/20100527034110/http://www.energy.gov/8719.htm>.

12. SMES [Електронний ресурс] // *ESAS*. – 2011. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.prizz.fi/sites/default/files/tiedostot/linkki2ID693.pdf>.

13. Innovation Outlook: Renewable Mini-grids [Електронний ресурс] // *IRENA*. – 2016. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.irena.org/publications/2016/Sep/Innovation-Outlook-Renewable-mini-grids>.

14. Hybrid energy storage systems for renewable energy applications. // *ELSEVIER*. – 2015. – №73. – С. 103–111.

15. A novel use of the hybrid energy storage system for primary frequency control in a microgrid / [L. Jianwei, Y. Qingqing, Y. Pengfei та ін.] // *ELSEVIER*. – 2016. – №103. – С. 82–87.

16. Wenlong J. Battery-supercapacitor hybrid energy storage system in standalone DC microgrids: areview / J. Wenlong, H. Chean, H. Shung. // *IEEE*. – 2017. – №11. – С. 461–469.

17. Design and new control of DC/DC converters to share energy between supercapacitors and batteries in hybrid vehicles / M. Camara, H. Gualous, F. Gustin, A. Berthon. // *IEEE*. – 2008. – №57. – С. 2721–2735.

18. Jiang Z. A compact digitally controlled fuel cell/battery hybrid power source / Z. Jiang, R. Dougal. // *IEEE*. – 2006. – №53. – С. 1094–1104.

19. Bocklisch T. Intelligente dezentrale Energie speicher systeme. *Umwelt Wirtschafts Forum* / Bocklisch. // Springer-Verlag Berlin Heidelberg, – 2013. – №22. – С. 63–70.

20. Nicolai S. Hierarchische Speichereinsatzoptimierung / S. Nicolai, P. Bretschneider, D. Westermann. // *Autom.* – 2014. – №62. – С. 364–374

21. Hybrid energy storage systems and control strategies for stand-alone renewable energy power systems / [L. Chong, Y. Wong, R. Rajkumar та ін.] // *ELSEVIER*. – 2016. – №66. – С. 174–189.

22. Modelling and Simulation of Standalone PV Systems with Battery-supercapacitor Hybrid Energy Storage System for a Rural Household / W. C. Lee, W. W. Yee, K. R. Rajprasad, I. Dino. // *ELSEVIER*. – 2016. – №107. – С. 232–236.

#### References (transliterated)

1. Requirements of modernity - technical necessity and economic feasibility of modernization of the market of electric energy [Electronic resource] // *cigre*. – 2017. – Access to the website: [http://cigre.org.ua/files/2017.09.28\\_06.suchasni-elektro--akumulyuyuchi-sistemi---dlya-nadannya-dopomijnih-poslug--v-oes-ukrayini.pdf](http://cigre.org.ua/files/2017.09.28_06.suchasni-elektro--akumulyuyuchi-sistemi---dlya-nadannya-dopomijnih-poslug--v-oes-ukrayini.pdf).

2. Development of thermal power and hydropower [Electronic resource] / [E. T. Baseev, B. D. Bilek, E. P. Vasiliev, etc.] // Power Engineering: History, Present and Future. - 2012. - Mode of access to the resource: <http://energetika.in.ua/ru/books/book-3>.
3. A. Andrijanovits, H. Hoimoja, D. Vinnikov. Comparative Review of Long-Term Energy Storage Technologies for Renewable Energy Systems // Electronics and Electrical Engineering. - Kaunas: Technologija, 2012. - No. 2(118). - P. 21–26.
4. Smart Grids and Energy Storage Bottled Sunlight [Electronic resource] // Pictures of the Future. - 2014. - Access to the website: <https://www.siemens.com/innovation/en/home/pictures-of-the-future/energy-and-efficiency/smart-grids-and-energy-storage-bottled-sunlight.html>.
5. Tesla launches the world's largest battery [Electronic resource] // Facts. - 2017. - Access to the website: <http://fakty.ua/251724-tesla-zapustila-samyj-bolshoj-v-mire-akkumulyator>.
6. World's Largest Fuel Cell Plant Opens in South Korea [Electronic resource] // Power. - 2014. - Access to the website: <http://www.powermag.com/worlds-largest-fuel-cell-plant-opens-in-south-korea/>.
7. SDG&E and Sumitomo unveil largest vanadium redox flow battery in the US [Electronic resource] // Energy Storage. - 2017. - Access to the website: <https://www.energy-storage.news/news/sdge-and-sumitomo-unveil-largest-vanadium-redox-flow-battery-in-the-us>.
8. A Hybrid Approach to Energy Storage [A Hybrid Approach to Energy Storage [Electronic resource] // Electronic Design. - 2017. - Access to the website: <http://www.electronicdesign.com/power/hybrid-approach-energy-storage.> // Electronic Design. - 2017. - Access to the website: <http://www.electronicdesign.com/power/hybrid-approach-energy-storage>.
9. Bath County Pumped Storage Station [Electronic resource] // Retrieved. - 2017. - Access to the website: [www.virginiaplaces.org](http://www.virginiaplaces.org).
10. Creating renewable energy storage out of hot air [Electronic resource] // New atlas. - 2017. - Access to the website: <https://newatlas.com/ricas-2020-aa-compressed-air-energy-storage/48661/>.
11. Fact Sheet: The Department of Energy's Loan Programs [Electronic resource] // U.S. Department of Energy. - 2010. - Access to the website: <https://www.energy.gov/loan-programs>.
12. SMES [Electronic resource] // ESAS. - 2011. - Access to the website: <http://www.prizz.fi/sites/default/files/tiedostot/linkki2ID693.pdf>.
13. Innovation Outlook: Renewable Mini-grids [Electronic resource] // IRENA. - 2016. - Access to the website: <http://www.irena.org/publications/2016/Sep/Innovation-Outlook-Renewable-mini-grids>.
14. Hybrid energy storage systems for renewable energy applications. // ELSEVIER. - 2015. - №73. - C. 103–111.
15. A novel use of the hybrid energy storage system for primary frequency control in a microgrid / [L. Jianwei, Y. Qingqing, Y. Pengfei та ін.]. // ELSEVIER. - 2016. - №103. - C. 82–87.
16. Wenlong J. Battery-supercapacitor hybrid energy storage system in standalone DC microgrids: areview / J. Wenlong, H. Chean, H. Shung. // IEEE. - 2017. - №11. - C. 461–469.
17. Design and new control of DC/DC converters to share energy between supercapacitors and batteries in hybrid vehicles / M. Camara, H. Gualous, F. Gustin, A. Berthon. // IEEE. - 2008. - №57. - C. 2721–2735.
18. Jiang Z. A compact digitally controlled fuel cell/battery hybrid power source / Z. Jiang, R. Dougal. // IEEE. - 2006. - №53. - C. 1094–1104.
19. Bocklisch T. Intelligente dezentrale Energie speicher systeme. Umwelt Wirtschafts Forum / Bocklisch. // Springer-Verlag Berlin Heidelberg. - 2013. - №22. - C. 63–70.
20. Nicolai S. Hierarchische Speichereinsatzoptimierung / S. Nicolai, P. Bretschneider, D. Westermann. // Autom. - 2014. - №62. - C. 364–374
21. Hybrid energy storage systems and control strategies for stand-alone renewable energy power systems / [L. Chong, Y. Wong, R. Rajkumar та ін.]. // ELSEVIER. - 2016. - №66. - C. 174–189.
22. Modelling and Simulation of Standalone PV Systems with Battery-supercapacitor Hybrid Energy Storage System for a Rural Household / W. C. Lee, W. W. Yee, K. R. Rajprasad, I. Dino. // ELSEVIER. - 2016. - №107. - C. 232–236.

Надійшла

(received)

05.01.2018

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Івахнов Андрій Віталійович (Ивахнов Андрей Витальевич, Ivakhnov Andrii Vitaliiovych)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри електричних станцій, тел.: +38 (066) 029-34-22, e-mail: [ivakhnov.av@gmail.com](mailto:ivakhnov.av@gmail.com)

**Федорчук Станіслав Олегович (Федорчук Станислав Олегович, Fedorchuk Stanislav Olegovich)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри електричних станцій тел.: +38 (095) 290-19-66, e-mail [majonima@gmail.com](mailto:majonima@gmail.com)

**Лазуренко Олександр Павлович (Лазуренко Александр Павлович, Lasurenko Olexandr Pavlovich)** – кандидат технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри електричних станцій, тел.: +38 (050) 938-03-48, e-mail: [Lasurenko@kpi.kharkov.ua](mailto:Lasurenko@kpi.kharkov.ua)

Укладач: С. О. Федорчук, аспірант.

**Г. В. ОМЕЛЯНЕНКО, Р. Р. КАЧАЛКА**

## **ВПЛИВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ЕКОЛОГІЮ В ЦІЛОМУ**

У даній статті розглянуті види електромагнітних полів, які впливають на навколишнє середовище і живі організми. Виділено два основних види: природний вплив і штучні джерела впливу. Розглянуто як саме здійснюється вплив на тварин, рослин, людину, а також на навколишнє середовище в цілому. В кінці, підведені підсумки і зроблені висновки по даній роботі.

**Ключові слова:** електромагнітне забруднення навколишнього середовища, електромагнітне поле, екологічна безпека, вплив електромагнітного поля на живі організми.

**Г. В. ОМЕЛЯНЕНКО, Р. Р. КАЧАЛКА**

## **ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ЭКОЛОГИЮ В ЦЕЛОМ**

В данной статье рассмотрены виды электромагнитных полей, которые влияют на окружающую среду и живые организмы. Выделены два основных вида: природное влияние и искусственные источники воздействия. Рассмотрены как осуществляется воздействие на животных, растения, человека, а также на окружающую среду в целом. В конце, подведены итоги и сделан вывод по данной работе.

**Ключевые слова:** электромагнитное загрязнение окружающей среды, электромагнитное поле, экологическая безопасность, влияние электромагнитного поля на живые организмы.

**G. V. OMELYANENKO, R. R. KACHALKA**

## **INFLUENCE OF ELECTROMAGNETIC FIELD ON ECOLOGY IN GENERAL**

At the beginning of this article it is stated at the expense of what factors there was an electromagnetic pollution of an environment. The types of electromagnetic fields that affect the environment and living organisms are considered. There are two main types: natural influence and artificial sources of influence. The impact on animals, plants, humans, as well as on the environment as a whole is considered. The table shows the norms of electromagnetic radiation of household appliances, and the figure shows a more real impact of the electromagnetic field on a person from a variety of household appliances. Also, formulas are presented, by which one can calculate the permissible time of human stay in the zone of action of the electromagnetic field. Dissolved allowable levels of electric field strength. At the end of the summary results for this paper.

**Keywords:** electromagnetic pollution of the environment, electromagnetic field, ecological safety, influence of electromagnetic field on living organisms.

**Вступ.** Електромагнітне забруднення навколишнього середовища стало можливо виключно внаслідок діяльності людини і після «другого етапу» промислової революції. Початок цього етапу пов'язують з геніальним і скандальним винахідником, сербом Ніколою Тесла, а саме з його роботою зі створення пристроїв, на змінному струмі, електродвигунів, інших винаходів в області радіо- і електротехніки, дослідження струмів високої частоти, і дослідам з механічним осцилятором і резонансною частотою.

Електрика, а зокрема електричні і електромагнітні поля (ЕМП), як природні, так і штучні впливають не тільки на матеріали, тіла і предмети, а й на живі організми. Адже живе також складається з мікроскопічних «деталей», якими є молекули, а ті в свою чергу включають в себе атоми, що містять позитивно і негативно заряджені частинки. А якщо мають місце бути активні дії електричних полів на ці частинки, то і весь організм автоматично отримує цей вплив[4].

Щоб зрозуміти, як вони впливають на живі організми, варто спочатку зупинитися на видах ЕМП.

У природі розрізняють природний і штучний (техногенний) вплив.

**Природний вплив.** До природних полів можна віднести електричне поле нашої планети, створене її магнітним полем, електричні поля, що створюються в процесі інших природних явищ, наприклад іонізації повітря під дією так званих «космічних променів», наявності електричних розрядів в атмосфері і «сонячного вітру». Це можна сказати глобальні

джерела електричних полів, але є ще й локальні. До них відносяться природні матеріали: термоелектрики, п'єзоелектрики, електрохімічні матеріали, які залягають в земних надрах, та індують хоч і невеликі, але все ж таки досить помітні для вимірювальних приладів електричні поля.

Вплив електричних полів природного походження на живі організми хоч і залишається маловивченою областю науки, все ж вона є і з нею потрібно рахуватися. Природні електричні поля провокують постійний рух заряджених частинок в навколосемній атмосфері. Електрони, протони, іони і фотони постійно знаходяться в тому середовищі, де присутні живі організми. Природно, що частина цих частинок, які мають достатню енергію, проникають всередину живих організмів[1].

Навіть людина дуже часто відчуває цей вплив. У процесі природної електризації на поверхні наших тіл виникає надлишковий електричний заряд, який при випадковому або навмисному поєднанні з заземленою поверхнею, стрімко стікає, утворюючи електричну іскру. Але це лише візуальне сприйняття. Насправді ж електричні поля Землі надають на людину і на інші живі організми як позитивний, так і негативний вплив. Змінюється загальний стан організму (як в одну, так і в іншу сторону), змінюється кров'яний тиск і т.д.

Нестача зовнішнього електромагнітного впливу несприятливо позначається, наприклад, на розумовій діяльності, в той час як його надлишок - може спровокувати погіршення загального стану (головний біль, невроз, поганий сон і т.д.).

**Поява штучних джерел впливу.** В даний час електромагнітний вплив на людей і навколишнє середовище перетворилося з «імовірнісного» в реальне. І сталося це з впровадженням в промислове виробництво винаходів в області електромагнітних полів, в тому числі і раніше згаданого винахідника Тесли. З'явилися такі джерела випромінювання, довжини хвиль яких в природному середовищі не існували.

Будь-який пристрій, який виробляє або використовує електричну енергію, є джерелом електромагнітного випромінювання. Це телевізійні і радіолокаційні станції, високовольтні лінії електропередач промислової частоти, рентгенівські, плазмові й лазерні установки, атомні і ядерні реактори, термічні промислові цехи і багато іншого.

Для людини потужним джерелом випромінювань став мобільний зв'язок.

Все, що неприродно, стало джерелом забруднення, а разом з цим з'явилася поняття - «електромагнітне забруднення навколишнього середовища».

З'явилася навіть поняття «електромагнітний смог». Це негативний вплив на живі організми низькочастотного і понад низькочастотного випромінювання від пристроїв, які виробляють, передають або використовують електромагнітну енергію. Цей «електромагнітний смог»буває на відкритій місцевості, в приміщенні або від мобільних пристроїв. Для нього характерна багатofакторність, тобто вплив декількох джерел одночасно[3].

У табл.1 наведені норми електромагнітного випромінювання побутових приладів[7].

Таблиця 1 – Норми електромагнітного випромінювання побутових приладів.

Джерело електромагнітного випромінювання	Показники випромінювання, мкТл	Перевищення, разів
Комп'ютер	1-100	5-500
Холодильник	1	5
Кавоварка	10	50
Піч НВЧ	8-100	40-500
Електробритва і фен	15-17	75-85
Провід від лампи	0,7	3,5
Трамвай, тролейбус	150	750
Метро	300	1500
Мобільний телефон	40	200
Гранично допустима норма для людини складає 0,2 мкТл.		

Як можна побачити із таблиці 1, навіть самі звичайні для нас прилади, якими ми користуємося щодня, несуть високий електромагнітний вплив.

На рисунку 1 показані реальні значення впливу електромагнітного випромінювання побутових приладів на людину.

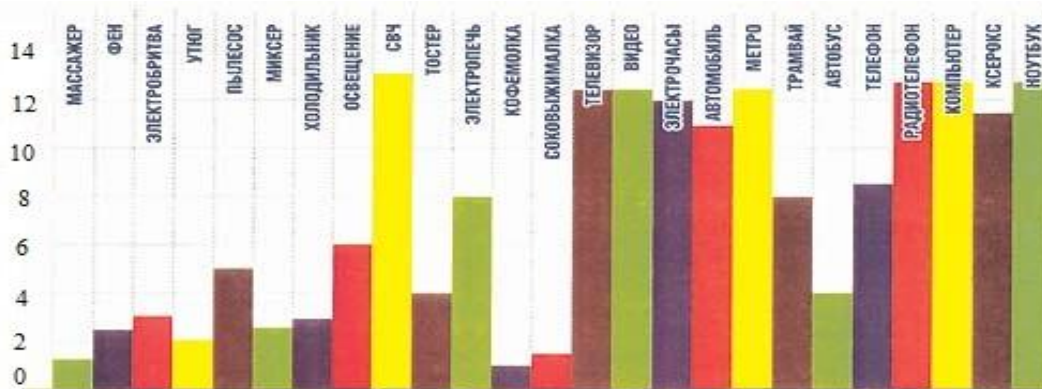


Рис.1 – Вплив електромагнітного випромінювання різних побутових приладів, мкВт/кВ.см.

**Вплив на навколишнє середовище.** Точний механізм впливу цього виду випромінювань на живий організм невідомий. В першу чергу його впливу схильна мембранна структура клітин.

Електромагнітне забруднення навколишнього середовища починається з загального для всього живого компонента - води. Вплив на неї має визначальне значення. Під впливом поля змінюється властивість води, що позначається на швидкості реакцій, що проходять в організмі. На клітинному рівні, найбільш чутливою до різних фізичних і хімічних подразників і впливів є мембрана. Навіть незначне електромагнітне опромінення тягне за собою морфологічні та функціональні порушення в ній. Енергія поля клітини в результаті цього

перетворюється в інші види, а клітина може збільшитися в розмірах.

Слабкі поля, до теплового порога, змінюють живу тканину і погіршують її регенерацію. Під дією змінного електричного поля вона нагрівається. Чим довше і під більшою напругою знаходиться, тим її нагрівання більше. Будова тканини також впливає на ступінь її нагрівання. Особливо чутливі до нагрівання такі органи тварин: мозок, нирки, сечовий і жовчний міхур і органи зору.

Мікроорганізми дуже чутливі до навіть слабких електромагнітних полів. При впливі на них полем, це проявляється в зниженні рухової активності, здатності до виживання і, відповідно, підвищеної смертності. Більш того, опромінення може викликати мутації.

Рослини реагують на вплив слабких і сильних полів. Як правило, ця реакція відбивається на зростанні і функції розмноження. Зазначені зміни в формі і розмірах листя, квіток і стебел рослин, які ростуть під лініями електропередач, а також на приріст дерев, які ростуть поблизу. Надвисокочастотне випромінювання на картоплю і пшеницю втрат врожаю у них не викликало. Різний вплив на рослинний світ, як на основне джерело кисню і харчування на Землі, це вже сильний аргумент, щоб почати більш багатосторонні дослідження. Живучи в рослинному світі комахи, по-своєму реагують на вплив випромінювань. Деякі види, в залежності від будови тіла і способу життя, уповільнюють свій розвиток, може бути втрата орієнтації або підвищена агресивність. Але основна реакція - це прагнення уникнути впливу поля ліній електропередач. Якщо ж мова йде про вплив НВЧ-випромінювання, то це, як правило, викликає летальний результат, що говорить про меншу стійкості комах до цього виду випромінювання, ніж рослин.

Встановлено, що під впливом електромагнітного поля, страждає, перш за все, центральна нервова система птахів і тварин. У щурів викликає зміну загального стану, порушення обміну речовин, внутрішньоутробного і постнатального розвитку плода у самок, а у самців проявляється безпліддя. У інших видів ссавців аналогічних наслідків не спостерігається. Якщо у свиней, які піддані опроміненню, з'являлося занепокоєння і дискомфорт під час сну, то у корів підвищувалася смертність телят або вони народжувалися з аномаліями. Характерно, що птах не гніздиться біля радіолокаційних станцій.

Вплив на різні види тварин не носить однакового характеру і може позначитися на співвідношенні видів в рамках однієї екосистеми. А це обов'язково призведе до дисбалансу і порушення її стійкості, а потім, можливо, її зміни і зникнення.

Вплив електромагнітного поля на водні і ґрунтові екосистеми слабо вивчені, а проведені дослідження показали стійкість цих систем і слабкий на них вплив випромінювання[2].

**Допустимі рівні напруженості електричних полів.** Допустимі рівні напруженості електричних полів встановлені в спеціальному ГОСТі ССБТ. Стандарт встановлює гранично допустимі рівні напруженості електричного поля частотою 50 Гц для персоналу, що обслуговує електроустановки і знаходиться в зоні впливу створюваного ними електричного поля (ЕП), в залежності від часу перебування і вимог до проведення контролю рівнів напруженості ЕП на робочих місцях. Гранично допустимий рівень напруженості впливаючого ЕП дорівнює 25 кВ / м. Перебування в ЕП напруженістю більше 25 кВ / м без засобів захисту не допускається.

Допустимий час перебування в ЕП напруженістю понад 5 до 20 кВ / м включно визначається за формулою (1):

$$T = \frac{50}{E} - 2, \quad (1)$$

де  $T$  - допустимий час перебування в ЕП за відповідного рівня напруженості, год;

$E$  - напруженість впливаючого ЕП в контрольованій зоні, кВ / м.

Розрахунок допустимої напруженості в залежності від часу перебування в ЕП здійснюється за формулою (2):

$$E = \frac{50}{T+2}. \quad (2)$$

Допустимий час перебування в ЕП може бути одноразовий або декілька разів (але короткочасно) протягом робочого дня. В інший робочий час напруженість ЕП не повинна перевищувати 5 кВ / м.

Вимоги ГОСТу дійсні за умови виключення можливості впливу електричних зарядів на персонал, а також за умови застосування захисного заземлення всіх ізольованих від землі предметів, машин і механізмів[5].

**Висновки.** Вплив електромагнітних полів на здоров'я людини - це завдання науки яка тільки розробляється. У зв'язку зі стрімким зростанням числа технологій і приладів уникнути впливу ЕМП в сучасному світі практично неможливо. Різні організації як державні, так і міжнародні розробили безліч стандартів і вимог для запобігання будь-якого впливу електромагнітного поля на людину і, майже вся техніка, яка продається відповідає цим стандартам[5].

Масштаби електромагнітного забруднення середовища проживання людей стали настільки істотні, що багато вчених відносять її до сильнодіючих екологічних факторів з катастрофічними наслідками для всього живого.

Енергетичний вплив електромагнітного випромінювання може бути різного ступеня і сили. Від невідчутного людиною (що спостерігається найбільш часто) до теплового відчуття при випромінюванні високої потужності. Надпотужні електромагнітні впливи можуть виводити з ладу прилади й електроапаратуру. По тяжкості впливу електромагнітне випромінювання може не сприйматися людиною взагалі або ж привести до повного виснаження з функціональним зміною діяльності мозку і смертельного результату.

Дослідження показали, що тривалий вплив електромагнітного випромінювання, навіть відносно слабого рівня, може викликати ракові захворювання, втрату пам'яті, хвороби Паркінсона та Альцгеймера, імпотенцію і навіть підвищити схильність до самогубства. Електромагнітні випромінювання сприяють зміні гормонального статусу чоловічого організму, зростанню рівня хромосомних аберацій, викликають зміни в репродуктивній системі. Складність проблеми полягає не тільки у впливі на здоров'я населення, а й на здоров'я і інтелект майбутніх поколінь.

Таким чином, можна завершити, що дотримання санітарних і гігієнічних норм при містобудуванні і дотриманням необтяжливих рекомендацій по використанню побутових приладів значно зменшує вплив електромагнітних полів на людину. Хоча це

питання має і я думаю буде досліджуватися в подальшому.

#### Список літератури

1. Электромагнитное поле — от природного фона до загрязнения природы – Режим доступа : <http://ecology-of.ru/eko-razdel/elektromagnitnoe-pole-ot-prirodnogo-fona-do-zagryazneniya-prirody>. –Дата звертання : 17 жовтня 2017.
- 2.Князева А.А. Влияние электромагнитных волн электрических приборов на человека./А.А. Князева – Режим доступа : <https://www.school-science.ru/0317/11/28374> – Дата звертання: 17 жовтня 2017.
3. Влияние электричества на живые организмы– Режим доступа: <http://scsiexplorer.com.ua/index.php/interesnie-fakti/1906-vlijanie-elektrichestva-na-zhivye-organizmy.html> – Дата звертання : 17.10.2017.
4. Что такое экологическая безопасность? – Режим доступа: <http://www.vitamarg.com/eco/article/7991-ekologicheskaya-bezopasnost> – Дата звертання : 17 жовтня 2017.
5. ГОСТ 12.1.006-84 "ССБТ. Электромагнитное поле радиочастот. – Режим доступа: <http://cpo.stu.cn.ua/Oksana/posibnik/910.html> – Дата звертання : 17 жовтня 2017.
- 6.Желібо Є.П. Безпека життєдіяльності: Навч.посіб./За ред.Є.П. Желібо, Н.М. Заверуха, В.В. Зацарний/ 6-те вид. – К.:Каравела,2008.–344с.
7. Мягченко О.П. Безпека життєдіяльності людини та суспільства. Навч.посіб. /О.П. Мягченко. – К.:Центр учбової літератури, 2010.–384с.

#### References (transliterated)

1. Jelektromagnitnoe pole — ot prirodnogo fona do zagryaznenija prirody – Rezhim dostupu : <http://ecology-of.ru/eko-razdel/elektromagnitnoe-pole-ot-prirodnogo-fona-do-zagryazneniya-prirody>. –Data zvertannja : 17 zhovtnja 2017.
2. Knjazeva A.A. Vlijanie jelektromagnitnyh voln jelektricheskikh priborov na cheloveka./A.A. Knjazeva – Rezhim dostupu : <https://www.school-science.ru/0317/11/28374> – Data zvertannja: 17 zhovtnja 2017.
- 3.Vlijanie jelektrichestva na zhivye organizmy– Rezhim dostupu: <http://scsiexplorer.com.ua/index.php/interesnie-fakti/1906-vlijanieelektrichestva-na-zhivye-organizmy.html> – Data zvertannja : 17.10.2017.
4. Chto takoe jekologicheskaja bezopasnost? – Rezhim dostupu: <http://www.vitamarg.com/eco/article/7991-ekologicheskaya-bezopasnost> – Data zvertannja : 17 zhovtnja 2017.
5. GOST 12.1.006-84 "SSBT. Jelektromagnitnoe pole radiochastot. – Rezhim dostupu: <http://cpo.stu.cn.ua/Oksana/posibnik/910.html> – Data zvertannja : 17 zhovtnja 2017.
6. Zhelibov Ye.P. Bezreka zhyttyedyial'nosti: Navch.posib./Za red. Ye.P. Zhelibov, N.M. Zaverukha, V.V. Zatsarnyy/ 6-te vyd. – K.:Karavela,2008.–344s.
7. Myahchenko O.P. Bezpeka zhyttyedyial'nosti lyudyny ta suspil'stva. Navch.posib. /O.P. Myahchenko. – K.:Tsentr uchbovoy literatury, 2010.–384s.

Надійшла

(received)

26.12.2017

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Омельяненко Галина Вікторівна (Омельяненко Галина Викторовна, Omelyanenko Galina Viktorovna)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Передачі електричної енергії»; e-mail: [omeljanenkgalina@i.ua](mailto:omeljanenkgalina@i.ua).

**Качалка Роман Романович (Kachalka Roman Romanovich)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент кафедри «Передачі електричної енергії»; e-mail: [kachalka.roma@yandex.ru](mailto:kachalka.roma@yandex.ru).

Укладач: С. О. Федорчук, аспірант.

**Ю. В. КОВАЛЬОВА**

## **АВТОМАТИЧНА КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА З ТИРИСТОРНИМ РЕГУЛЯТОРОМ НАПРУГИ**

Асинхронні електроприводи з тиристорним регулятором напруги працюють в режимі змінного кута керування тиристорами. Мета статті - розробка схеми автоматичної компенсації реактивної потужності для будь-якого кута керування тиристорів. Схема працює наступним чином: визначається кут зсуву першої гармоніки струму статора відносно напруги мережі. Останній перетворюється інтегратором в напругу та подається на вхід чотирирозрядного аналого-цифрового перетворювача (АЦП). На чотирьох виходах АЦП з'являється двійковий код, який відповідає куту зсуву першої гармоніки струму  $i$ , отже, відносній величині реактивної потужності. В результаті формується 15 ступеней ємності, що забезпечує автоматичну компенсацію.

**Ключові слова:** асинхронний двигун, тиристорний регулятор, реактивна потужність

**Ю. В. КОВАЛЕВА**

## **АВТОМАТИЧЕСКАЯ КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ТИРИСТОРНЫМ РЕГУЛЯТОРОМ НАПРЯЖЕНИЯ**

Асинхронные электроприводы с тиристорным регулятором напряжения работают в режиме переменного угла управления тиристорами. Цель статьи - разработка схемы автоматической компенсации реактивной мощности для любого угла управления тиристором. Схема работает следующим образом: определяется угол сдвига первой гармоники тока статора относительно напряжения сети. Последний превращается интегратором в напряжение и подается на вход четырехразрядного аналого-цифрового преобразователя (АЦП). На четырех выходах АЦП появляется двоичный код, который отвечает углу сдвига первой гармоники тока  $i$ , следовательно, относительной величине реактивной мощности. В результате формируется 15 ступеней емкости, что обеспечивает автоматическую компенсацию.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, тиристорный регулятор, реактивная мощность

**J. V. KOVALOVA**

## **AUTOMATIC COMPENSATION OF REACTIVE POWER AC ELECTRIC DRIVE WITH THIRISTOR REGULATOR OF VOLTAGE**

The article is devoted to compensation reactive power of AC motors with the thyristor voltage converter. Reactive power produce the losses of the electrical energy on the transmission lines and substation transformers. The electric diagram of compensation of reactive power contains AC motor, thyristor converter of voltage, transformer of current and transformer of voltage. The outputs of the first and second rectifiers are connected with the inputs of blocks of impulses of current of stator and voltage of network. The electric diagram contains trigger with two inputs R and S and with a control the falling side of puls. The input S is connected to the output of block of impulses of voltage, and the input R is connected to the output of block of impulses of current. The output of trigger is connected with the input of analog integrator. The output of analog integrator is connected with the input of analog comparator. The output of memory device is connected with the entrance of analog-digital converter. The power outputs of the controlled electron swithes turn on or turn off the first, second, third and fourth condensers for compensation reactive power. The capacities of the second, third and fourth condensers grow in relation to the first with coefficients equal 2,4,8. Such combination of capacities of condensers provides the error of compensation reactive power not more than 5%.

**Keywords:** AC motor, thyristor converter, reactive power compensation

**Вступ.** Асинхронні електроприводи з тиристорним регулятором напруги зазвичай використовують для регулювання швидкості турбомеханізмів з, так званою, вентиляторною характеристикою навантаження. Необхідність технологічного регулювання швидкості асинхронного двигуна зміною кута керування тиристорами потребує відповідної зміни параметрів компенсуючих пристрої для забезпечення енергозберігаючих властивостей електропривода [1-4]. В якості компенсуючих пристрої з точки зору їх вартості та надійності доцільно використовувати батареї конденсаторів.

**Аналіз стану питання.** Необхідність створення систем автоматичної компенсації реактивної потужності неодноразово розглядалась в сучасній технічній літературі, наприклад, в [5-9]. Зокрема, в [5] пропонується асинхронний електропривод тиристорним регулятором напруги з екстремальною схемою автоматичного керуванням струмом статора. Схема містить датчики струму і напруги статора, фільтр першої гармоніки струму статора, додатній зворотний зв'язок за струмом статора та

функціональний перетворювач з експоненціальною залежністю коефіцієнта підсилення від напруги статора. Недоліком схеми є те, що реактивна потужність зменшується не за рахунок компенсації реактивної потужності, а за рахунок зменшення струму статора функціональним перетворювачем з експоненціальною залежністю коефіцієнта підсилення. Тому є актуальною розробка схеми автоматичного керування, яка забезпечує безпосередньо компенсацію реактивної потужності, тобто, її споживання не з електричної мережі, а від батареї конденсаторів.

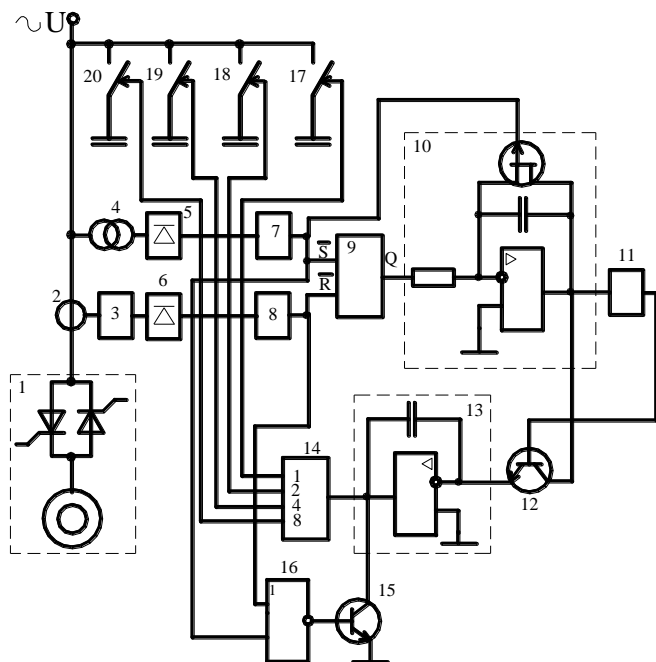
**Мета статті.** Розробити схему автоматичної компенсації реактивної потужності на основі ступінчастого керування батареями конденсаторів.

**Результати дослідження.** Основними елементами тиристорного перетворювача напруги для живлення асинхронного двигуна є зустрічно-паралельно включені тиристри за симетричною схемою вмикання тиристорів. При цьому статор асинхронного двигуна підключається до електромережі через тиристорний перетворювач



напруги, побудований на шести тиристорах, включених у кожну фазу зустрічно-паралельно. Недоліком такого електропривода є те, що його реактивна потужність некомпенсована і коефіцієнт потужності не перевищує 0,6.

Для компенсації, тобто, зменшення споживання реактивної потужності використовуємо ступені



конденсаторів з різними величинами ємностей, які вмикаються в необхідній комбінації. Функціональна схема автоматичної компенсації реактивної потужності електроприводу та часові діаграми, що пояснюють принцип її роботи, представлені на рис.1

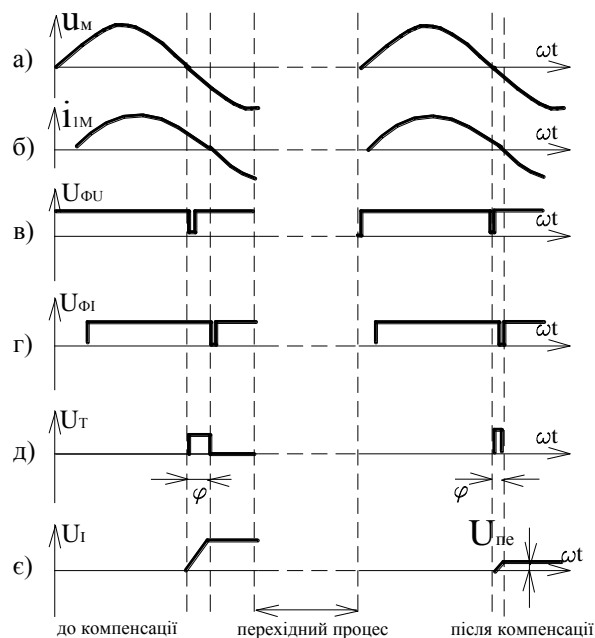


Рис. 1 - Схема автоматичної компенсації реактивної потужності асинхронного електроприводу з тиристорним регулятором напруги та часові діаграми напруг і струмів

На функціональній схемі показаний тиристорний електропривод 1, який складається з асинхронного двигуна з короткозамкнутим ротором та тиристорного регулятора напруги. Фазний струм статора та фазна напруга мережі вимірюються трансформатором струму 2 та трансформатором напруги 4. Струм статора при тиристорному регулюванні має явно неінусоїдний характер, як показано на експериментальній осцилограмі, отриманій на імітаційній моделі асинхронного електроприводу з тиристорним регулятором напруги в програмному середовищі Matlab (рис.2).

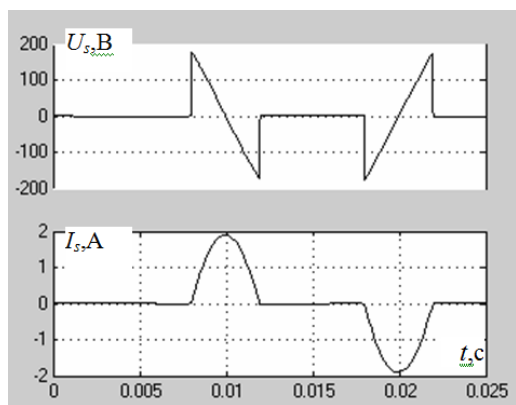


Рис. 2 - Напруга і струм фази статора асинхронного двигуна при тиристорному керуванні

Оскільки струм фази статора асинхронного двигуна при тиристорному керуванні має явно неінусоїдний характер, то необхідно віділити його першу гармоніку. Тому в схемі автоматичної компенсації реактивної потужності до вторинної обмотки трансформатора струму підключений фільтр 3 першої гармоніки фазного струму статора асинхронного двигуна. Вихід фільтру першої гармоніки фазного струму підключений до входу однофазного випрямляча 6. Вторинна обмотка трансформатора фазної напруги 4 підключена до входу однофазного випрямляча 5. На виходах однофазних випрямлячів 5 і 6 форма напруги має вигляд напівхвиль синусоїди, але для роботи тригерів необхідні прямокутні імпульси. Тому до виходів однофазних випрямлячів 5 і 6 підключені формувачі прямокутних імпульсів напруги 7 і струму 8.

Вихід формувача прямокутних імпульсів напруги 7 підключений установочного входу RS-тригера 9. Вихід формувача прямокутних імпульсів струму 8 підключений скидаючого входу RS-тригера. Необхідно зазначити, що RS-тригер спрацьовує при спадаючих фронтах імпульсів фазних напруги і струму статора. До прямого виходу RS-тригера підключений аналоговий інтегратор 10, який складається з операційного підсилювача, конденсатора та польового транзистора. Польовий транзистор скидає рівень напруги інтегратора задніми

фронтами імпульсів з формувача прямокутних імпульсів напруги 7. Вихід аналогового інтегратора підключений до входу порогового елемента 11, який в реальності являє собою стабілітрон. Вихід порогового елемента 11 підключений до бази біполярного транзистора 12, колектор якого підключений до виходу аналогового інтегратора 10, а емітер підключений до входу блоку пам'яті 13. Блок пам'яті складається з операційного підсилювача та конденсатора. Вихід блоку пам'яті підключений до входу чотирирозрядного аналого-цифрового перетворювача 14. Вихід аналого-цифрового перетворювача складається з чотирьох розрядів, біти яких в двійковій системі зчислення мають вигляд  $2^3+2^2+2^1+2^0$ . Виходи аналого-цифрового перетворювача підключені до входів чотирьох силових ключів 17-20. В якості силових ключів 17-20 використовуються трифазні оптронні тиристри. Керуючі світлодіоди оптронних тиристорів включені між собою послідовно та підключені до виходів аналого-цифрового перетворювача. Фототиристри включені між собою в схему "трикутника". Оптронні тиристри підключають до тиристорного електроприводу чотири конденсатори, ємність яких співвідноситься між собою як 1:2:4:8. В схемі також використаний логічний елемент 16 з функцією 2АБО-НІ, входи якого підключені до входів RS-тригера 9, а вихід – до входу ключа транзистора 15. На рис.1 показані часові діаграми, які пояснюють принцип дії схеми зверху вниз: а) синусоїда напруги мережі; б) синусоїда першої гармоніки струму; в) сигнал формувача імпульсів напруги; г) сигнал формувача імпульсів струму; д) сигнал на виході тригера; е) сигнал на виході інтегратора.

Особливість схеми полягає у введенні в RS-тригера з керуванням задніми фронтами імпульсів від формувачів імпульсів напруги і струму. На виході RS-тригера формується імпульс, ширина якого пропорційна реактивній потужності. Аналоговий інтегратор, який входом підключеним до виходу RS-тригера, перетворює ширину імпульсу в рівень напруги пропорційний реактивній потужності. Якщо рівень напруги, тобто, рівень реактивної потужності перевищує допустиму, то вмикається пороговий елемент і підключає вихід інтегратора до входу блоку пам'яті. Вихід останнього підключений до входу чотирирозрядного аналого-цифрового перетворювача, до чотирьох виходів якого підключені входи чотирьох силових ключів. В якості силових ключів використані оптронні тиристри підключають до тиристорного електроприводу комбінацію чотирьох конденсаторів з різними величинами ємностей. В процесі роботи асинхронного електропривода з тиристорним регулятором напруги можуть відбуватися випадки зменшення споживання реактивної потужності або в перехідному процесі наступати моменти часу співпадання напруги мережі і першої гармоніки струму за фазою. Тоді логічний елемент 2АБО-НІ, входи якого підключені до входів RS-тригера, а вихід – до входу ключа скиду пам'яті, обнуляє блок пам'яті і процес визначення величини реактивної потужності

за величиною кута зсуву фази струму від напруги повторюється.

Таким чином, коефіцієнт потужності асинхронного електропривода з тиристорним регулятором напруги підвищується саме за рахунок зменшення споживання реактивної потужності, а не за рахунок збільшення навантаження двигуна, як застосовується в [5].

Особливості функціонування запропонованої схеми тиристорного асинхронного електропривода з підвищеним коефіцієнтом потужності пояснюють часові діаграми напруг і струмів (рис.1).

Принцип дії тиристорного асинхронного електропривода з автоматичною компенсацією реактивної потужності полягає у наступному. При регулюванні напруги статора тиристорним регулятором струм першої гармоніки відстає від напруги (рис.1а, б). Формувачі імпульсів напруги 7 і струму 8 першої гармоніки формують на своїх виходах імпульси низького рівня при нульових рівнях напруги і струму (рис.1в,г). Формувач 7 імпульсів напруги встановлює високий рівень на виході RS-тригера 9 і одночасно обнуляє інтегратор 10 (польовий транзистор з каналом р-типу закритий при позитивному потенціалі на затворі і відкривається при нульовому потенціалі), а формувач 6 імпульсів струму встановлює низький рівень на виході RS-тригера. На виході тригера з'являється імпульс (рис.1д), ширина якого дорівнює фазовому зсуву першої гармоніки струму від напруги. Після появи високого рівня на виході тригера починає підвищуватись напруга на виході інтегратора 10 (рис.1е). При досягненні заданного рівня напруги, який відповідає куту зсуву фази струму  $5,5^{\circ}$  спрацьовує пороговий елемент 11. Мінімальний кут зсуву фази струму  $5,5^{\circ}$  визначається наступним чином. Максимальний кут зсуву струму від напруги складає 82-84 градуси. Максимальна кількість ступенів ємності (дискретність зміни ємності) конденсаторів складає 15 дискрет. Тоді ціна однієї дискрети складає  $83^{\circ}/15=5,5^{\circ}$ .

Пороговий елемент 11 вмикає ключ 12 і вихідна напруга інтегратора запам'ятовується блоком 13. Напруга з виходу блоку пам'яті перетворюється у двійковий код на виході аналого-цифрового перетворювача (АЦП). Двійковому коду відповідають логічні рівні напруги на виходах АЦП, комбінація яких відповідає вхідній напрузі. Логічні рівні напруги вмикають конденсатори відповідної ємності. Після перехідного процесу вмикання конденсаторів фазовий зсув струму, ширина вихідного імпульсу тригера, вихідна напруга інтегратора зменшуються. Пороговий елемент вмикається, блок пам'яті залишає рівень напруги, який відповідає величині реактивної потужності, пропорційний куту зсуву фази струму. Реактивна потужність скомпенсована і асинхронний електропривод з тиристорним регулятором напруги працює з підвищеним коефіцієнтом потужності. У випадку зменшення споживання реактивної потужності при збільшенні кута керування тиристорним регулятором величина ємності стає більшою від необхідного значення і фаза струму

починає рухатись в сторону випередження. В момент співпадання імпульсів напруги і струму на виході елемента 2АБО-НІ з'являється високий рівень, вмикається ключ 15 і обнулює блок пам'яті 13. Починається новий процес визначення необхідної величини ємності конденсаторів.

**Висновки.** Таким чином, запропонована схема забезпечує автоматичну компенсацію реактивної потужності асинхронного електроприводу з тиристорним регулятором напруги і, отже, підвищує його коефіцієнт потужності. При цьому зменшуються втрати електроенергії в лініях електропередач і трансформаторах підстанцій від передачі реактивної потужності.

#### Список літератури

1. Барский, В. А. Электропривод как энергосберегающий фактор в промышленности и ЖКХ Украины / В. А. Барский, А. С. Бешта, Н. В. Горбачев, М. В. Загирняк, В. Б. Клепиков, О. Ю. Лозинский, С. А. Мехович, С. М. Пересада, А. В. Садовой, О. И. Толочко // Энергосбережение : Энергетика · Энергоаудит. – Харьков, 2013. – № 9(115). – С. 2–11.
2. Закладний, О. М. Энергобережения засобами промислового електропривода / О. М. Закладний, А. В. Праховник, О. І. Соловей. - К.: Кондор, 2003. - 408 с.
3. Владимиров, Ю. В. О концепции компенсации реактивной мощности [Текст] / Ю. В. Владимиров // Світлотехніка та електроенергетика. - Х. : ХНАМГ, 2008. - № 3. - С. 35–41.
4. Говоров, Ф. П. Компенсация реактивной мощности в системах электроснабжения и освещения городов / Ф. П. Говоров, В. Ф. Говоров // Наукові праці Донецького національного технічного університету. - Донецьк: ДонНТУ, 2013. - № 1 (14). - С.
5. Асинхронный электропривод с тиристорным управлением / Р. П. Герасимьяк, В. А. Лещев, Н. С. Путилин. - Киев: Техника, 1984. - 150 с.
6. Зеленов, А. Б. Потребление реактивной энергии тиристорными позиционными электроприводами постоянного тока [Текст] / А. Б. Зеленов, Е. В. Полилов, В. П. Яблонь, Д. И. Морозов // Вісник КДПУ, випуск 3/2007 (44). Частина 1. С. 76–78.
7. Чизенко, О. І. Обмінні енергетичні процеси в силових колах вентильних електричних перетворювачів [Текст] : автореф. дис. д-ра техн. наук : 05.09.05 / Чизенко О. І. - Київ, 2010. - 36 с.
8. Жемеров, Г. Г. Энергия и мощность в системах электроснабжения с полупроводниковыми преобразователями и

накопителями энергии / Г. Г. Жемеров, Д. В. Тугай. // Электротехника і електромеханіка. 2014. - №1. - С. 45-57.

9. Mr. Musthafa, P. (2011) Analysis of Dynamic Power Factor Correction Using Flexible Ac Transmission Systems / Mr. P. Musthafa, Mr. M. Sivasubramanian, Mr. K. Sakthidhasan // International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA) ISSN: 2248-9622. - Vol. 1, Issue 3, pp.710-715.

#### References (transliterated)

1. Barskiy V. A. Elektroprivod kak energosberegayuchiy factor v promishlennosti I ZKH Ukraini / V.A. Barskiy, A.S. Beshta, N.V. Gorbachov, M.V. Zagirniak, V.B. Klepikov, O. Yu. Lozinskiy, S.A. Mehovich, S.M. Peresada, A.V. Sadovoy, O.I. Tolochko // Energoberezenie·Energetica·Energoaudit. – Kharkov,2013.-№ 9(115). - p. 2-11.
2. Zakladniy O. M. Energozberezenia zasobami promislavogo elektroprivoda / O. M. Zakladniy, A. V. Prakhovnik, O. I. Solovey. - K.: Kondor, 2003. - 408 p.
3. Vladimirov Yu. V. O kontsepsii kompensatsii reaktivnoy moshnosti / Yu. V. Vladimirov // Svitlotekhnika ta elektroenergetika. - Kh. : KHNAMG, 2008. - № 3. - s. 35-41.
4. Govorov F. P. Kompensatsiya reaktivnoy moshnosti v sistemakh elektrosnabjeniya i osvycheniya gorodov / F. P. Govorov, V. F. Govorov // Naukovi praci Donetskogo natsionalnogo tekhnichnogo universitetu. - Donetsk: DonNTU, 2013 p. - № 1 (14). - P. 30-38.
5. Asinkhronniy elektroprivod s tiristornim upravleniem / R. P. Gerasimiak, V.A. Leschev, N. S. Putilin.-Kiyv: Tekhnika, 1984. – 150 s.
6. Zelenov A. B. Potrebleniye reaktivnoy energii tiristornimi pozitsionimi elektroprivodami postoyanogo toka / A. B. Zelenov, Ye. V. Polilov, V.P. Yablou, D.I. Morozov // Vicnik KDPU, vipusk 3/2007 (44). Chastina 1. P. 76-78.
7. Chizenko O. I. Obminni nergetichni protsecci v silovikh kolah ventilnikh elektrichnikh peretvorivuvachiv: avtorf. dis. d-ra tekhn. nauk : 05.09.05 / Chizenko O. I. - Kiyv, 2010. - 36 p.
8. Zemerov G.G. Energiya i moshnost v sistemakh elektrosnabzeniya s poluprovodnikovimi preobrazovateliami I nakopiteliami energiyi / G.G. Zemerov , D.V. Tugay. // Elektrotehnika i elektroekhanika. 2014. - №1. – P. 45-57.
9. Mr. Musthafa, P. (2011) Analysis of Dynamic Power Factor Correction Using Flexible Ac Transmission Systems / Mr. P. Musthafa, Mr. M. Sivasubramanian, Mr. K. Sakthidhasan // International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA) ISSN: 2248-9622. - Vol. 1, Issue 3, pp.710-715.

Надійшла (received) 9.12.2017

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Ковальова Юлія Вікторівна (Ковалева Юлія Вікторівна, Kovalova Yuliia Viktorivna)** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри систем електропостачання та електроспоживання міст Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова; тел.: (066) 97-97-302; e-mail: [kovalova.jv@gmail.com](mailto:kovalova.jv@gmail.com).

Укладач: С. О. Федорчук, аспірант.

УДК 621.315:004.032.26

**О. О. МИРОШНИК, В. В. ЧЕРКАШИНА, В. Г. ПАЗИЙ, А. В. ДИШЛЕВСЬКИЙ****УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ ЗБИТКІВ ВІД ПОШКОДЖЕНЬ В РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ**

Виконано аналіз методів пошуку аварійних пошкоджень в розподільних лініях з урахуванням їх структури. Запропоновано методику, яка дозволяє визначити збитки від аварійних пошкоджень.

**Ключові слова:** аварійні пошкодження, розподільні мережі, пошук місця пошкодження.

**О. О. МИРОШНИК, В. В. ЧЕРКАШИНА, В. Г. ПАЗИЙ, А. В. ДИШЛЕВСЬКИЙ****СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УБЫТКОВ ОТ ПОВРЕЖДЕНИЙ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ**

Выполнен анализ методов поиска аварийных повреждений в распределительных линиях с учетом их структуры. Предложена методика, которая позволяет определить ущерб от аварийных повреждений.

**Ключевые слова:** аварийные повреждения, распределительные сети, поиск места повреждения.

**О. О. MIROSHNYK, V. V. CHERKASHYNA, V. H. PAZIY, A. V. DYSHLEVS'KYI****IMPROVEMENT OF METHODS FOR DETERMINING DAMAGES FROM DAMAGE IN DISTRIBUTION ELECTRIC NETWORKS**

The analysis of methods of search of accidents damages in distribution lines with the account of their structure is executed. A methodology is proposed, which allows to determine damage from accidental damage. The choice of the optimal strategy for diagnosing accidental damage depends on the structural construction of the distribution electrical grids and their technical and economic characteristics.

**Keywords:** emergency damage, distribution networks, search for damage.

**Вступ.** Переважно розподільні електричні мережі (електромережі) виконані як радіальні та несекціоновані, а трансформаторні підстанції підключаються глухим відгалуженням від магістралі лінії. Також в розподільних електромережах практично відсутні пункти автоматичного вводу резерву (ПАВР) та пункти автоматичного секціонування мережі (ПАС), комутаційними апаратами, здатними вимикати струми коротких замикань в мережі, є масляні (вакуумні) вимикачі, як правило, встановлені в розподільних пристроях (РП) районних трансформаторних підстанцій (РТП) 35/10 кВ, а по магістралі повітряної лінії (ПЛ) та на відгалуженнях від неї встановлюють секціонувальні роз'єднувачі, для оперування якими необхідно виїжджати оперативно-виїзній бригаді (ОВБ), але лише після попереднього зняття напруги з лінії. Тому у разі пошкодження будь-якої ділянки ПЛ вимикання лінії здійснюється автоматично за командою релейного захисту вимикачем, встановленим в комірці ПЛ на РТП, в голові лінії, в результаті на час пошуку пошкодження та виконання ремонтних робіт будуть залишатись знеструмленими всі трансформаторні підстанції 10/0,4 кВ, які отримують живлення від вимкненої лінії.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Характерною особливістю розподільних електромереж є низький рівень автоматизації післяаварійних комутацій, які мали б забезпечити локалізацію пошкодженого елемента чи ділянки мережі та відновлення електропостачання знеструмлених внаслідок аварії (на певній ділянці) споживачів, тому в сільських розподільних мережах

будь-яке три- або двофазне стійке к.з. призводить до вимикання лінії та повного знеструмлення приєднаних споживачів [1, 2].

Тривалість вимкненого стану усіх або частини споживачів аварійно вимкненої ПЛ визначається тривалістю виконання усіх або частини необхідних операцій, а саме:

- визначення місця пошкодження;
  - локалізації ушкодженої ділянки мережі;
  - вимкнення резерву (якщо існує технічна можливість);
  - виконання ремонтних операцій.
- Специфіка розподільних електромереж вимагає розробки методів діагностики пошкоджень та розрахунку надійності, які б враховували технічні характеристики цих мереж, зокрема
- переїзди та переходи вздовж траси лінії;
  - стан доріг вздовж ПЛ, особливості місцевості, природні перешкоди;
  - особливості вимог техніки безпеки.

Пошук місця пошкодження в лінії може здійснюватись проведенням послідовних операцій поділу лінії (за допомогою встановлених в ній роз'єднувачів) та наступною пробною подачею напруги до тих пір, доки не буде виявлено пошкоджену ділянку. Вибір стратегії пошуку місця пошкодження (послідовності місць поділу лінії) може бути різним:

- з метою першочергової і якнайшвидшої подачі напруги відповідальним споживачам;
- з метою мінімізації недовідпуску електроенергії;
- на основі статистичної інформації про

найслабкіші з точки зору надійності місця лінії;

- вимикання роз'єднувачем починають з середини лінії з подальшим рівномірним поділом лінії;

- послідовна схема, яка передбачає поділ лінії роз'єднувачами в порядку збільшення відстані від РТП до місця їх установки (починаючи з найближчих до центру живлення комутаційних апаратів з послідовним віддаленням від нього) [3].

За відсутності в розподільних електромережах пунктів автоматичного секціонування і ПАВР у разі аварійного вимикання ПЛ релейним захистом з неуспішним автоматичним повторним ввімкненням (АПВ) відбувається знеструмування приєднаних до лінії споживачів. В такому разі процес відновлення електропостачання формується діями ОВБ, а за необхідності і залученого ремонтного персоналу.

Диспетчер району розподільних електричних мереж отримує інформацію про вимкнення лінії:

- каналами телесигналізації (ТС);
- від чергового РТП;
- від знеструмлених споживачів.

Після вимкнення релейним захистом вимикача в голові лінії на РТП необхідно виконати пробне вмикання черговим на підстанції або за його відсутності - оперативно-виїзною бригадою.

У разі неуспішного вмикання бригада починає проводити діагностичні операції для виявлення пошкодженої ділянки лінії та виконання оперативних перемикачів з метою її локалізації і, за можливості, відновлення електропостачання частини вимкненої мережі, яка може бути відокремлена від аварійної ділянки і отримувати живлення від основного або резервного джерела.

До цих операцій відносяться:

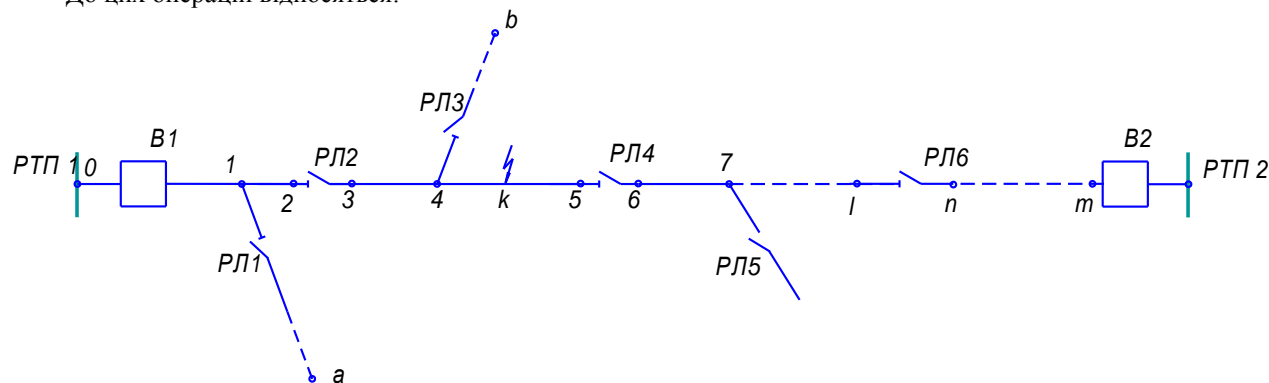


Рис. 1 – Радіальна розгалужена ПЛ розподільної електромережі

Для аналізу ефективності методів та моделей діагностування аварійних пошкоджень в розподільних лініях, вибору стратегій пошуку місця пошкодження слід розглянути основні варіанти структурної побудови мереж та їхні техніко-економічні характеристики за умов різних варіантів аварійних пошкоджень в лініях.

- поділ лінії вимиканням одного із встановлених на ній роз'єднувачів;

- випробування частини лінії пробною подачею на неї напруги шляхом вмикання вимикача для визначення наявності пошкодження на ній;

- локалізація пошкодженої ділянки шляхом вимикання роз'єднувачів, які вилучають цю ділянку із схеми лінії;

- подача напруги на інші ділянки лінії з боку основного та резервного джерел живлення.

**Мета статті.** Удосконалити методику визначення збитків від пошкоджень в розподільних лініях та розподільних електромережах в цілому з урахуванням їх структури.

**Основні матеріали дослідження.** Найчастіше в експлуатації для пошуку пошкодження в аварійно вимкненої лінії застосовується метод послідовного поділу лінії лінійними роз'єднувачами і пробного вмикання, починаючи з найближчого до центру живлення. До інших стратегій пошуку пошкодження належать, наприклад, мінімізація недовідпуску електроенергії споживачам електромережі за процес діагностування пошкодження або спосіб якнайшвидшого відновлення електропостачання найвідповідальніших споживачів.

На рис. 3.1 показана схема ПЛ, яка живиться від РТП1, комутується масляним (вакуумним) вимикачем В1, має три відгалуження від магістралі з секціонувальними роз'єднувачами РЛ1, РЛ3 та РЛ5. В магістралі лінії встановлено два секціонувальних роз'єднувача РЛ2 та РЛ4, в кінці магістралі встановлено роз'єднувач РЛ6 (в нормальному режимі знаходиться у розімкненому стані) для забезпечення можливості подачі на лінію резервного живлення від іншого джерела – РТП2, по повітряній лінії, яка приєднана до шин цієї підстанції через вимикач В2.

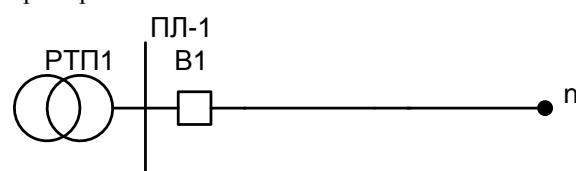


Рис. 2 – Схематичне представлення розподільної ПЛ

Проаналізуємо наслідки аварійних пошкоджень (к.з.) в такій повітряній лінії (рис. 3.2), що обладнана лише секціонувальними роз'єднувачами для поділу лінії під час пошуку пошкоджень та виконання

ремонтних робіт, оперування якими має здійснюватись без напруги. Лінія не має ні ПАС, ні ПАВР.

Міжфазне к.з. на будь-якій ділянці лінії призводить до вимикання струму к.з. за командою РЗ вимикачем В1 в голові лінії – лінія втрачає живлення.

При цьому очікувані річні збитки від недовідпуску електроенергії споживачам визначаються за виразом:

$$Z = P_{\Sigma} \cdot y_p \cdot t, \quad (1)$$

де  $P_{\Sigma}$  – активна потужність споживання приєднаних до лінії споживачів електроенергії;

$y_p$  – питомі збитки від перерв в електропостачанні, грн/(кВт·год);

$t$  – тривалість аварійно вимкненого стану розподільних ліній

$$t = \alpha \cdot l_{\Sigma}, \quad (2)$$

$\alpha$  – питома річна тривалість аварійно вимкненого стану розподільних ліній, (год/рік·км);

$l_{\Sigma}$  – сумарна довжина вимкненої лінії.

Питома річна тривалість аварійно вимкненого стану розподільних ліній визначається з урахуванням [4]

$$\alpha = \lambda \tau,$$

де  $\lambda$  – частота аварійних вимикань, (рік км)<sup>-1</sup>;

$\tau$  – статистична оцінка тривалості аварійних вимикань, год.

Отже, в загальному випадку річні збитки від недовідпуску електроенергії внаслідок знеструмлення з урахуванням питомої річної тривалості аварійно вимкненого стану розподільних ліній можна оцінити за виразом

$$Z = P_{\Sigma} l_{\Sigma} y_p \alpha, \quad (3)$$

Якщо аналізуються очікувані витрати часу на діагностичні заходи з пошуку місця пошкодження на кожному кроці процесу пошуку пошкодження в конкретній схемі лінії, то для розрахунку очікуваних збитків від недовідпуску електроенергії споживачам за час виконання діагностичних заходів у разі к.з. можна користуватись виразом

$$Z = \sum_{i=1}^m \left( \sum_{j=1}^l P_i \cdot y_p t_j \right), \quad (4)$$

де  $P_i$  – активна потужність  $i$ -го знеструмленого споживача;

$m$  – кількість переїздів ОВБ в процесі пошуку пошкодження в лінії;

$g - l$  – ділянки мережі, знеструмлені на час переїздів ОВБ та виконання комутаційних перемикань на кожному кроці процесу пошуку пошкодження в лінії від 1 до  $m$ ;

$t_j$  – витрати часу на діагностичні заходи з пошуку місця пошкодження на кожному  $j$ -му кроці процесу пошуку пошкодження в лінії,

$$t_j = \frac{L_j}{V_j}, \quad (5)$$

$L_j$  – загальний шлях, який необхідно подолати ОВБ під час  $j$ -го переїзду в процесі виконання діагностичних операцій з пошуку пошкодження в лінії;

$V_j$  – швидкість руху ОВБ під час  $j$ -го переїзду.

Оскільки стратегія пошуку передбачає об'їзд бригадою всієї лінії з послідовним виконанням операцій поділу її секціонувальними роз'єднувачами аж до моменту виявлення місця пошкодження, величина очікуваних експлуатаційних витрат на діагностичні заходи може знаходитись у досить широкому діапазоні, залежно від конфігурації лінії та місця к.з. в ній.

При цьому експлуатаційні витрати на пошук пошкодження складаються в основному з витрат на транспорт та витрат на заробітну платню персоналу ОВБ під час об'їзду ОВБ  $n$  ділянок лінії та виконання в електромережі  $m$  необхідних оперативних перемикань:

$$B = (c \cdot g / 100 + a_a) \sum_{i=1}^n L_i + p \sum_{j=1}^m y_j T_j, \quad (6)$$

де  $c$  – вартість автомобільного пального, грн/л;

$g$  – питомі витрати автомобільного пального, л/100 км;

$a_a$  – амортизаційні відрахування на автотранспорт, грн/км;

$L_i$  – відстань  $i$ -го переїзду ОВБ, км;

$p$  – кількість членів бригади, осіб.;

$y_j$  – кількість умовних одиниць (у.о.) на виконання  $j$ -ї комутації мережі;

$T_j$  – тариф на виконання  $j$ -ї комутаційної операції, грн/у.о.

**Висновки.** Діагностування аварійних пошкоджень в розподільних ПЛ, обладнаних лише секціонувальними роз'єднувачами, має здійснюватись на основі математичної моделі, що дає змогу виконати порівняння відповідних показників ефективності, величина яких враховує експлуатаційні витрати на пошук місця пошкодження та збитки від перерв електропостачання і залежить від розташування в лінії точки, де виникло пошкодження. Вибір оптимальної стратегії розвитку діагностування аварійних пошкоджень залежить від структурної побудови як ліній так розподільних електромереж в цілому та їх техніко-економічних характеристик.

#### Список літератури

1. Прусс В. Л. Повышение надежности сельских электрических сетей / В. Л. Прусс, В. В. Тисленко. - Л.: Энергоатомиздат, 1989.-209 с.
2. Пункт сетевого АВР с применением вакуумных реклоузеров РВА/TEL-10 / [А. С. Галичий, В. И. Рябоконь, В. Е. Лаврентев и др.].- Электрические сети и системы. – 2006. - №1. - С. 14-20.
3. Рейтер А. И. Определитель поврежденной линии при однофазных замыканиях на землю в сетях 6 – 35 кВ с изолированной нейтралью / А. И. Рейтер, Д. В. Батулько // Энергетик. – 2002. - № 4. – С. 40.
4. Праховник А. В. Информационно-измерительные системы в SMART GRIDS технологиях / А. В. Праховник, А. В. Волошко // Энергетика та електрифікація. – 2010. - № 9. – С. 43 – 48.

References (transliterated)

1. Pruss V. L. Povyishenie nadezhnosti selskih elektricheskikh setey / V. L. Pruss, V. V. Tislenko. - L.: Energoatomizdat, 1989.-209 s.
2. Punkt setevogo AVR s primeneniem vakuumnykh reklouzerov PBA/TEL-10 / [A. C. Galichiy, V. I. Ryabokon, V. E. Lavrentev i dr.].- Elektricheskie seti i sistemy. – 2006. - №1. - S. 14-20.
3. Reyter A. I. Opredelitel povrezhdennoy linii pri odnofaznykh zamyikaniyah na zemlyu v setyah 6 – 35 kV s izolirovannoy neytralyu / A. I. Reyter, D. V. Batulko // Energetik. – 2002. - № 4. – S. 40.
4. Prahovnik A. V. Informatsionno-izmeritelnyie sistemyi v SMART GRIDS tehnologiyah / A. V. Prahovnik, A. V. Voloshko // Energetika ta elektrifikatsiya. – 2010. - № 9. – S. 43 – 48.

Надійшла (received) 27.12.2017

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Мірошник Олександр Олександрович (Мирошник Александр Александрович, Miroshnyk Oleksandr Oleksandrovych)** – доктор технічних наук, професор кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту ННІ ЕКТ ХНТУСГ ім. Петра Василенка, м. Харків; тел. (057) 712-34-32; e-mail: omiroshnyk@ukr.net.

**Черкашина Вероніка Вікторівна (Черкашина Вероника Викторовна, Cherkashyna Veronika Viktorovna)** – кандидат технічних наук, доцент кафедри передачі електричної енергії НТУ «ХПІ», м. Харків; тел. (057) 707-62-46; e-mail: veronika2473@gmail.com.

**Пазій Володимир Григорович (Пазій Владимир Григорьевич, Paziy Volodymyr Grygorovych)** – старший викладач кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту ННІ ЕКТ ХНТУСГ ім. Петра Василенка, м. Харків; тел. (057) 712-52-45; e-mail: pazziy@ukr.net.

**Дишлевський Андрій Володимирович (Дишлевський Андрей Владимирович, Dyshlevsky Andriy Volodymyrovych)** – студент ННІ ЕКТ ХНТУСГ ім. Петра Василенка, м. Харків; тел. (057) 712-34-32.

Укладач: С. О. Федорчук, аспірант.

УДК 638.1

**Ю. К. САНИН****АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ УЛЬТРАФІОЛЕТОВОГО ОПРОМІНЮВАННЯ НА БІООБ'ЄКТИ**

Представлені результати аналітичних досліджень впливу електромагнітних опромінювань оптичного спектру на біооб'єкти в УФ діапазоні (UVB, UVC) і зокрема на патогенну мікрофлору, яка є рознощиком різних інвазійних і інфекційних хвороб у бджільництві, в тому числі такої як варроатоз. Вперше отримані математичні вирази, що моделюють залежності електроенергетичних і конструктивних характеристик захисних пристроїв, що реалізують функціонування льоткових приставок ЛПРС-1 забезпечених світлодіодними модулями УФ випромінювання при живленні їх від сонячних фотоелементів. Виготовлення захисних пристроїв з науково обґрунтованими параметрами дозволяє оптимізувати потужність і кількість світлодіодів УФ випромінювання, розміщення їх в тунелі льоткової приставки, визначити довжину хвилі, експозицію, а також геометричні параметри льоткової приставки ЛПРС-1, які забезпечують згубне УФ випромінювання на фізіологічні функції кліща Варроа.

**Ключові слова:** енерго і ресурсощадні технології, ультрафіолетове випромінювання, довжина хвилі ультрафіолетового спектру, доза опромінення, еритемний потік, джерело випромінювання, бджола, кліщ Варроа деструктор.

**Ю.К. САНИН****АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА БИООБЪЕКТЫ**

Представлены результаты аналитических исследований влияния электромагнитных облучений оптического спектра на биообъекты в УФ диапазоне (UVB, UVC) и в частности на патогенную микрофлору, которая является разнощиком различных инвазионных и инфекционных болезней в пчеловодстве, в том числе такой как варроатоз. Впервые получены математические выражения, моделирующие зависимости электроэнергетических и конструктивных характеристик защитных устройств, реализующих функционирования летковыми приставками ЛПРС-1 обеспеченных светодиодными модулями УФ излучения при питании их от солнечных фотоэлементов. Изготовление защитных устройств с научно обоснованными параметрами позволяет оптимизировать мощность и количество светодиодов УФ, размещение их в туннеле летковой приставки, определить длину волны, экспозицию, а также геометрические параметры летковой приставки ЛПРС-1, которые обеспечивают пагубное УФ излучение на физиологические функции клеща Варроа.

**Ключевые слова:** ресурсо и энергосберегающие технологии, ультрафиолетовое излучение, длина волны ультрафиолетового спектра, доза облучения, эритемный поток, источник излучения, пчела, клещ Варроа деструктор.

**YU.K. SANIN****ANALYTICAL STUDIES OF THE INFLUENCE OF UV ON BIOOBJECTS**

The results of analytical studies of the influence of electromagnetic radiation of the optical spectrum on bioobjects in the UV range (UVB, UVC) and, in particular, on pathogenic microflora, which is the carrier of various invasive and infectious diseases in beekeeping, including such as varroathosis, are presented. For the first time, mathematical expressions were obtained that simulate the dependence of the electrical and structural characteristics of protective devices that implement the operation of the LPRS-1 pilot fittings equipped with LED-modules of UV radiation when powered from solar photocells. The manufacture of protective devices with scientifically grounded parameters allows to optimize the power and quantity of UV light emitting diodes, their placement in the tunnel of the air console, determine the wavelength, exposure, as well as the geometric parameters of the LPRS-1 airborne equipment that provide harmful UV radiation to the physiological functions of the tick Varroa

**Keywords:** resource and energy-saving technologies, ultraviolet radiation, ultraviolet wavelength, irradiation dose, erythema flow, radiation source, bee, varroa destructor

**Постановка проблеми.** Визначальною умовою гармонійного поєднання розв'язання задач економіки та екології, які постають перед виробниками сільськогосподарської продукції, може бути впровадження прогресивних ресурсощадних електротехнологій, які підвищують ефективність виробничих процесів та культуру виробництва в галузі. Так, наприклад, в бджільництві перспективним напрямом підвищення ефективності боротьби з таким паразитарним інвазійним захворюванням, як варроатоз вважають створення нових конструкцій, в яких за рахунок поєднання функцій ресурсозбереження і функції обробки бджіл ультрафіолетовим випромінюванням будуть сприяти підвищенню рентабельності галузі [1,2].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На основі проведеного аналізу відомих засобів і способів боротьби з варроатозом та критичного аналізу їх переваг і недоліків можна вважати, що існуючі підходи до лікування такої хвороби бджіл як варроатоз не в повній мірі задовольняють зооветеринарні та санітарні вимоги щодо збереження

та нарощування біопотенціалу бджолосімей. Питання фізичних (зоотехнічних) засобів та методів боротьби з інвазією кліща Варроа деструктор розглядається в ряді робіт вітчизняних і зарубіжних авторів [3,4,5]. Аналіз наукових досліджень виявив відсутність узагальненої методології фізичних засобів і способів боротьби з варроатозом, а також відсутність комплексного підходу щодо створення відповідних електротехнологічних установок на базі високоефективних джерел оптичного випромінювання (УФ) діапазону. Виявлено, що під впливом ультрафіолетових променів у самок різко активізується перистальтика кишків, відмічаються маневрні рухи, фосфоресценція хітинового покриву. При опроміненні під лампою Q-400 на відстані від робочої поверхні 34,0 – 16,0 см та експозиції 10 хвилин через 17 годин загинуло 100 % кліщів Варроа [3].

Системний аналіз науково-технічної літератури показав, наприклад, що японськими вченими Октсука К. і Осакабе [4] встановлено факт загибелі павутинних кліщів від опромінення їх

© Ю. К. Санін, 2018



електромагнітним випромінюванням ультрафіолетового спектру UVB (280- 315нм). Однак, у науковій літературі відсутні дані про летальний вплив на комах при електромагнітному опроміненні їх ультрафіолетовим спектром UVA та UVB (315-400 нм)

Крім того, в роботах, присвячених електротехнологіям використання спектру електромагнітного випромінювання в області короткохвильового діапазону для боротьби з патогенною мікрофлорою і фауною відсутня інформація щодо конструкції захисних пристроїв, їх геометричних параметрів, експозиції для ефективної боротьби з варроатозом бджіл.

Таким чином, можна стверджувати, що актуальним науково-прикладним завданням яке б сприяло подальшому розвитку галузі бджільництва в Україні є обґрунтування параметрів і режимів процесу лікування бджіл УФ спектром оптичного випромінювання та розробка конструкцій спеціальних засобів для реалізації означеного процесу.

**Мета статті.** Аналітичні дослідження спрямовані на розробку фізичних методів боротьби з хворобами бджіл та оптимізацію засобів їх реалізації для підвищення ефективності виробництва бджолопродукції.

**Основні матеріали дослідження.** Здатність УФ викликати через нервові закінчення, а також через гуморальні механізми шляхом переносу створених активних речовин током крові з місця утворення в інші органи, викликаючи неспецифічні реакції організму, має велике практичне значення, так як свідчить про результативне застосування не тільки загального, але і локального опромінення [6].

Для реалізації робочої гіпотези підвищення ефективності боротьби з варроатозом бджіл та збереження їх потенціалу нами обґрунтована нова конструкція установки, в якій вплив на кліща Варроа буде здійснюватися електромагнітним випромінюванням ультрафіолетового спектру світлодіодів. Установка для УФ опромінення бджоли і кліща включає льоткову приставку, світлодіоди, джерело живлення світлодіодів, захисну решітку, систему комутації та керування. Конструктивно-технологічна схема ЛПРС-1 забезпеченої модулем УФ опромінення наведена на рис. 1

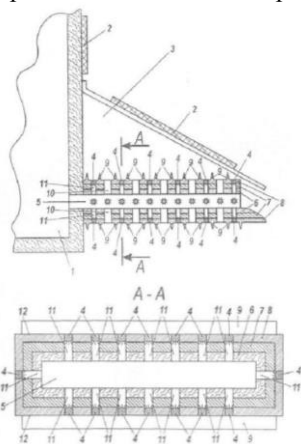


Рис. 1 – Конструктивно-технологічна схема льоткової Приставки ЛПРС-1

1 – корпус вулика; 2 – геліоколектори; 3 – льоткова приставка; 4 – джерела УФ опромінення; 5 – тунель; 6 – внутрішній шар; 7 – проміжний шар; 8 – зовнішній шар; 9 – пластини у вигляді ребер; 10 – отвори; 11 – канали для проходження УФ променів; 12 – зовнішній кожух

Для коректності дослідження біооб'єкта будемо розглядати кліща, як деякий специфічний приймач променевої енергії. Його можна характеризувати відносною спектральною чутливістю, яка визначається відношенням мінімальної кількості опромінення з заданою довжиною хвилі, що забезпечує таку ж еритемну дію. При цьому еритемний потік визначається, як випромінювання, яке оцінюється по його спроможності пагубної дії на кліща, мер (1).

$$F = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \varphi(\lambda) \kappa(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

де  $\kappa(\lambda)$  – відносна еритемна ефективність випромінювання;

$\varphi(\lambda)$  – величина спектральної інтенсивності потоку випромінювання,  $\varphi(\lambda) = \frac{dF}{d\lambda}$ , Вт·нм<sup>-1</sup>.

У якості вихідної цільової функції використаємо математичну модель, яка дає змогу моделювати параметри льоткової приставки та визначити потужність світлодіодів і їх кількість. Реалізація означеної моделі є рішення системи нерівностей по векторному критерию (2)

$$H_{\min}^{\circ} \leq H_j^{\circ}(\lambda, a, t, h) \leq H_{\max}^{\circ} \quad (2)$$

$$H_i^{\circ}(\lambda, a, t, h) \geq H_{\max}^{\circ}$$

Вразі необхідності пошуку найкращого значення вектору змінних, які вираховуються при обмеженнях

$$\lambda_{\min} \leq \lambda \leq \lambda_{\max}$$

$$a_{\min} \leq a \leq a_{\max}$$

$$t_1 \leq t \leq t_2$$

$$h_1 \leq h \leq h_2$$

$H_{\min}^{\circ}, H_{\max}^{\circ}$  – граничні значення інтервалу дози еритемного потоку за межами якого бджола і кліщ не виживають (0,125; 0,667).

Вектор критеріїв  $H_j^{\circ}(\lambda, a, t, h)$  і  $H_i^{\circ}(\lambda, a, t, h)$  охоплює простір еритемної дози для бджоли ( $j$ ) і кліща ( $i$ ) при опроміненні в УФ-В з різною довжиною хвилі  $\lambda$ , математичне представлення якої має вигляд (4)

– доза еритемного потоку, яка діє на бджолу і кліща, Мер·с·см<sup>-2</sup>

$$H_{ji}^{\circ}(\lambda, a, h) = \int_{t_1}^{t_2} S_{ji} \frac{F_y(\lambda, a, h)}{t} dt, \quad (4)$$

– загальна потужність УФ установки, яка діє на площину льоткової приставки визначається (5)

$$F_y(\lambda, a, h) = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_{\text{сiд}} \cdot k_{\text{ноз}} \cdot \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \int_{a_{\min}}^{a_{\max}} \int_{h_1}^{h_2} a \cdot b \frac{A \cdot k_{\text{еф}}(\lambda) \cdot h^2 \cdot \Phi(\lambda)}{\tau \cdot h_n^2} d\lambda \cdot da \cdot dh, \quad (5)$$

де  $k_{\text{еф}}$  – коефіцієнт біологічної ефективності в залежності від довжини хвилі;

$h$  – висота льоткової приставки, см;

$\Phi$  – порогове значення світлового потоку при одній біодозі, Мер·с·см<sup>2</sup>;

$h_n$  – нормована висота установки УФ джерела для однієї біодози, см;

$t$  – час перебування бджоли і кліща в еритемній зоні, с;

$S_{ji}$  – розрахункова площа поверхні бджоли і кліща, см<sup>2</sup>.

Адекватність математичної моделі оцінюється виходячи із того, що:

а) бджола та кліщ, який знаходиться на ній, проходять у вулик через тунель льоткової приставки;

б) рівень опромінення бджоли та кліща залежить від геометричних розмірів льоткової приставки (довжина, висота);

г) термін опромінення бджоли та кліща залежить від швидкості руху бджоли по тунелю льоткової приставки;

д) доза опромінення біооб'єкту залежить від кількості та потужності джерела УФ випромінювання;

г) якщо біодоза діюча на бджолу не перевищує порогову дозу, то опромінення ефективно діє на бджолу;

ж) якщо біодоза, діюча на кліща, перевищує порогову дозу, то кліщ гине, а рівень опромінення вважається ефективним.

Для спрощення практичного застосування математичної моделі використовуються наступні припущення:

1) коефіцієнт біологічного поглинання бджоли і кліща не враховуються;

2) враховується середнє значення розміру бджоли та кліща;

3) бджола розглядається у формі циліндра.

Для розрахунку параметрів, які моделюють процес взаємодії біооб'єкта і електромагнітного УФ випромінювання, з застосуванням запропонованої математичної моделі використані такі інтервали вхідних величин:

- довжина хвилі УФ випромінювання спектру В і С в діапазоні  $\lambda_{\max} = 265 \text{ нм} \div \lambda_{\min} = 315 \text{ нм}$  з кроком зміни  $\Delta\lambda = 5 \text{ нм}$ ;

- довжина льоткової приставки  $a_{\max} = 20 \text{ см} \div a_{\min} = 2 \text{ см}$  з кроком  $\Delta a = 2 \text{ см}$ ;

- термін перебування бджоли і кліща в еритемній дозі  $t_1 = 2,5 \text{ с} \div t_2 = 25 \text{ с}$  з кроком  $\Delta t = 2,5 \text{ с}$ ;

- висота льоткової приставки  $h_1 = 1 \text{ см} \div h_2 = 3 \text{ см}$  з кроком  $\Delta h = 1 \text{ см}$ ;

- доза опромінення  $A = 0,2 \div A = 0,6$  з кроком  $\Delta A = 0,1$ , в.о.;

- розрахункова усереднена площа поверхні бджоли  $S_j = 1,1 \text{ см}^2$ ;

- розрахункова усереднена площа поверхні кліща  $S_i = 0,02 \text{ см}^2$ .

В результаті числового моделювання були отримані дані на основі яких побудовані залежності опромінення установки  $F_{\text{ус}}$  від довжини льоткової приставки при довжині хвилі  $\lambda = 297 \text{ нм}$ , які представлені на рис.2.

Аналіз залежностей (рис.2) показує, що значення опромінення установки необхідно збільшувати при збільшенні довжини та висоти льоткової приставки, а її оптимальними параметрами є: довжина тунелю приставки  $a = 8 \text{ см}$ , його висота  $h = 1 \text{ см}$ , споживана потужність джерелами УФ установки, яка діє на робочу площину льоткової приставки –  $25 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}$ .

Отримані значення залежностей (рис.3 і рис.4) дозволяє зробити висновок, що біодоза яку одержує кліщ та бджола залежить від часу перебування їх в зоні опромінення та висоти льоткової приставки. Кліщ і бджола перебувають під опроміненням одночасно, але рівень біодози отримують різний.

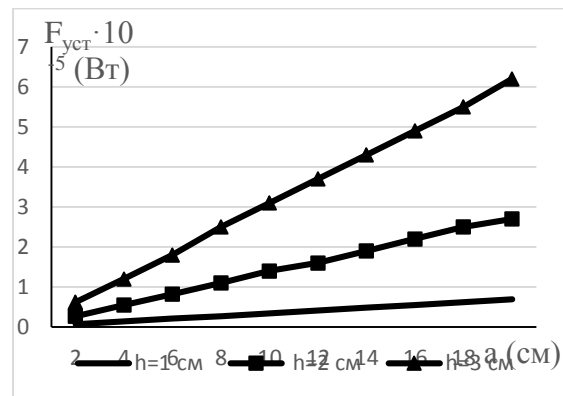


Рис. 2 – Залежність опромінення установкою  $F_{\text{ус}}$  від її

геометричних параметрів з дозою опромінення  $A = 0,6$  від нормованої дози при довжині хвилі  $\lambda = 297 \text{ нм}$

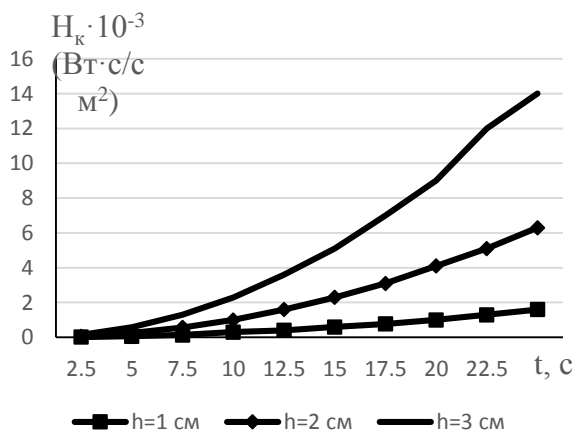


Рис. 3 – Залежність біодози отриманої кліщем  $H_k$  під час перебування в зоні опромінення з дозою  $A =$

0,6 при довжині хвилі  $\lambda = 297$  нм та висоті льоткової приставки  $h_1 = 1$  см;  $h_2 = 2$  см;  $h_3 = 3$  см

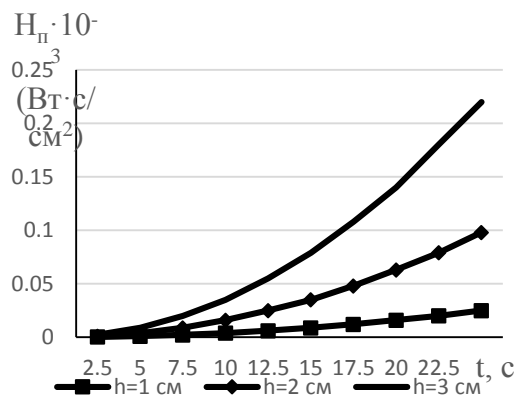


Рис. 4 – Залежність біодози бджоли  $H_n$  від часу перебування в зоні опромінення з дозою опромінення  $A = 0,6$  при довжині хвилі  $\lambda = 297$  нм та висоті льоткової приставки  $h_1 = 1$  см;  $h_2 = 2$  см;  $h_3 = 3$  см

Біодоза яку отримує бджола перебуваючи під впливом опромінення складає  $(0,01-0,02) \cdot 10^{-3}$  Вт·с/см<sup>2</sup>. Ця величина опромінення входить в нормовану дозу для тварин і тому не призводить до летальної дії на бджолу.

Біодоза яку отримує кліщ перебуваючи під впливом опромінення складає  $(0,5-1,0) \cdot 10^{-3}$  Вт·с/см<sup>2</sup>. Ця величина опромінення не входить в нормовану дозу для тварин і тому діє летально на кліща.

**Висновки.** 1. Аналіз науково-технічних джерел виявив відсутність обґрунтованої методології щодо комплексного підходу створення сучасних світлотехнічних електроустановок діючих на біооб'єкти з покращеними енергетичними, біологічними характеристиками з застосуванням спеціальних джерел оптичного УФ випромінювання.

2. Аналітичні розробки дали можливість оптимізувати параметри і режими роботи льоткової приставки забезпеченої світлодіодним модулем УФ випромінювання.

3. Рекомендовано функціональні енерго і ресурсоощадні параметри льоткової приставки ЛПРС-1: довжина тунелю  $a = 8 \pm 0,1$  см, висота тунелю льоткової приставки  $h = 1 \pm 0,1$  см, кількість світлодіодів 6-8 шт., струмом  $I = 20$  мА, напругою живлення  $U = 4$  В в залежності від дози опромінення установки та довжини хвилі УФ спектру.

#### Список літератури

1. Курьшев В. П. Бактерицидные лампы в пчеловодстве / В. П. Курьшев, Р. В. Курьшев. – Режим доступа <http://stroyroy.ru/beekeeping>. – Дата звертання: 30 вересня 2017.
2. Романченко М.А. Дослідження дезінфікуючої дії УФ у забезпеченні збереження біопотенціалу бджолоосімей / М.А. Романченко, І.Г. Маслій, М.П. Кунденко, Ю.К. Санін, О.С. Цехмейстер // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Технологія виробництва і переробки продукції тваринництва – 2015. – Вип.223. – С. 162-167.
3. Романченко М.А. Обґрунтування параметрів пристрою для дослідження впливу ультрафіолетового опромінення на біооб'єкти в бджільництві: зб. наук. праць «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України» / М.А. Романченко, О.С. Нікітіна // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. – Харків, 2013. – Вип.141. – С. 122-123.
4. Ohtsuka K., and Osakabe M. Deleterious effects of UV-B radiation on herbivorous spidermites They can avoid it by remaining on jawer leaf surfaces, Environ. Entomol – 2009. 38, 920-929.
5. Zhanq C. Y. UV-A exposures on longevity and reproduction in *Helicoverpa armigera*, and on the development of its F generation. Insect Sci. 18, – 2011. P. 697-702.
6. Паи. 82214 Вулик з пристроєм для боротьби з вароатозом бджіл фізичним методом / Романченко М. А., Нікітіна О. С., Санін Ю. К., Романченко В.М., Нікітін С. П., Червінський Л. С.; заявник і патентообладач Харків МПК6 А01К 47/00; опубл. 25.07.2013, Бюл. №14.

#### References (transliterated)

1. Kuryshv VP P. Bactericidal lamps in beekeeping / V. P. Kuryshv, R. V. Kuryshv. - Access mode <http://stroyroy.ru/beekeeping>. - Date of the Beatles: 30 November 2017
2. Romanchenko M.A. Investigation of the disinfectant effect of UV in preserving biopotential of bee colonies / M.A. Romanchenko, IG Masliy, MP Kundenko, Yu.K. Sanin, O.S. Tsekheimer // Scientific Bulletin of the National University of Bioresources and Natural Resources of Ukraine. Series: Techno-logy of production and processing of livestock products - 2015. - Vip.223. - P. 162-167.
3. Romanchenko MA Substantiation of device parameters for studying the influence of ultraviolet irradiation on bio-objects in bee-keeping: Sob. sciences Works "Problems of Energy Supply and Energy Conservation in the AIC of Ukraine" / M.A. Romanchenko, O.S. Nikitin // Bulletin of the KHNTUZG them. P. Vasilenka - Kharkiv, 2013. - Vip.141. - P. 122-123
4. Ohtsuka K., and Osakabe M. Deleterious effects of UV-B radiation on herbivorous spidermites They can avoid it by remaining on jawer leaf surfaces, Environ. Entomol – 2009. 38, 920-929.
5. Zhanq C. Y. UV-A exposures on longevity and reproduction in *Helicoverpa armigera*, and on the development of its F generation. Insect Sci. 18, – 2011. P. 697-702.
6. Shares. 82214 Vulik with add-in for Borotby with varoatosis бджіл by phizic method / Romanchenko MA, Nikitina O. S., Sanin Yu. K., Romanchenko V.M., Nikitin S. P., Chervin's'kyi L.S. ; patent applicant and patent holder Kharkiv IPC6 A01K 47/00; publ. 07/25/2013, Byul. №14

Надійшла (received) 24.11.2017

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Санін Юрій Костянтинович (Sanin Yuriy Konstantinovich)** – аспірант, Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, аспірант кафедри інтегровані електротехнології та процеси: тел.: (050) 712-28-33; e-mail: betso@ukr.net.

Укладач: С. О. Федорчук, аспірант.

*Л. В. СЕМЕНЕНКО***ПРОБЛЕМИ НОРМУВАННЯ ПИТОМИХ ВИТРАТ ПАЛИВНО-ЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕСУРСІВ В УСТАНОВАХ БЮДЖЕТНОЇ СФЕРИ**

В статті описується дійсний стан нормування питомих витрат паливно-енергетичних ресурсів установами бюджетної сфери Харківської області. Описані недоліки від використання розрахунково-аналітичного методу визначення норм, виявлена доцільність доопрацювання методичних рекомендацій з нормування питомих витрат паливно-енергетичних ресурсів.

**Ключові слова:** норми питомих витрат паливно-енергетичних ресурсів, установи і організації бюджетної сфери, енергозбереження, виробництво продукції, надання послуг, енергетичний менеджмент.

*Л. В. СЕМЕНЕНКО***ПРОБЛЕМЫ НОРМИРОВАНИЯ УДЕЛЬНЫХ РАСХОДОВ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ В УЧРЕЖДЕНИЯХ БЮДЖЕТНОЙ СФЕРЫ**

В статье описывается действующее состояние нормирования удельных расходов топливно-энергетических ресурсов учреждениями бюджетной сферы Харьковской области. Описаны недостатки от использования расчетно-аналитического метода определения норм, выявлена целесообразность доработки методических рекомендаций по нормированию удельных расходов топливно-энергетических расходов.

**Ключевые слова:** нормы удельных расходов топливно-энергетических ресурсов, учреждения и организации бюджетной сферы, энергосбережение, производство продукции, предоставление услуг, энергетический менеджмент.

*L. V. SEMENENKO***THE PROBLEMS OF NORMALIZATION OF SPECIFIC CONSUMPTION OF FUEL AND ENERGY RESOURCES BY THE INSTITUTIONS OF THE PUBLIC SECTOR**

The article describes the real situation of normalization of specific consumption fuel and energy resources by the institutions of the public sector of the Kharkiv region. Identified shortcomings from use of the calculation-analytical method for determining the norms, identified advisability of rework of methodological recommendations about normalization of specific consumption fuel and energy resources

**Keywords:** norms of specific consumption fuel and energy resources, institutions and organizations of the public sector, energy saving, production, provision of services, energy management.

**Вступ.** Відповідно до Закону України «Про енергозбереження» від 01.07.1994 №74-94ВР одним з основних принципів державної політики енергозбереження є наукове обґрунтування стандартизації у сфері енергозбереження та нормування використання паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР), необхідність дотримання енергетичних стандартів та нормативів при використанні палива та енергії [1]. Основним завданням нормування у свою чергу є встановлення об'єктивних планових показників енергоємності продукції, посилення збалансованості та достовірності прогнозів, а також виявлення резервів та стимулювання ефективного використання енергоресурсів у суспільному виробництві [2]. В Україні розроблено ряд галузевих, міжгалузевих та регіональних методик з нормування питомих витрат паливно-енергетичних ресурсів, в яких описано алгоритм виконання розрахунків норм. Проте при детальному аналізі методичних документів виявлено певні недоліки, що спотворюють результати розрахунків, ставлять під сумнів їх достовірність.

**Аналіз стану питання.** На виконання вимог Закону України «Про енергозбереження» від 01.07.1994 №74-94ВР [1] та постанови Кабінету Міністрів України «Про порядок нормування питомих витрат паливно-енергетичних ресурсів у суспільному виробництві» від 15.07.1997 №786 [3] обласними адміністраціями України ведеться робота з нормування питомих витрат паливно-енергетичних ресурсів на підприємствах та установах різних форм власності. Щороку до Управління паливно-

енергетичного комплексу Харківської обласної державної адміністрації розрахунки норм на розгляд та погодження надають близько 500 підприємств та організацій, в першу чергу підприємства теплопостачання, водопровідно-каналізаційного господарства та установи бюджетної сфери.

Дана стаття присвячена освітленню питань та проблем нормування питомого споживання ПЕР в закладах бюджетної сфери.

Виконуючи розрхунок норм питомих витрат ПЕР для установ і організацій бюджетної сфери необхідно керуватись Наказом Державного комітету України з енергозбереження «Про затвердження Міжгалузевих норм споживання електричної та теплової енергії для установ і організацій бюджетної сфери України» від 25.10.99 №91 [4]. Відповідно до цього наказу та інших нормативно-правових документів, що стосуються нормування питомих витрат паливно-енергетичних ресурсів, норми питомих витрат ПЕР можуть бути визначені за наступними методами: розрахунково-аналітичний, дослідний, розрахунково-статистичний, комбінований.

Переважає більшість розрахунків норм витрат паливно-енергетичних ресурсів, що надаються до Управління паливно-енергетичного комплексу Харківської обласної державної адміністрації, виконується розрахунково-аналітичним методом. Недоліки нормування питомого споживання ПЕР зазначеним способом описувалися науковцями у їх працях, зокрема Праховник А.В., д.т.н., проф., директор Інституту енергозбереження та енергоменеджменту НТУУ «КПІ» у статті «Про

«нормування» питомих витрат паливно-енергетичних ресурсів в умовах ринкових взаємовідносин», опублікованій у журналі «ЕСКО», в якості прикладу розрахунковим способом виконав визначення планових значень потреби в тепловій та електричній енергії, які показали значну розбіжність з відповідними фактичними значеннями [5].

**Постановка задачі (проблеми).** Більшість установ бюджетної сфери являються споживачами тільки електричної та теплової енергії централізованого постачання, та в окремих випадках від власних джерел тепла.

До переліку електрообладнання, що використовуються такими установами, входять в основному: для закладів освіти – пристрої освітлення, офісна техніка та електропристрої харчоблоків. Заклади охорони здоров'я окрім переліченого вище користуються рядом специфічного, у своїй більшості малопотужного, медичного обладнання.

На жаль профільний документ [4], за яким визначаються норми питомого споживання електроенергії для бюджетних установ, не дає можливості реального визначення зазначених норм, бо не передбачає індивідуального підходу до розрахунку обсягу споживання електроенергії, так як:

а) не враховує яке саме електроспоживаюче обладнання використовується в установах;

б) не враховує індивідуальні режими роботи цього обладнання.

Згідно з [4] визначення питомого обсягу планованої до споживання електроенергії виконується за формулою:

$$W_{\text{пл}} = P_{\text{пл}} \cdot T, \quad (1)$$

де  $W_{\text{пл}}$  – показник питомого споживання електроенергії в кВт\*годинах на рік у розрахунку на одиницю комплексної характеристики даної установи (будівлі), (на одну дитину, учня, студента, лікарняне ліжко, відвідувача, квадратний метр корисної площі приміщень тощо);

$P_{\text{пл}}$  – питома розрахункова електрична навантаження в кВт даної установи згідно із згаданими нормативами в розрахунку на прийняту комплексну характеристику;

$T$  – річне число годин використання розрахункового максимального навантаження в годинах на рік.

Визначені показники питомого електронавантаження та питомого споживання електроенергії громадських будівель і організацій бюджетної сфери України, значення середніх річних годин використання максимального навантаження ( $T$ ) наведені в табл. 8.1 [4].

Таблиця 1 – Аналіз фактичних даних споживання електричної енергії закладами освіти Богодухівського району Харківської області

Найменування навчального закладу Богодухівського району Харківської області	Фактична кількість учнів				Фактичний обсяг витрати електроенергії, тис. кВт*год				Фактична норма питомої витрати електроенергії, кВт*год/1 учня				Показники річного електроспоживання електроенергії для учня на одиницю виміру, кВт*год/1 учня (згідно з табл. 8.1 [4])		Норми споживання електроенергії для загальноосвітніх шкіл з електрифікованими харчоблокками (згідно з табл. 8.5 [4])			
	2013	2014	2015	2016	2013	2014	2015	2016	2013	2014	2015	2016	від	до	до 100	101-250	251-500	501-1000
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Гімназія №1, м.Богодухів	451	451	451	474	29,4	29,3	29,9	29,8	65,3	65,0	66,3	62,9	176	264	340	320	300	230
Колегіум №2, м.Богодухів	791	791	791	790	55,4	49,2	45,6	46,1	70,0	62,2	57,6	58,4	176	264	340	320	300	230
Ліцей №3, м.Богодухів	528	512	491	524	57,8	47,3	57,0	57,6	109,4	92,4	116,1	109,9	176	264	340	320	300	230
Братеницька ЗОШ I-III ст.	48	47	33	31	7,4	11,6	8,7	4,6	154,6	246,8	263,6	148,4	176	264	340	320	300	230
Губарівський НВК	64	64	65	75	22,4	18,4	25,1	23,7	350,0	287,5	386,2	316,0	176	264	340	320	300	230
Гутянська ЗОШ I-III ст.	211	207	194	200	26,0	24,1	22,3	24,6	123,0	116,4	114,9	123,0	176	264	340	320	300	230
Забродівська ЗОШ I-II ст.	45	42	40	44	11,1	10,9	12,6	10,4	246,4	259,5	315,0	236,4	176	264	340	320	300	230
Івано-Шийчинський НВК	56	54	56	46	9,5	10,7	11,2	13,5	169,4	198,1	200,0	293,5	176	264	340	320	300	230
Кленівський НВК	61	64	62	72	2,8	2,2	4,7	3,3	46,6	34,4	75,8	45,8	176	264	340	320	300	230
Кручанська ЗОШ I-III ст.	67	55	37	25	5,9	4,6	3,6	2,7	88,4	83,6	97,3	108,0	176	264	340	320	300	230
Крисинський НВК	151	140	149	163	42,0	29,3	25,0	25,4	278,1	209,3	167,8	155,8	176	264	340	320	300	230
Максимівська ЗОШ I-II ст.	43	41	37	39	18,8	14,7	15,2	10,7	437,6	358,5	410,8	274,4	176	264	340	320	300	230
Матвійська ЗОШ I-III ст.	49	45	39	32	4,2	3,0	3,6	2,0	85,5	66,7	92,3	62,5	176	264	340	320	300	230
Павлівська ЗОШ I-II ст.	67	65	69	75	5,1	5,6	5,4	4,8	75,7	86,2	78,3	64,0	176	264	340	320	300	230
Петропавлівський НВК	42	46	46	49	6,5	5,7	8,1	10,0	154,4	123,9	176,1	204,1	176	264	340	320	300	230
Полковомикітківська ЗОШ I-III ст.	121	111	107	103	9,9	14,6	11,4	8,3	81,5	131,5	106,5	80,6	176	264	340	320	300	230
Сазоно-Баланівська ЗОШ I-II ст.	44	42	43	56	6,5	7,7	6,8	5,7	147,0	183,3	158,1	101,8	176	264	340	320	300	230
Семеновська ЗОШ I-II ст.	53	57	55	48	3,7	4,5	6,1	3,6	69,4	78,9	110,9	75,0	176	264	340	320	300	230
Сіннянська ЗОШ I-II ст.	30	32	30	26	12,2	10,0	5,8	6,0	408,2	312,5	193,3	230,8	176	264	340	320	300	230
Ульянівська ЗОШ I-III ст.	132	127	119	107	12,8	14,7	14,4	14,4	97,0	115,7	121,0	134,6	176	264	340	320	300	230
Хрушовикутківська ЗОШ I-II ст.	49	47	44	45	2,7	2,0	1,8	1,0	55,4	42,6	40,9	22,2	176	264	340	320	300	230
Червононівський НВК	37	34	40	38	10,0	8,4	8,5	10,0	270,3	247,1	212,5	263,2	176	264	340	320	300	230
Шарівська ЗОШ I-III ст.	152	156	145	150	39,3	33,5	27,5	27,8	258,2	214,7	189,7	185,3	176	264	340	320	300	230

Згідно з пунктом 8.10 [4] у проектні розрахункові (максимальні) норми електронавантаження та «споживану потужність» (за паспортами типових проектів) закладені коефіцієнти запасу для забезпечення системи електропостачання від масових пошкоджень в екстремальних ситуаціях. Тому для наближення показників електроспоживання до реальних рівнів при дослідженні типових проектів річні числа годин використання потрібної потужності ( $T$ ) зменшені на 35÷50 %.

Виконавши розрахунок за зазначеним алгоритмом маємо значне відхилення розрахункової норми питомої витрати електричної енергії на одиницю комплексної характеристики даної установи від фактичного відповідного значення.

З табл. 1 даної статті видно, що фактичні норми питомої витрати електричної енергії на 1 учня школами Богодухівського району Харківської області (у всіх школах наявні електрифіковані харчоблоки) значно менші за показники річного електроспоживання на одиницю виміру, кВт·год/1 учня (згідно з табл. 8.1 [4]) та норми споживання електроенергії для загальноосвітніх шкіл з електрифікованими харчоблоками (згідно з табл. 8.5 [4]).

Відповідно до галузевих, міжгалузевих методик з нормування обсяг електроенергії визначається за більш розширеною формулою з врахуванням коефіцієнтів попиту та використання, які у свою чергу визначаються або дослідним шляхом, або беруться за різними довідниками та мають значний діапазон значень.

За Типовою методикою розрахунку питомих витрат паливно-енергетичних ресурсів на виробництво продукції підприємствами галузей національної економіки України, затвердженою наказом Національного агентства України з питань забезпечення ефективного використання енергетичних ресурсів від 23.01.08р. № 9 [6] загальна формула розрахунку технологічних витрат електроенергії має вигляд:

$$W = P_{\text{потр}} \cdot T \quad (2)$$

де:

$T$  – тривалість роботи даного механізму за обліковий період, год.;

$P_{\text{номр}}$  – спожита потужність, кВт;

$$P_{\text{потр}} = K_n \cdot P_y, \quad (3)$$

де:

$K_n$  – коефіцієнт використання устаткування за потужністю (визначається на основі дослідних даних);

$P_y$  – встановлена потужність електродвигунів, кВт.

Враховуючи те, що час роботи, що береться у розрахунках є приблизним прогнозованим, а значення більшості коефіцієнтів використання відсутні в офіційних джерелах, не дивно що у результаті розрахунковий плановий обсяг споживання електроенергії, а як наслідок і норма питомої витрати електроенергії на надання послуг, значно відрізняються від фактичних.

Що стосується нормування питомої витрати теплової енергії на потреби опалення.

У розрізі розрахунку необхідного обсягу теплової енергії на забезпечення потреб опалення має місце наступна проблема. Більшість установ бюджетної сфери, значна частина яких є закладами систем освіти та охорони здоров'я, не мають типових чи індивідуальних проектів, за якими побудовані будівлі. Згідно із згаданим вище наказом Держкомергозбереження № 91, при відсутності інформації про розрахункову потужність системи опалення, річну потребу в теплоті належить вирахувати за такими формулами:

$$Q_o^{\text{пik}} = V_3 \cdot q_o \cdot (t_{\text{вн}} - t_{\text{сеп.о.}}) \cdot n_o \cdot 24 \cdot 10^{-6} \quad (4)$$

де  $V_3$  – зовнішній будівельний об'єм будівлі, м<sup>3</sup>;

$q_o$  – питома характеристика опалення будівлі при розрахунковій температурі зовнішнього повітря, ккал/(м<sup>3</sup>год°С), приймається відповідно до даних табл. 6.1 та додатків 2 і 3 [4];

$t_{\text{вн}}$  – усереднена розрахункова температура внутрішнього повітря опалюваних приміщень, °С;

$t_{\text{сеп.о.}}$  – середня температура зовнішнього повітря за опалювальний період, °С (додаток 1);

$n_o$  – тривалість опалювального періоду за кількістю днів із стійкою середньою добовою температурою зовнішнього повітря 8 °С і нижче [4];

24 – кількість годин роботи системи опалення за добу, год.

В Україні діють державні санітарні правила і норми, відповідно до яких у будівлях залежно від їх призначення мають додержуватись відповідні температури.

Для забезпечення учбового процесу, наприклад в школах, температура повітря у класах і кабінетах має бути 17÷20 °С, у позаурочний час допускається зниження до 15 °С [7]. Проте на сьогоднішній день у переважній більшості закладів має місце значне заниження температури повітря протягом усієї доби задля економії бюджетних коштів. І така ситуація спостерігається не лише у закладах освіти, а й у будівлях інших установ, що фінансуються бюджетами різних рівнів.

Що стосується температури  $t_{\text{сеп.о.}}$ , то відповідно до ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 «Будівельна кліматологія» для м.Харків цей показник становить -1,0 С [8], проте за даними метеорологічних служб [11] останні роки ця температура є дещо вищою.

Наприклад по м. Харків фактичні значення  $t_{\text{сеп.о}}$  за останні 5 років склали:

р	2	20	2	2	2
ік	012	13	014	015	016
t	-	+1	-	+	+
сеп.о	0,98	,10	0,21	1,41	0,11

Питомі опалювальні характеристики визначаються за табл. 6.1 [4], який у свою чергу посилається на Норми та вказівки по нормуванню витрат палива та теплової енергії на опалення житлових та громадських споруд, а також на господарсько-побутові потреби в Україні (КТМ 204 України 244-94) [9]. Сам керівний технічний матеріал при поясненні прийняття питомих опалювальних характеристик відсилає до ряду

видань, опублікованих у різні роки та частково спирається на аналіз даних типових проєктів.

Таблиця 2 – Аналіз фактичних даних споживання теплової енергії закладами освіти Богодухівського району Харківської області

№ п/п	Найменування навчального закладу Богодухівського району Харківської області	Планова потреба теплової енергії на опалення перерахована на фактичну температуру зовнішнього повітря та фактичну тривалість опалювального періоду, Гкал				Фактичне споживання теплової енергії на потреби опалення (визначені за показами лічильників природного газу та накладними на тверде паливо враховуючи паспортне ККД та матеріальний знос паливокористовуючого обладнання), Гкал				Відсоток перевищення планового обсягу теплової енергії на потреби опалення (перерахованого на фактичну температуру зовнішнього повітря та фактичну тривалість опалювального періоду) над відповідним фактичним значенням, %				Середньозважене значення відсотку перевищення планового обсягу теплової енергії на потреби опалення				
		Фактична температура зовнішнього повітря за опалювальний період, °С [12]				Розрахунковий період				Розрахунковий період								
		0,53	-0,48	1,13	-0,31	2013	2014	2015	2016	2013	2014	2015	2016		2013	2014	2015	2016
		179	174	175	170	2013	2014	2015	2016	2013	2014	2015	2016		2013	2014	2015	2016
1	Гімназія №1, м.Богодухів	560,6	576,4	529,5	558,2	402,3	487,0	495,7	339,4	28,2%	15,5%	6,4%	39,2%	22,5%				
2	Колегіум №2, м.Богодухів	900,6	926,0	850,6	896,8	542,9	615,0	639,8	419,9	39,7%	33,6%	24,8%	53,2%	38,0%				
3	Ліцей №3, м.Богодухів	937,5	964,0	885,4	933,5	432,7	360,8	482,1	390,1	53,8%	62,6%	45,6%	58,2%	55,2%				
4	Братеницька ЗОШ І-ІІІ ст.	345,8	355,6	326,6	344,3	404,7	390,4	395,4	298,9	-17,0%	-9,8%	-21,1%	13,2%	-8,5%				
5	Губарівський НВК	143,3	147,4	135,4	142,7	138,9	113,8	128,1	109,8	3,1%	22,8%	5,4%	23,1%	13,7%				
6	Гутянська ЗОШ І-ІІІ ст.	397,4	408,6	375,3	395,7	314,1	275,0	257,2	291,4	21,0%	32,7%	31,5%	26,4%	27,9%				
7	Забродівська ЗОШ І-ІІ ст.	150,5	154,8	142,2	149,9	92,8	93,5	115,2	108,3	38,3%	39,6%	19,0%	27,7%	31,4%				
8	Івано-Шийчинський НВК	234,8	241,5	221,8	233,8	257,1	242,4	225,5	172,1	-9,5%	-0,4%	-1,7%	26,4%	3,7%				
9	Кленівський НВК	234,8	241,5	221,8	233,8	108,9	73,3	86,2	96,7	53,6%	69,6%	61,1%	58,7%	60,8%				
10	Кручанська ЗОШ І-ІІІ ст.	162,9	167,5	153,8	162,2	121,4	110,3	122,1	109,7	25,4%	34,1%	20,6%	32,4%	28,3%				
11	Крисинський НВК	376,5	387,1	355,6	374,9	128,4	121,4	166,2	160,4	65,9%	68,6%	53,3%	57,2%	61,4%				
12	Максимівська ЗОШ І-ІІ ст.	289,2	297,4	273,1	288,0	299,7	275,3	262,9	163,3	-3,6%	7,4%	3,8%	43,3%	12,8%				
13	Матвійська ЗОШ І-ІІІ ст.	291,7	299,9	275,5	290,4	288,9	269,0	255,1	282,3	0,9%	10,3%	7,4%	2,8%	5,4%				
14	Павлівська ЗОШ І-ІІ ст.	125,2	128,7	118,2	124,7	102,7	86,6	82,5	76,8	18,0%	32,7%	30,2%	38,4%	29,8%				
15	Петропавлівський НВК	175,4	180,4	165,7	174,7	131,9	93,5	132,4	130,9	24,8%	48,2%	20,1%	25,0%	29,8%				
16	Полковомикитівська ЗОШ І-ІІІ ст.	338,3	347,8	319,5	336,8	309,4	299,7	291,4	289,5	8,5%	13,8%	8,8%	14,0%	11,4%				
17	Сазоно-Баланівська ЗОШ І-ІІ ст.	179,4	184,5	169,4	178,6	77,5	81,0	78,6	82,3	56,8%	56,1%	53,6%	53,9%	55,1%				
18	Семеновська ЗОШ І-ІІ ст.	87,4	89,9	82,6	87,1	40,5	37,0	43,4	44,6	53,7%	58,9%	47,4%	48,8%	52,3%				
19	Сіннянська ЗОШ І-ІІ ст.	144,9	149,0	136,9	144,3	172,7	141,7	160,5	132,7	-19,2%	4,9%	-17,3%	8,0%	-5,7%				
20	Ульянівська ЗОШ І-ІІІ ст.	349,6	359,5	330,2	348,1	205,9	171,0	185,5	170,7	41,1%	52,4%	43,8%	51,0%	47,2%				
21	Хрущовомикитівська ЗОШ І-ІІ ст.	164,3	169,0	155,2	163,6	124,0	106,5	41,9	134,6	24,5%	37,0%	73,0%	17,7%	37,6%				
22	Червононівський НВК	95,6	98,3	90,3	95,2	87,2	70,5	98,6	85,7	8,7%	28,3%	-9,2%	10,0%	9,8%				
23	Шарівська ЗОШ І-ІІІ ст.	481,5	495,1	454,8	479,4	349,0	291,7	243,4	281,8	27,5%	41,1%	46,5%	41,2%	39,0%				
24	ЦДЮТ Богодухівського району	297,5	306,0	281,0	296,3	306,4	205,9	239,3	242,0	-3,0%	32,7%	14,8%	18,3%	15,9%				
	Всього закладами освіти Богодухівського району	7464,6	7675,6	7050,1	7433,0	5440,0	5012,3	5229,1	4613,8	27,1%	34,7%	25,8%	37,9%	31,5%				

Відповідно до КТМ 204 України 244-94 питомі опалювальні характеристики визначені для типів будівель, які відрізняються за призначенням, зовнішнім об'ємом та часом забудови (до 1980 та після 1981 року до 2000). Тобто не враховуються індивідуальні технічні характеристики: матеріал зовнішніх огорожуючих конструкцій; їх товщина; конфігурація будівлі; впроваджені сучасні енергозберігаючі заходи, такі як встановлення

сучасних металопластикових вікон, утеплення фасадів тощо.

В табл. 2 наведено порівняння розрахункових значень річної потреби в тепловій енергії на потреби опалення, виконаних за формулою (6.4) [4] із відповідними фактичними значеннями за минулі опалювальні періоди, яке свідчить про завищення розрахункових значень над фактичними в середньому на 30%.

Що стосується професійної компетентності виконавців розрахунків.

На сьогоднішній день в установах бюджетної сфери не діє система енергоменеджменту. Переважна більшість посадових осіб, що є відповідальними за споживання паливно-енергетичних ресурсів та ведуть відповідні розрахунки, не мають технічної освіти, не розрізняють одиниці виміру споживання енергоносіїв, надають необ'єктивну інформацію до органів державної влади. Частково цю проблему могло б виправити впровадження в закладах бюджетної сфери передбаченого законодавством України Положення про матеріальне стимулювання колективів і окремих працівників підприємств, організацій та установ за економію паливно-енергетичних ресурсів у суспільному виробництві [10].

**Висновки.** Враховуючи вищевказані проблеми є необхідність до введення в дію системи енергетичних стандартів приділити увагу удосконаленню методів розрахунків норм питомих витрат паливно-енергетичних ресурсів, прискорити впровадження системи енергоменеджменту в бюджетній сфері. Для працівників установ, що фінансуються з бюджетів різних рівнів слід створити окремі більш детальні у порівнянні з [4] методичні рекомендації з нормування питомих витрат палива, теплової та електричної енергії.

Що стосується самих розрахунків, то у розрізі визначення норм питомих витрат електроенергії необхідно визначити усереднені коефіцієнти використання електрообладнання, що використовується у бюджетній сфері, та коефіцієнти попиту, оприлюднити їх у офіційних нормативних джерелах, також варто розглянути використання розрахунково-статистичного чи комбінованого методів.

У розрізі визначення норм питомих витрат теплової енергії є необхідність перегляду та доопрацювання Норм та вказівок по нормуванню витрат палива та теплової енергії на опалення житлових та громадських споруд, а також на господарсько-побутові потреби в Україні (КТМ 204 України 244-94). Прикладом такого доопрацювання може бути введення поправкових коефіцієнтів, які будуть враховувати індивідуальні технічні характеристики будівель та впроваджені енергозберігаючі заходи.

#### Список літератури

1. Закон України «Про енергозбереження» від 01.07.1994 № 74-94ВР [Електронний ресурс] // Верховна Рада України. Законодавство України. – 1994. – Режим доступу до ресурсу: <http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/74/94-%D0%B2%D1%80>. Дата звертання: 20 грудня 2017 року.
2. Наказ Державного комітету України з енергозбереження від 22.10.2002 № 112 «Про затвердження Основних положень з нормування питомих витрат паливно-енергетичних ресурсів у суспільному виробництві», зареєстрований в Міністерстві юстиції України 7 листопада 2002 р. за № 878/7166 [Електронний ресурс] // Верховна Рада України. Законодавство України. – 2002. – Режим доступу до ресурсу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0878-02>. Дата звертання: 20 грудня 2017 року.
3. Постанова Кабінету Міністрів України від 15.07.1997 № 786 «Про порядок нормування питомих витрат паливно-енергетичних ресурсів у суспільному виробництві» [Електронний

ресурс] // Верховна Рада України. Законодавство України. – 1997. – Режим доступу до ресурсу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/786-97-%D0%BF>. Дата звертання: 20 грудня 2017 року.

4. Наказ Державного комітету України з енергозбереження від 25.10.99 № 91 «Про затвердження Міжгалузевих норм споживання електричної та теплової енергії для установ і організацій бюджетної сфери України», зареєстровано в Міністерстві юстиції України 17 березня 2000 р. за № 175/4396 [Електронний ресурс] // Верховна Рада України. Законодавство України. – 1999. – Режим доступу до ресурсу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0175-00>. Дата звертання: 20 грудня 2017 року.

5. Праховник А. В. Про «нормування» питомих витрат паливно-енергетичних ресурсів в умовах ринкових взаємовідносин [Електронний ресурс] / А. В. Праховник, В. Ф. Находов, О. В. Овдієнко // ЭСКО. Электронный журнал энергосервисной компании «Экологические системы». – 2002. – Режим доступу до ресурсу: [http://journal.esco.co.ua/2002\\_6/art05.htm](http://journal.esco.co.ua/2002_6/art05.htm). Дата звертання: 20 грудня 2017 року.

6. Наказ Національного агентства України з питань забезпечення ефективного використання енергетичних ресурсів від 23.01.2008 № 9 «Про затвердження Типової Методики розрахунку питомих витрат паливно-енергетичних ресурсів на виробництво продукції підприємствами галузей національної економіки України».

7. Державні санітарні правила і норми влаштування, утримання загальноосвітніх навчальних закладів та організації навчально-виховного процесу. ДСанПіН 5.5.2.008-01. Подано листом Міністерства освіти і науки України від 05.06.2001 № 1/12-1459, затверджено постановою Головного державного санітарного лікаря України від 14.08.2001 № 63

8. Будівельна кліматологія: ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010.– [Дата введення 01.11.2011]. / Мінрегіонбуд України. – Київ: Укрархбудінформ, 2011. – 123 с. – (Національний стандарт України).

9. КТМ 204 Україна 244-94 Норми та вказівки по нормуванню витрат палива та теплової енергії на опалення житлових та громадських споруд, а також на господарсько-побутові потреби в Україні. Затверджений наказом Державного комітету України по житлово-комунальному господарству від 14.12.1993, розроблений проектним та науково-дослідним інститутом по газопостачанню, теплопостачанню та комплексному благоустрою міст і селищ України (УкрНДІнжпроект) – Київ: ЗАТ «ВПОЛ» ДК № 15, 2001. – 376 с. – (Керівний технічний матеріал).

10. Наказ Державного комітету України з енергозбереження та Міністерства економіки України від 21.06.2000 № 47/127 «Про затвердження Положення про матеріальне стимулювання колективів і окремих працівників підприємств, організацій та установ за економію паливно-енергетичних ресурсів у суспільному виробництві», зареєстрований в Міністерстві юстиції України 10 липня 2000 р. за № 405/4626 [Електронний ресурс] // Верховна Рада України. Законодавство України. – 2000. – Режим доступу до ресурсу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0405-00>. Дата звертання: 20 грудня 2017 року.

11. гр5.ua. Архів погоди в Харків (аеропорт) [Електронний ресурс] / гр5.ua – Режим доступу до ресурсу: [http://гр5.ua/Архів\\_погоди\\_в\\_Харькове\\_\(аеропорт\)](http://гр5.ua/Архів_погоди_в_Харькове_(аеропорт)). Дата звертання : 20 грудня 2017.

12. гр5.ua. Архів погоди в Богодухові [Електронний ресурс] / гр5.ua – Режим доступу до ресурсу: [http://гр5.ua/Архів\\_погоди\\_в\\_Богодухове](http://гр5.ua/Архів_погоди_в_Богодухове). Дата звертання : 20 грудня 2017.

#### References (transliterated)

1. Law of Ukraine «On Energy Saving», document №74-94ВР, 01.07.1994. Available at: <http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/74/94-%D0%B2%D1%80> (accessed December 20, 2017)
2. «The basic principles of normalization of specific consumption of fuel and energy resources in public production», approved by Order of the State Committee of Ukraine on Energy Saving 22.10.2002 № 112. Available at: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0878-02> (accessed December 20, 2017).
3. «The rules of normalization of specific consumption of fuel and energy resources in public production», approved by Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine 15.07.1997 № 786. Available at:



<http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/786-97-%D0%BF> (accessed December 20, 2017).

4. «Intersectoral norms of consumption of electric and thermal energy for institutions and organizations of the budgetary sphere of Ukraine», approved by Order of the State Committee of Ukraine on Energy Saving 25.10.1999 № 91. Available at: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0175-00> (accessed December 20, 2017).

5. Prakhovnyk A. V., Nahodov V. F., Ovdiyenko O. V. (2002), «About «normalization» of specific consumption of fuel and energy resources in conditions of market relations», ESKO, No. 6, available at: [http://journal.esco.co.ua/2002\\_6/art05.htm](http://journal.esco.co.ua/2002_6/art05.htm) (accessed December 20, 2017).

6. «Typical Methodology of calculation of specific consumption of fuel and energy resources per production by enterprises of the branches of the national economy of Ukraine», approved by Order of the National Agency of Ukraine for the Efficient Use of Energy Resources 23.01.2008 № 9.

7. «State sanitary rules and standards of placement, maintenance of general educational institutions and organization of educational process». DsanPin 5.5.2.008-01. Approved by a letter from the Ministry of Education and Science of Ukraine 05.06.2001, No 1/12-1459, approved by the decision of the Chief State Sanitary Doctor of Ukraine 14.08.2001, No 63.

8. National Standard of Ukraine N B V.1.1-27:2010. Construction Climatology. Kyiv: Ukrrahbudinform, 2011. - 123 p.

9. Guidance Material. KTM 204 Ukraine 244-94 Norms and guidelines of the normalization of consumption of fuel and heat energy for the heating of residential and public buildings, as well as for household and domestic needs in Ukraine. Approved by the order of the State Committee of Ukraine for Housing and Communal Services, December 14.12.1993. Kyiv: CJSC «VIPOL» DK No 15, 2001. - 376 p.

10. «Regulations on the material incentives of collective and individual workers of enterprises, organizations and institutions for saving fuel and energy resources in public production», approved by Order of the State Committee of Ukraine on Energy Saving and the Ministry of Economy of Ukraine 21.06.2000 № 47/127. Retrieved from: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0405-00> (accessed December 20, 2017).

11. rp5.ua. Archive of the weather in Kharkiv (airport). Available at: [http://rp5.ua/Архив\\_погоды\\_в\\_Харькове\\_\(аэропорт\)](http://rp5.ua/Архив_погоды_в_Харькове_(аэропорт)) (accessed December 20, 2017).

12. rp5.ua. Archive of the weather in Bogoduhov (airport). Available at: [http://rp5.ua/Архив\\_погоды\\_в\\_Богодухове](http://rp5.ua/Архив_погоды_в_Богодухове) (accessed December 20, 2017).

Надійшла (received) 10.01.2018

#### *Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Семененко Людмила Василівна (Семененко Людмила Васильевна, Semenenko Liudmila Vasulivna)** – головний спеціаліст відділу з енергоефективності, енергозбереження та альтернативних джерел енергії Управління паливно-енергетичного комплексу Харківської обласної державної адміністрації, тел.: (050) 261-10-59; e-mail: [liudm.semenenko@gmail.com](mailto:liudm.semenenko@gmail.com).

Укладач: С. О. Федорчук, аспірант.

**В. Е. БОНДАРЕНКО, Е. Н. ФЕДОСЕЕНКО, К. А. СТАРКОВ, А. И. ГАНУС**

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЗАЕМЛИТЕЛЕЙ ПОВЫШЕННОЙ ПРОВОДИМОСТИ РАСТЕКАНИЮ В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВУЮЩИХ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК**

Предлагается техническое решение реконструкции заземляющих устройств действующих электроустановок с целью приведения величин нормируемых параметров к допустимым значениям. Проведены теоретические исследования с использованием метода наведенных потенциалов и методов расчета разветвленных электрических цепей с распределенными параметрами для расчета электрического поля и сопротивления сложного неэквипотенциального заземлителя в земле с двухслойной структурой. Разработанные электроды повышенной проводимости растеканию смонтированы как экспериментальные образцы и участвуют в формировании электрических характеристик заземляющего устройства.

**Ключевые слова:** Заземляющее устройство, электрическая подстанция, вертикальный электрод заземления, распределение потенциала, двухслойная модель земли, метод наведенного потенциала, электропроводимость, сопротивление растеканию.

## **В. О. БОНДАРЕНКО, О. М. ФЕДОСЕЕНКО, К. О. СТАРКОВ, О. І. ГАНУС ВИКОРИСТАННЯ ВЕРТИКАЛЬНИХ ЗАЕМЛЮВАЧІВ ПІДВИЩЕНОЇ ПРОВІДНОСТІ РОЗТІКАННЮ В УМОВАХ ДІЮЧИХ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК**

Пропонується технічне рішення реконструкції заземлюючих пристроїв діючих електроустановок з метою приведення величин нормованих параметрів до допустимих значень. Проведено теоретичні дослідження з використанням методу наведених потенціалів і методів розрахунку розгалужених електричних кіл з розподіленими параметрами для розрахунку електричного поля і опору складного нееквипотенціального заземлювача в землі з двошаровою структурою. Розроблені електроди підвищеної провідності розтіканню змонтовані як експериментальні зразки і беруть участь у формуванні електричних характеристик заземлювального пристрою.

**Ключові слова:** заземлюючий пристрій, електрична підстанція, вертикальний електрод заземлення, розподіл потенціалу, двошарова модель землі, метод наведеного потенціалу, електропровідність, опір розтіканню.

## **V. O. BONDARENKO, O. M. FEDOSEENKO, K. O. STARKOV, O. I. GANUS THE USE OF VERTICAL GROUND CONDUCTORS OF HIGH CONDUCTIVITY SPREADING IN THE OPERATING ELECTRICAL INSTALLATIONS**

Purpose. A technical solution is proposed for reconstructing the complicated grounding connections of electric installation in order to bring the values of the parameters to the permissible values. This solution involves the use of an artificial ground electrode, which has a sufficiently large surface in contact with the ground. Methodology. Theoretical studies were carried out using the induced potentials method and methods for calculating branched electrical circuits with distributed parameters for calculating the electric field and the resistance of a complex nonequipotential grounding connections in a two-layer ground. Originality. The feasibility of using high conductivity electrodes in the operating electrical installations is confirmed in terms of ensuring regulatory requirements and manufacturability is confirmed. Practical value. The using of developed electrodes has reduced the calculated values of the contact voltage at the open switchgear of the substation

**Key words:** grounding device, electrical substation, vertical ground electrode, induced potential method, the potential distribution, a two-layer ground, conductivity.

**Введение.** Выполнение сложного комбинированного заземлителя должно быть таким, чтобы обеспечивалось соответствие его характеристик допустимым значением нормативных параметров. Качество выполнения функциональных заземляющих устройств (ЗУ) в значительной степени определяет безопасную эксплуатацию и нормальное функционирование электроустановок. Сложные комбинированные заземлители электроустановок конструктивно выполняются как электрически связанные между собой искусственные продольные и поперечные горизонтальные электроды заземления, образуют заземляющую сетку, и вертикальные электроды, расположенные по периметру ЗУ [1].

При коротком замыкании (КЗ) на землю на шинах РУ в сетях с эффективно заземленной нейтралью наибольший ток промышленной частоты протекает по ЗУ [2]. Средний потенциал ЗУ относительно точки с нулевым потенциалом теоретически бесконечного от ЗУ расстояния повышается. Значительные разности потенциалов оказываются приложенными ко вторичным кабелям, проходящим в пределах ЗУ объекта и выходящим за его пределы, и к соответствующим выходным аппаратам. Разность потенциалов зависит от

удельного сопротивления земли, конфигурации, сечения и материала заземлителя. Если разность потенциалов на ЗУ превысит испытательное напряжение для контрольных кабелей, подходящих к устройствам системы автоматизированных и автоматических систем технологического управления, возможно обратное перекрытие изоляции кабелей или устройств. Ток КЗ, растекаясь по заземленным оболочкам кабелей и экранам, может вызвать превышение допустимых по термической стойкости токовых нагрузок и термическое разрушение оболочек и экранов. Протекание тока КЗ в силовых ошиновках и по элементам ЗУ создает магнитное поле амплитудой до нескольких сотен А/м. Это поле создает наводки на вторичные кабели в случае их сближения с трассой протекания тока КЗ. Магнитное поле при КЗ опасно и для самой аппаратуры, если она размещается вблизи ошиновок или пути растекания тока КЗ по элементам ЗУ. Оба фактора часто действуют одновременно, вызывая значительные перенапряжения для аппаратуры и изоляции кабелей [2].

Приняв в качестве нормативного параметра ЗУ, выполняющего функцию снижения электромагнитных влияний на вторичные цепи, ЭДС,

© В. Е. Бондаренко, Е. Н. Федосеенко, К. А. Старков, А. И. Ганус, 2018

наводимую во вторичных цепях, можно отметить, что ее значение определяется продольными токами КЗ по горизонтальным естественным и искусственным заземлителям.

Снижение уровней продольных токов, протекающих по заземлителям, обеспечивает, тем самым, снижение уровня электромагнитных воздействий на вторичное оборудование. Решение как этой задачи, так и задачи доведения до нормативных значений параметров ЗУ действующих электроустановок, может быть выполнено с использованием искусственного электрода заземления, обладающего достаточно большой поверхностью, контактирующей с грунтом, при условии его технологичности. Назовем такой электрод электродом заземления повышенной проводимости растеканию тока. Использование электродов повышенной проводимости растеканию возможно при условии получения необходимых технических решений и направлено на оптимизацию конструктивных характеристик сложных ЗУ электроустановок.

#### **Анализ основных достижений и литературы.**

Развитие электротехники и непрерывное совершенствование применяемого телекоммуникационного электрооборудования требовали поиска новых технических решений конструкций заземляющих устройств, в том числе для перехода от традиционных к современным модульно-стержневым [3]. Важными условиями надежной работы модульно-стержневых заземлителей являются: применение материалов и конструкций, устойчивых к коррозии [4] и использование решений, повышающих производительность работ.

Вертикальные электроды используют, если соотношение удельных сопротивлений слоев двухслойной расчетной модели земли  $\rho_1 / \rho_2 > 0,8$  (при соотношении  $0,1 \leq \rho_1 / \rho_2 \leq 0,8$  необходимое значение сопротивления заземления могут обеспечить только горизонтальные электроды). Длину вертикальных электродов целесообразно выбирать в зависимости от толщины верхнего слоя ( $h$ ) по соотношению  $l_v \geq 2h$ , но не менее 5 м; здесь:  $h$  - мощность верхнего слоя,  $l_v$  - длина вертикальных электродов [1]. В работе [5] рекомендуется при выполнении сложных комбинированных заземлителей с соблюдением требований, предъявляемых к их характеристикам, применять вертикальные заземлители повышенной длины, если с глубиной от поверхности земли ее удельное сопротивление снижается. Снижение перенапряжений, обусловленных электромагнитной связью между источником влияния и цепями, подверженными влиянию, рекомендуется [6] за счет установки дополнительных вертикальных электродов заземления или выполнения выносного заземлителя. Работа [7] предлагает техническое решение, согласно которому выполнение вертикальных электродов в ограниченном скважиной объеме технического углерода эффективно улучшает электрические характеристики сложного комбинированного заземлителя. Целесообразность применения рекомендаций по приведению величин нормируемых

параметров заземляющих устройств к допустимым значениям должна быть подтверждена расчетными данными и результатами измерений указанных параметров в условиях действующих электроустановок.

**Цель работы.** Целью настоящей работы является подтверждение целесообразности применения электродов повышенной проводимости растеканию в условиях действующих электроустановок с точки зрения обеспечения нормативных требований и технологичности выполнения.

**Постановка задачи.** Приведение величин нормируемых параметров к допустимым значениям выполняется с помощью мероприятий, позволяющих в каждом конкретном случае совершенствовать заземлитель применяя одно из известных конструктивных решений. К числу таких мероприятий принадлежит вариант технического решения по выполнению вертикальных электродов повышенной проводимости.

Результаты исследовательских испытаний по диагностике состояния ЗУ подстанции «Орджоникидзе – 110 кВ» показали, что ЗУ выполнено с соблюдением требований к его сопротивлению, однако, в некоторых местах нарушено конструктивное выполнение заземлителя, обеспечивающее требования техники безопасности по напряжению прикосновения. Результаты выполненных расчетов, согласно протоколу исследовательских испытаний по диагностике состояния заземляющего устройства подстанции показали, что после проведения ремонтно-восстановительных работ для условий однофазного КЗ на территории ОРУ-110 кВ подстанции значение напряжения прикосновения на рабочих местах у оборудования, на котором могут производиться оперативные переключения, снизилось, но превышает допустимое значение.

Вследствие необходимости обеспечения нормативных значений напряжения прикосновения, где оно превышает допустимые значения, была поставлена задача выбора решения по восстановлению параметров ЗУ и подтверждения целесообразности применения выбранного варианта.

**Оптимизация конструктивных параметров ЗУ.** В работе рекомендовано при выполнении сложных комбинированных заземлителей с соблюдением требований, предъявляемых к их характеристикам, применять вертикальные электроды повышенной проводимости растеканию. Согласно предложенному техническому решению, углубление вертикальных электродов заземления выполняется путем размещения каждого из них в центре скважины диаметром не более 50 диаметров электрода, которая заполняется мелкодисперсным техническим углеродом, причем на поверхности электрода для снижения скорости коррозии предварительно формируется твердая токопроводящая пленка (рис. 1).

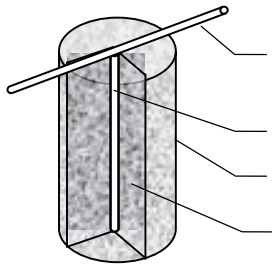


Рис. 1 – Вертикальный электрод заземления в ограниченном объеме технического углерода: 1- горизонтальные электроды; 2 - вертикальный электрод; 3 - скважина; 4 - мелкодисперсный технический углерод, заполняющий свободный объем скважины.

Рассмотренные технические решения можно рекомендовать как вариант доведения до нормируемых значений параметров ЗУ действующих электроустановок. При этом рекомендуется выполнять с периферийной стороны ЗУ несколько вертикальных электродов в ограниченном объеме технического углерода (рис. 2); на поверхности электродов может быть сформирована токопроводящая защитная пленка. При этом достигается механизация земляных работ – скважина выполняется с помощью ямобура, эксплуатируемого в электрических сетях. Технический углерод широко выпускается промышленностью. Число таких электродов можно определить на основании расчета исходя из реального значения сопротивления растеканию ЗУ подстанции.

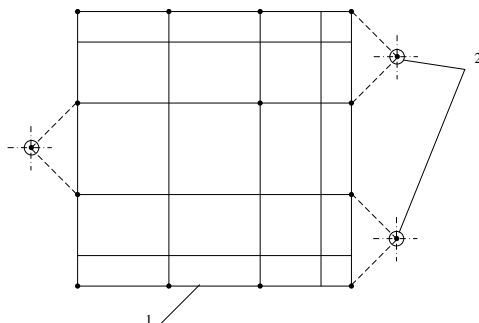


Рис. 2 – Сложный заземлитель электроустановки: 1 – вертикальные и горизонтальные электроды ЗУ электроустановки; 2 – вертикальный электрод в ограниченном объеме технического углерода.

С целью обеспечения нормативных значений напряжения прикосновения, где оно превышает допустимые значения, в дополнение к рекомендациям, согласно протоколу исследовательских испытаний по диагностике состояния заземляющего устройства, на ОРУ-110 кВ были выполнены два вертикальных электрода повышенной проводимости растеканию. В стороне от заземляющей сетки (минимальное удаление от периферийных горизонтальных электродов ЗУ 5,5 м) пробурены две скважины диаметром 0,33 м и глубиной 3 м, расстояние между которыми 5,1 м. В центр каждой скважины помещался электрод из стальной полосы 40x4 мм<sup>2</sup> длиной 2,5 м, причем один

из электродов имел проводящее антикоррозионное покрытие. Засыпка скважин произведена гранулированным техническим углеродом марки П-803 производства ОАО «Стахановский завод технического углерода». Подсоединение вертикальных электродов повышенной проводимости растеканию выполнено медным изолированным проводом сечением 10 мм<sup>2</sup>. Смонтированные экспериментальные образцы электродов с 17.11.2008 г. находятся в опытно-промышленной эксплуатации.

**Результаты численного моделирования.** Для определения влияния электродов повышенной проводимости растеканию на распределение потенциалов на территории подстанции «Орджоникидзе» АК «Харьковоблэнерго» произведен расчет ЗУ электроустановки. Для получения характеристик сложного неэквипотенциального ЗУ применяется алгоритм, реализующий математическую модель, основанную на совместном рассмотрении ЗУ как сложной электрической цепи с распределенными параметрами горизонтальных электродов, нелинейно зависящими от проходящего по ним тока, и сосредоточенными параметрами вертикальных электродов; с другой стороны в виде квазистационарного электрического поля в земле [8].

Замещение вертикальных электродов повышенной проводимости растеканию совокупностью линейных электродов, диаметры которых такие же как у соответствующих горизонтальных заземлителей, позволяет использовать возможности указанного алгоритма расчета сложных ЗУ.

Для электродов повышенной проводимости растеканию, выполненных в виде проводника, расположенного в центре скважины с токопроводящим заполнением, в работе [9] предложен способ замещения при расчетах сложных заземляющих устройств электроустановок. С достаточной для практических расчетов точностью вертикальный электрод заземления повышенной проводимости растеканию может быть замещен совокупности из 12 вертикальных электродов разной длины, расположенных таким образом, чтобы глубина их погружения соответствовала очертаниям полуэллипсоида вращения с поверхностью равной поверхности цилиндра, ограниченного размерами скважины в грунте [9].

Определение расчетных значений напряжения прикосновения и распределения потенциала при КЗ на территории подстанции проводилось с использованием программы «Ground», разработанной для численного моделирования аварийных режимов работы ЗУ [10].

Напряжение прикосновения определяем как максимальную (минимальную) разность потенциалов между величиной потенциала на оборудовании в величину потенциала на поверхности земли на расстоянии 0,8 м от оборудования.

В расчетах по определению значений напряжения прикосновения на территории подстанции в режимах протекания по ЗУ токов КЗ принимаем, что удельное сопротивление почвы

составляет для первого слоя глубиной до 0,6 м – 28 Ом·м и для второго слоя глубиной от 0,6 м – 35,5 Ом·м. Расчетные значения сопротивления грунта полученные приведением многослойной структуры земли к двухслойной расчетной модели по результатам вертикального электрического зондирования согласно протоколу исследовательских испытаний НИПКИ «Молния» по диагностике состояния заземляющего устройства подстанции «Орджоникидзе» 110/10 кВ АК «Харьковоблэнерго». Ток однофазного КЗ на открытом распределительном устройстве 110 кВ равен 12,02 кА. Расчет проводим для однофазного КЗ на территории ОРУ-110 кВ.

Распределение потенциалов рассчитываем по всей территории подстанции при различных аварийных ситуациях - во всех возможных точках возникновения КЗ на оборудовании подстанции.

В табл. 1 приведено напряжение прикосновения на оборудовании подстанции при КЗ с учетом и без учета электродов повышенной проводимости растеканию.

Расчет сопротивления растеканию ЗУ подстанции «Орджоникидзе – 110 кВ» применительно к электрическим характеристикам грунта на территории электроустановки, в соответствии с разработанной в [8] методикой дает значение 3,1 Ом и 2,9 Ом до и после установки электродов повышенной проводимости растеканию соответственно.

Таблица 1 – Сравнение расчетных значений напряжения прикосновения на оборудовании подстанции при КЗ на линейном разъединителе ВЛ №1

Наименование оборудования	Напряжение прикосновения $U_a$ , В	
	без учета электродов	с учетом электродов
Трансформатор №1	169,75	160,9
Трансформатор №2	208,7	196,85
Р 21 Т	112	106,95
Р 22 Т	96,3	91,95
Р 23 Т	106,85	102,1
Р 24 Т	98,45	93,95
МВ 2Т	180,35	171,1
ШР 1Т	160,25	151,65
ШР 2Т	174,3	164,85
СР-1	131,05	124,55
СР-2	95,45	89,5
ЛР ВЛ-1	138,2	129,1
ЛР ВЛ-2	169,75	160,9

Анализ результатов рассчитанных значений показал, что отличие составляет 6%. Можно также отметить, что обоснованная расчетная совокупность замещающих электродов [9] обеспечивает достаточный для практических расчетов результат.

**Выводы.** Полученные результаты подтверждают целесообразность применения электродов повышенной проводимости растеканию в условиях действующих электроустановок с точки зрения обеспечения нормативных требований и технологичности выполнения.

Расчеты однофазного КЗ на территории ОРУ-110 кВ подстанции показали, что величина напряжения прикосновения на оборудовании при учете электродов повышенной проводимости растеканию отличается от соответствующих значений напряжения прикосновения, определенных без учета

указанных электродов. При этом разница между данными величинами варьируется до 6%

Выполненный анализ результатов расчета характеристик сложного ЗУ дал возможность обосновать практическую необходимость разработки технического решения искусственного электрода заземления, обладающего достаточно большой поверхностью, контактирующей с грунтом, то есть электрода заземления повышенной проводимости растекание, удовлетворяющего требованиям технологичности исполнения, в том числе, в условиях действующих электроустановок.

#### Список литературы

1. Бургсдорф В.В. Заземляющие устройства электроустановок. / В.В. Бургсдорф, А.И. Якобс. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 480 с.
2. СО 34.35.11-2004. Методические рекомендации по определению электромагнитной обстановки на электрических станциях и подстанциях. – Москва, 2004. – 75 с.
3. Евдокимова О.Г. Анализ развития конструкций заземляющих устройств / О.Г. Евдокимова. // Бюллетень результатов научных исследований. – Санкт-Петербург. 2012. Выпуск 2 (1) с.50-58.
4. Sanchez V. Diseno de la malla de puesta a tierra en la subestacion terminal terrestre / V. Sanchez, A. Rosendo. // Espol. 2015 – Режим доступа : URI : <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/31266>. – Дата обращения : 25 ноября 2017.
5. ГНД 34.20.303–2003. Випробування та контроль стану заземлювальних пристроїв електроустановок. Типова інструкція. – К.: ОЕП «ГРІФРЕ», 2003.
6. Методические указания по определению электромагнитных обстановки и совместимости на электрических станциях и подстанциях. СО 34.35.311-2004. М.: Издательство МЭИ, 2004.
7. Мінченко А.А. Спосіб виконання заземлювальних пристроїв електричних станцій та підстанцій / А.А. Мінченко, О.М. Федосеєнко, Анд.А. Мінченко, В.М. Яровий // Патент України №23105. Бюл. №6. 2007.
8. Федосеєнко Е.Н., Старков К.А. Совершенствование алгоритма расчета сложных неэквипотенциальных заземляющих устройств электроустановок с учетом проводимости естественных заземлителей / Е.Н. Федосеєнко, К.А. Старков // Электротехника і електромеханіка. – 2017. – №4. – С.66-71. doi:10.20998/2074-272X.2017.4.11
9. Федосеєнко Е.Н., Мінченко А.А. Вертикальные электроды заземления повышенной проводимости растеканию и их замещение при расчетах электрических характеристик сложных комбинированных заземлителей / Е.Н. Федосеєнко, А.А. Мінченко // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків: «Технол. центр». – 2007. – №6/5(30) – С. 56-59.
10. Линк И.Ю., Колиушко Д.Г., Колиушко Г.М. Математическая модель неэквипотенциального заземляющего устройства подстанции, размещенного в двухслойном грунте / И.Ю. Линк, Д.Г. Колиушко, Г.М. Колиушко // Электронное моделирование. – Киев: ИПМЭ, 2003. – Т.25. №2. С. 99-111.

#### References (transliterated)

1. Burgsdorf V.V., Yakobs A.I. *Zazemlyayushchie ustroystva elektroustanovok* [Grounding device of electrical installations]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987. 400 p. (Rus).
2. OS 34.35.11-2004. *Metodicheskie rekomendacii po opredeleniju jelektromagnitnoj obstanovki na jelektricheskikh stancijah i podstancijah*. [Methodical recommendations for determining the electromagnetic situation at electric stations and substations]– Moscow, 2004. – 75 p.
3. Evdokimova O.G. *Analiz razvitiia konstruksii zazemliayushchikh ustroystv*. [Analysis of the development of grounding devices designs] *Biulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovanii* [Bulletin of research results]. St. Petersburg, 2012, issue 2 (1), pp.50-58.
4. Sanchez V., Rosendo A. Diseno de la malla de puesta a tierra en la subestacion terminal terrestre // Espol. 2015 – Available at:

URI: <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/31266>. – (accessed 25.11.2017).

5. BND 34.20.303–2003. *Viprobuвання ta kontrol' stanu zazeľniuvail'nikh pristroїв elektroustanovok. Tipova instruktsiia*. [Test and control of the grounding devices of electrical installations. Typical instruction] – K.: OEP «GRIFRE», 2003.

6. Metodicheskie ukazaniia po opredeleniiu elektromagnitnykh obstanovki i sovместimosti na elektricheskikh stantsiiakh i podstantsiiakh [Methodological guidelines for determining electromagnetic environment and compatibility at power stations and substations]. SO 34.35.311-2004. Moscow: Publishing house MPEI, 2004.

7. Minchenko A.A., Fedoseenko O.M., Minchenko And.A., Iarovii V.M. *Sposib vikonannya zazeľniuvail'nikh pristroїв elektrichnikh stantsii ta pidstantsii* [Method of grounding devices implementation of electric stations and substations] Patent of Ukraine No. 23105, Bull No. 6, 2007.

8. Starkov K.A., Fedoseenko E.N. Improved algorithm for calculating complex non-equipotential grounding devices of electrical installations taking into account conductivity of natural groundings. *Electrical engineering & electromechanics*, 2017, no.4, pp. 66-71. doi: 10.20998/2074-272X.2017.4.11.

9. Fedoseenko E.N., Minchenko A.A. Vertikal'nye elektrody zazeľneniia povyshennoi provodimosti rastekaniu i ikh zameshchenie pri raschetakh elektricheskikh kharakteristik slozhnykh kombinirovannykh zazeľnitelei [Vertical grounding electrodes of increased conductivity and their replacement in calculations of electrical characteristics of complex combined grounding devices] // *Eastern European journal of enterprise technologies*. - Kharkiv: «Technol. Center» – 2007. – №6 / 5 (30) – pp. 56-59.

10. Link I.Yu., Koliushko D.G., Koliushko G.M. A mathematical model is not an equipotential ground grids substation placed in a double layer *Electronnoe modelirovanie – Electronic modeling*, 2003, vol.25, no.2, pp. 99-111.

Поступила (received) 12.12.2017

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Бондаренко Володимир Омелянович (Бондаренко Владимир Емельянович, Bondarenko Volodymyr Omeľjanovych)** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри передачі електричної енергії, м. Харків; тел.: (057) 707-62-46; e-mail: 228ek@i.ua.

**Федосеєнко Олена Миколаївна (Федосеєнко Елена Николаевна, Fedoseenko Olena Mykolai'vna)** – старший викладач кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: (057) 707-69-77; e-mail: fedoseenko1@i.ua

**Старков Костянтин Олександрович (Старков Константин Александрович, Starkov Kostjantyn Oleksandrovych)** – кандидат технічних наук, доцент, заступник начальника виробничо-технічного управління АК «Харківобленерго»; м. Харків; тел.: (057) 740-12-68; e-mail: ptu1@obl.kh.energy.gov.ua

**Ганус Олексій Іванович (Ганус Алексей Иванович, Ganus Oleksij Ivanovych)** – кандидат технічних наук, доцент, Північна електроенергетична система ДП НЕК «Укренерго», начальник служби перспективного розвитку; м. Харків; тел.: (057) 730-25-44; e-mail: ganus.oi@north.energy.gov.ua

Укладач: С. О. Федорчук, аспірант.

УДК 621.311.171

**R. V. ZAITSEV, M. V. KIRICHENKO, G. S. KHRYPUNOV****CADMIUM SULFIDE THIN FILMS FOR FLEXIBLE SOLAR CELL RECEIVED BY MAGNETRON DISPERSION METHOD**

For the purpose of creation of the economic, suitable for large-scale application technology of formation of a layer of wide-scale "window", for thin-film photo-electric converters on the basis of sulfide and telluride of cadmium the pilot studies of temperature effect of a deposition of the films of sulfide of cadmium received by method of magnetron dispersion on a direct current on their optical properties and crystalline structure were conducted. By method of a two-channel optical spectroscopy it is established that a deposition of films of sulfide of cadmium at a temperature of 160 °C allows to form layers with a width of forbidden region of 1,41 eV that approaches value, characteristic of monocrystals, and the density of the photon flux passing through a cadmium sulfide layer in a spectral interval of a photosensitivity of telluride of cadmium at the level of 37,0 W·nm·cm<sup>-2</sup>. Body height of precipitation temperature to 160 °C leads to decrease in optical losses in cadmium sulfide films, as a result of increase in the sizes of areas of a coherent scattering and decrease of level of macrodeformations. At further increase of precipitation temperature up to 230 °C the defining factor leading to growth of optical losses in cadmium sulfide films becomes their impoverishment by an easily volatile component – sulfur.

**Keywords:** cadmium sulfide films, a method of magnetron dispersion on a direct current, optical losses, width of the forbidden region, crystalline structure.

**Р.В. ЗАЙЦЕВ, М.В. КІРІЧЕНКО, Г.С. ХРИПУНОВ****ТОНКІ ПЛІВКИ СУЛЬФІДУ КАДМІЮ ДЛЯ ГНУЧКИХ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ, ОТРИМАНІ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РОЗПИЛЕННЯ**

З метою створення економічної, придатної для широкомасштабного застосування технології формування шару широкозонного «вікна» для тонкоплівкових фотоелектричних перетворювачів на основі сульфідів та телуриду кадмію були проведені експериментальні дослідження впливу температури осадження плівок сульфідів кадмію, отриманих методом магнетронного розпилення на постійному струмі, на їх оптичні властивості і кристалічну структуру. Методом двоканальної оптичної спектроскопії встановлено, що осадження плівок сульфідів кадмію при температурі 160 °C дозволяє формувати шари з шириною за-прещеної зони 1,41 еВ, що наближається до значення, характерного для монокристалів, і щільністю потоку фотонів, що проходять через шар сульфідів кадмію в спектральному інтервалі фоточутливості телуриду кадмію, на рівні 37,0 Вт·нм·см<sup>-2</sup>.

**Ключові слова:** плівки сульфідів кадмію, метод магнетронного розпилення на постійному струмі, оптичні втрати, ширина забороненої зони, кристалічна структура.

**Р.В. ЗАЙЦЕВ, М.В. КИРИЧЕНКО, Г.С. ХРИПУНОВ****ТОНКИЕ ПЛЕНКИ СУЛЬФИДАКАДМИЯ ДЛЯ ГИБКИХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ**

С целью создания экономичной, пригодной для широкомасштабного применения технологии формирования слоя широкозонного «окна» для тонкопленочных фотоэлектрических преобразователей на основе сульфида и теллурида кадмия были проведены экспериментальные исследования влияния температуры осаждения пленок сульфида кадмия, полученных методом магнетронного распыления на постоянном токе, на их оптические свойства и кристаллическую структуру. Методом двухканальной оптической спектроскопии установлено, что осаждение пленок сульфида кадмия при температуре 160 оС позволяет формировать слои с шириной запрещенной зоны 1,41 эВ, что приближается к значению, характерному для монокристаллов, и плотностью потока фотонов, проходящих через слой сульфида кадмия в спектральном интервале фоточувствительности теллурида кадмия, на уровне 37,0 Вт·нм·см<sup>-2</sup>.

**Ключові слова:** плёнки сульфида кадмия, метод магнетронного распыления на постоянном токе, оптические потери, ширина запрещенной зоны, кристаллическая структура.

**Introduction.** In the modern designs of film photo-electric converters (PhEC) on the basis of telluride of cadmium of a back configuration for reduction of speed of the surface recombination of the nonequilibrium charge carriers generated under the influence of light the effect of wide-scale "window" is used [1]. This effect consists areas of the fissile oscillation of nonequilibrium charge carriers from the flawed lit surface by use in a design of PhEC of films the wide-scale of the semiconductor materials possessing a high transmittance in the spectral range corresponding to area of a spectral photosensitivity of a basic layer at a distance. Numerous pilot studies (see, for example, [2, 3]) showed that for film PhEC with a basic layer of telluride of cadmium as wide-scale "window", the optimal solution is use of thin films of sulfide of cadmium. Cadmium sulfide for film PhEC is traditionally made by the following methods: thermal vacuum evaporation, a deposition in selfcontained volume, a chemical deposition and high-pitched magnetron dispersion [4, 5]. CdS films received by these methods have stable vuyrttsitny crystalline structure,

possess a high transmittance in the spectral range corresponding to the range of a photosensitivity of telluride of cadmium are characterized by good adhesion to a layer of the frontal transparent electrode applied on a glass substrate. In a design of the most efficient film PhEC with a basic layer of telluride of cadmium, received by a chemical deposition, CdS films with thickness no more than 100 nanometers are used [6]. However the method of a chemical deposition is problematic to be adapted to conditions of quantity production as it is characterized by low speeds of growthof a film of sulfide of cadmium. At the same time it is necessary to solve issues of regeneration of a fluid chemical wastage. More technological in the conditions of quantity production is the method of thermal vacuum evaporation. However, the conducted researches (see, for example, [7]) showed that thickness of the films of sulfide of cadmium received by this method for use in PhEC on the basis of telluride of cadmium has to be not less than 0,3 microns. Otherwise, owing to through porosity of the films of sulfide of cadmium received by this method which arises owing to

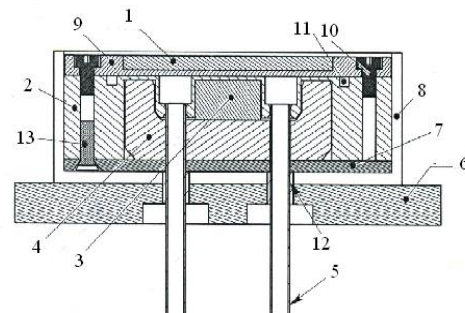
© R. V. Zaitsev, M. V. Kirichenko, G. S. Khrypunov, 2018

geometrical effect of a shadowing of a surface by the most quickly growing grains a shunting of the separating barrier of instrument structure because of an electrical link of a basic layer of telluride of cadmium to the frontal electrode takes place. The cadmium sulfide films received by method of high-pitched magnetron dispersion are deprived of this shortcoming. However, the large-scale technical application of this method is limited by the high cost of the high-pitched power supply. At the same time, economic, well mastered by domestic electronic industry, the method of not jet magnetron dispersion on a direct current for receiving films of sulfide of cadmium practically is not used.

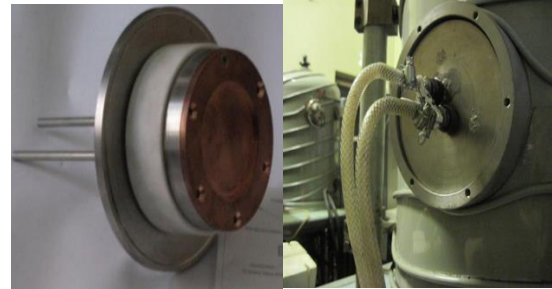
Thus, the pilot studies of the influence of parameters of magnetron not jet dispersion on a direct current on crystalline structure and optical properties of films of sulfide of cadmium are urgent for creation of the industrial vacuum technologies of receiving of the wide-scale of "windows" for film photo-electric converters with a basic layer of telluride of cadmium of a back configuration.

**Technique of carrying out experiment.** For receiving films of sulfide of cadmium by the method of not jet magnetron dispersion on a direct current [8] developed and made the magnetron adapted to a design of the UVN reference production vacuum installation - 71 - P3 (figure 1). Installation of a magnetron was carried out through a peep-hole of vacuum installation (the figure 1, c).

The design of a magnetron allowed to use target material efficiently. It was caused by the fact that with a diameter of magnetron of 100 mm, diameter of a zone of an erosion made 65 mm, and its width 10 - 12 mm. Such sizes of a zone of an erosion allowed to put films of 70 mm by 70 mm in size with uniformity of thickness at the level of 5%. Therefore, the applied to receiving films, magnetron system can be used in the conditions of the industrial production. Express adaptation allowed to move a substrate together with heating section and the heat-insulating screen in the horizontal plane to such situation at which during preliminary heating pollution of a target was excluded. The target 1 representing the disk with a diameter of 10 cm pressed from cadmium sulfide powder by purity of 99,99% was a source of the sprayed material. The target settled down on a surface of the water-cooled magnetron. In the bottom of the anode of a magnetron there was an input for a tube on which supply of gas mixture of argon and oxygen in spraying system was carried out. The developed design of the radiation heater of a substrate as which glass plates K 8 with thickness of 2 mm thick were used allowed to warm evenly on the area a substrate up to the established temperature in the range of 100 - 220 0C and to maintain temperature with an accuracy of  $\pm$  of 2 0C by means of an automatic regulating system.



a)



b)

c)

1 - target; 2 - housing; 3 - permanent magnet of NdFeB; 4 - magnetic circuit; 5 - cooling tube; 6 - adjusting flange; 7 - cover; 8 - insulator of a housing; 9 - target basis; 10 - screw of fastening of a target (M4x7); 11 - vacuum seal, 12 - the insulator of a tube of cooling, 13 - the screw of fixing of a cover

Fig. 1 – The key diagram (a), photos of a magnetron (b) and installation of magnetron dispersion (c)

The design of a magnetron allowed to use target material efficiently. It was caused by the fact that with a diameter of magnetron of 100 mm, diameter of a zone of an erosion made 65 mm, and its width 10 - 12 mm. Such sizes of a zone of an erosion allowed to put films of 70 mm by 70 mm in size with uniformity of thickness at the level of 5%. Therefore, the applied to receiving films, magnetron system can be used in the conditions of the industrial production. Express adaptation allowed to move a substrate together with heating section and the heat-insulating screen in the horizontal plane to such situation at which during preliminary heating pollution of a target was excluded. The target 1 representing the disk with a diameter of 10 cm pressed from cadmium sulfide powder by purity of 99,99% was a source of the sprayed material. The target settled down on a surface of the water-cooled magnetron. In the bottom of the anode of a magnetron there was an input for a tube on which supply of gas mixture of argon and oxygen in spraying system was carried out. The developed design of the radiation heater of a substrate as which glass plates K 8 with thickness of 2 mm thick were used allowed to warm evenly on the area a substrate up to the established temperature in the range of 100 - 220 0C and to maintain temperature with an accuracy of  $\pm$  of 2 0C by means of an automatic regulating system.

The common pressure of the sprayed gas necessary for operational stability of a magnetron, made 2 Pas. Therefore, between the building bag and the pump the



limitative diaphragm necessary for stable work of a vacuum vapor-steam pump at such low pressure was established. The distance from a substrate to a target which made 35 mm, was defined as minimum at which inhomogeneity of the received film on thickness taking into account a geometrical factor was not exceeded by 5%.

Crystalline structure and phase structure of films were investigated on a X-ray diffractometer the DRON-4M in monochromatic Co-K $\alpha$  radiation. Identification of phases in models was carried out on the basis of comparison of set of the interplanar distances calculated by Woolf - Bragg's formula [9], with the available sets of interplanar distances for tin oxides from the help ASTM cards. Roughing-out of the diffraction peaks was carried out by means of the developed computer program. Such computing machining allowed to define the position of the diffraction peak ( $2\theta$ ), interplanar distance ( $d$ ) and integral intensity ( $I$ ).

Spectral dependences of the coefficients of transmittances and reflection of films of sulfide of cadmium investigated by method of a two-channel optical spectroscopy by means of a spectrophotometer SPh-2000, equipped with the SPhO prefix - 2000 for measurement of reflecting and diffuse reflections. Optical width of the forbidden region of  $E_g$  layers of CdS defined similarly described in [9], by means of extrapolation on an axis of energies of the line section, dependence  $[-\ln(T) \cdot hv]^2$  from  $hv$ .

Results and their discussion.

**1. Research of optical properties of films of sulfide of cadmium.** Films of sulfide of cadmium were received by method of magnetron dispersion on a direct current with a pressure of working gas of 0,9 - 1 Pa, 550 - 600 V tension category and current densities 0,44 - 0,53 mA/cm $^2$ . At the same time precipitation temperature varied from 100 °C to 230 °C. Such ranges of parameters of the technological modes can be considered suitable for procreation in the production conditions. Time of a deposition of films made 5 minutes.

The research of optical properties of films of sulfide of cadmium was conducted by means of measurements of spectral dependences of transmittances and reflection of films of CdS in the spectral range of 400 - 1100 nanometers (figure 2). The analysis of transmission spectrums shows that for all models, except the model received at precipitation temperature of 100 °C the strong absorption in the range of lengths of waves of 400 - 500 nanometers and a sharp edge of an absorption band in the range of 500 - 550 nanometers is observed. At the same time in red and infrared spectral ranges a high transparency at the level of 80% is observed.

Analytical processing of transmission spectrums and reflection allowed to determine optical parameters of the studied films received at various precipitation temperatures.

In the figure 3 results of definition of width of the forbidden region ( $E_g$ , eV) and values of theoretical power of a luminous flux ( $W$ , Wt-nanometer-cm $^2$ ) which can pass through the studied cadmium sulfide films in the conditions of illumination of AM 1,5, in a spectral interval of a photosensitivity of PhEC on the basis of

sulfide and telluride of cadmium which, according to literary data [8], makes 550 - 900 nanometers are given. These two parameters determine the size of optical losses in a cadmium sulfide layer at its use as wide-scale "window" in film photo-electric converters with a basic layer of telluride of cadmium of a back configuration. Optical researches showed that with growth of precipitation temperature to 160° C there is an increase, passed from through a film of sulfide of cadmium, power of a luminous flux 32,7 W-nm-cm $^2$  to 37 W-nm-cm $^2$ . Further growth of precipitation temperature to 230 °C leads to decrease in last power of a luminous flux to 33,5 W-nanometer-cm $^2$ . The analysis of the figure 3 demonstrates that with growth of precipitation temperature from 100 °C to 160 °C there is an increase in width of the forbidden region from 2,38 eV to 2,41 eV.

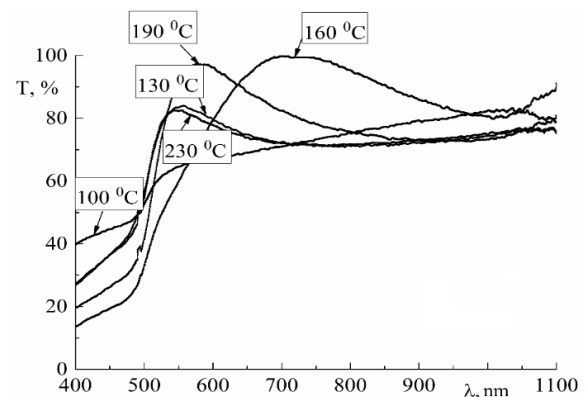


Fig. 2 – Spectral dependences of the coefficients of transmittances of the films of sulfide of cadmium received at various precipitation temperatures

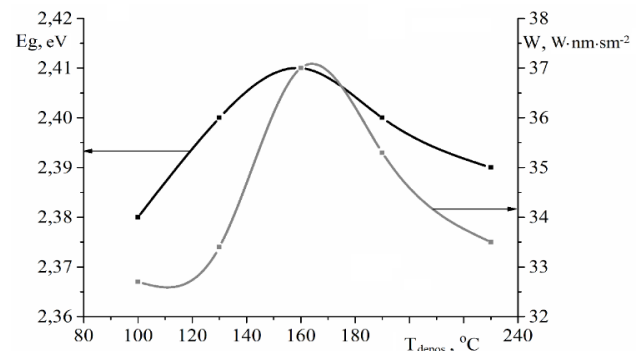


Fig. 3 - Optical parameters of films of CdS received by the method of magnetron dispersion

Further growth of precipitation temperature from 160° C to 230° C leads to decrease in width of the forbidden region from 2,41 eV to 2,39 eV. According to literary data [4] for monocrystal films of sulfide of cadmium width of the forbidden region makes 2,42 - 2,45 eV. Smaller values of width of the forbidden region for polycrystalline films of sulfide of cadmium, in comparison with monocrystals, are caused by the fact that borders of grains absorb light as metal layers that leads to decrease in size of the forbidden region determined by optical techniques. Except a developed grainbordered surface decrease in optical width of the forbidden region

can be caused by impoverishment of films of sulfide of cadmium by easily volatile component – sulfur.

Thus, for use in a design of high performance PhEC on the basis of sulfide and telluride of cadmium it is necessary to use the films received at precipitation temperature of 160 °C as at the same time the maximal stream density fluence of the photons coming to a basic layer of telluride of cadmium that allows to increase the coefficient of efficiency due to growth of a current density of a short-circuit.

**2. Research of crystalline structure and element structure of films of sulfide of cadmium.** For identification of the physical mechanisms defining dependence of width of the forbidden region of the films of sulfide of cadmium received by magnetron dispersion on a direct current researches of crystalline structure of films were conducted by method of a x-ray diffractometry (figure 4). On the experimental roentgendifraktogrammas only one peak on angle  $2\theta = 30,62^\circ$  which corresponds to reflection (111) cubic modification or to reflection (002) of the hexagonal phase CdS which are theoretically characterized by the maximal intensity is observed. Because of the small thickness of a model other diffraction peaks were not identified that does not allow to uniquely determinate phase structure of the received CdS models by a roentgendifraktometrical method. Nevertheless, in view of the fact that stable modification of CdS is hexagonal, further processing investigated roentgendifraktogramm was carried out for the hexagonal phase CdS. Results of analytical processing of structural researches are presented in table 1.

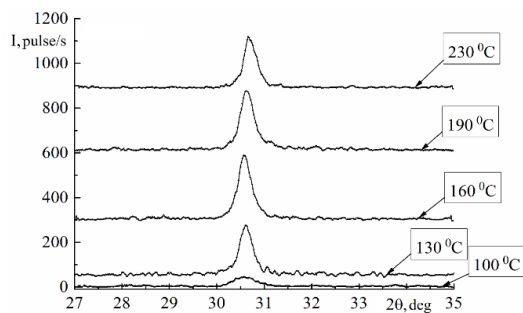


Fig. 4 – Roentgendifraktogramma of the films of sulfide of cadmium received by method of magnetron dispersion on a direct current at various precipitation temperatures

With growth of precipitation temperature from 100 °C to 230 °C decrease in interplanar distance (002) from  $d_{002} = 3,391 \text{ \AA}$  to  $d_{002} = 3,379 \text{ \AA}$  is observed, that corresponds to decrease in parameter from a hexagonal lattice from  $c = 6,782 \text{ \AA}$  to  $c = 6,758 \text{ \AA}$ . The received values of parameter  $c$  is more than table value, what is characteristic for monocrystals ( $c = 6,7198 \text{ \AA}$ ). It demonstrates existence of the squeezing macrovoltage which size decreases with increase of temperature up to 230 °C. With increase of precipitation temperature from 100 °C to 230 °C decrease of a physical broadening of the diffraction peak from  $\Delta\theta = 0,38^\circ$  to  $\Delta\theta = 0,30^\circ$  is observed. The assessment on the specified width of the diffraction peaks shows that with increase of precipitation

temperature growth of areas of a coherent scattering from 25,2 nanometers to 31,9 nanometers is observed. Thus, with increase of precipitation temperature from 100 °C to 230 °C natural increase in quality of crystalline structure of films of sulfide of cadmium is observed: decrease in level of macrovoltages and increase in the sizes of areas of a coherent scattering is observed that reduces light absorption on a developed grainbordered surface. Decrease in level of microdeformation and growth of the sizes of areas of a coherent scattering cause growth of optical width of the forbidden region.

Table 1 – Results of analytical processing of structural researches of films of CdS received by method of magnetron dispersion on a direct current

No	Precipitation temperature, °C	Position of peak, degree	Inter-planar distance ( $d_{002}$ ), Å	Half-width of the diffraction peak ( $\Delta\theta$ ), degree	L, nm
1	100	30,58	3,391	0,38	25,2
2	130	30,62	3,388	0,33	29,0
3	160	30,59	3,391	0,33	29,0
6	190	30,64	3,385	0,34	28,1
5	230	30,70	3,379	0,30	31,9

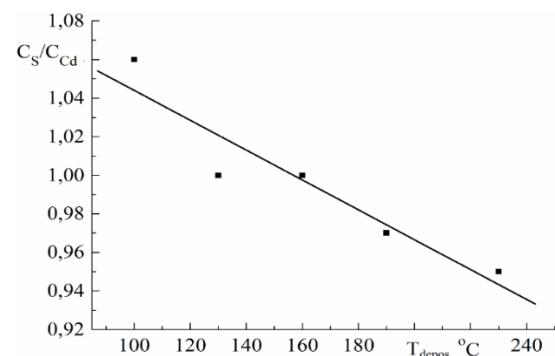


Fig 5 – The relation of atomic concentration of sulfur and cadmium of the films of sulfide of cadmium received by method of magnetron dispersion on a direct current at various precipitation temperatures

Researches of crystalline structure were added with researches of elemental structure of the received films which were conducted on a spectrometer Elvatech of the Elvate company. Time of set of impulses made 240 - 241 second. Researches showed (figure 5) that with increase of precipitation temperature from 100 °C to 230 °C the attitude of atomic concentration of sulfur ( $C_s$ ) towards atomic concentration of cadmium ( $C_{Cd}$ ) decreases from  $C_s/C_{Cd} = 1,06$  to  $C_s/C_{Cd} = 0,95$  that is bound to impoverishment of the growing film an easily volatile component which sulfur is.

Thus, with increasing of precipitation temperature decrease in degree of stoichiometry of films that is caused by increasing of a vacancies concentration, causing growth of light absorption and decrease of efficient optical width of the forbidden region, as a result of emergence in the forbidden region of the energy levels capable to share

in the transition of charge carriers activated by light is observed.

**Conclusions.** For use in a design of film photoelectric converters of a back configuration with a basic layer of telluride of cadmium optimum precipitation temperature of films of sulfide of cadmium by method of not jet magnetron dispersion on a direct current makes 160 °C that is caused by achievement of the greatest width of the forbidden region -1,41 eV and the maximal flux density of the photons arriving through a cadmium sulfide layer in the spectral range of a photosensitivity of telluride of cadmium. The extremum on dependence of optical properties of the studied cadmium sulfide films from precipitation temperature is caused by existence of two competing physical mechanisms. Body height of precipitation temperature to 160 °C leads to decrease in optical losses in cadmium sulfide films, as a result of increase in the sizes of areas of a coherent scattering and decrease of level of macrodeformations. At further increase of precipitation temperature up to 230 °C the defining factor leading to growth of optical losses in cadmium sulfide films becomes their impoverishment by an easily volatile component – sulfur.

#### Список литературы

1. Han J. Optimized chemical bath deposited CdS layers for the improvement of CdTe solar cells / J. Han, C. Spanheimer, G. Haindl, Fu Ganhua, V. Krishnakumar, J. Schaffner, Chunjie Fan, Kui Zhao, A. Klein, W. Jaegermann // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. – 2011. - Vol. 95. - No. 3. - P. 816 - 820.
2. Liu P. Cadmium sulfide nanowires for the window semiconductor layer in thin film CdS - CdTe solar cells / P. Liu, V.P. Singh, C.A. Jarro, S Rajaputra // *Nanotechnology*. – 2011. - Vol. 22. - No. 14. - P. 1 - 9.
3. Rubio S. Influence of CdS deposition technique for CdS/CdTe solar cells / Rubio, J.L. Plaza, E. Dieguez // *Journal of Crystal Growth*. – 2014. - Vol. 401. - P. 550 - 553.
4. Jaber A.Y. Influence of substrate temperature on thermally evaporated CdS thin film properties / A.Y. Jaber, M.S. Aida, M. Benghanem, A.A. Abdelaziz // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2012. - Vol. 529. - P. 63 - 68.
5. Albin D. Comparison study of close - sublimated and chemical bath deposited CdS Films: effects on CdTe solar cells / D. Albin, D. Rose, R. Dhere, R. Levi, L. Woods, A. Swartylander, P. Sheldon // *Proc. of 26<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialist Conference*. New York (USA). – 1997. - P. 367 - 370.
6. Fekekides C. CdS film prepared by the close - Spaced sublimation and their influence on CdS/CdTe solar cells performance / C. Fekekides, D. Marinski, S. Marinskaya, B. Tetali, D. Oman, D. Morel // *Proc. of 26<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialist Conference*, New York (USA). – 1997. - P. 751 - 756.

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Зайцев Роман Валентинович (Зайцев Роман Валентинович, Zaitsev Roman Valentinovich)** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», в.о. завідувача кафедри фізичного матеріалознавства для електроніки та геліоенергетики; м. Харків, Україна; e-mail: zaitsev.poman@gmail.com.

**Кіриченко Михайло Валерійович (Кириченко Михаил Валерьевич, Kirichenko Michailo Valerievich)** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», с.н.с. кафедри фізичного матеріалознавства для електроніки та геліоенергетики; м. Харків, Україна; e-mail: kirichenko.mv@gmail.com.

**Хрипунов Геннадій Семенович (Хрипунов Геннадий Семенович, Khrypunov Gennadiy Semenovich)** – проректор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; e-mail: khrip@ukr.net.

Укладач: С. О. Федорчук, аспірант.

7. Khrypunov G. Recent developments in evaporated CdTe solar cells / G. Khrypunov, A. Romeo, F. Kurtzesau, D.L. Batzner, H. Zogg, A.N. Tiwari // *Solar Energy Materials & Solar Cells*. – 2006. - Vol. 90. - No. 6. - P. 664 - 677.

8. Кузьмичёв А.И. Магнетронные распылительные системы. Введение в физику и технику магнетронного распыления / А.И. Кузьмичёв - Киев: «Аверс», 2008, Книга 1, 244 с.

9. Klochko N.P. Electrodeposited Zinc Oxide Arrays with the Moth-Eye Effect / N.P. Klochko, G.S. Khrypunov, Y.O. Myagchenko, E.E. Melnychuk, V.R. Kopach, K.S. Klepikova, V.M. Lyubov, A.V. Kopach // *Semiconductors*. – 2014. - Vol. 48. - P. 531 - 537.

#### References (transliterated)

1. Han J., Spanheimer C., Haindl G., Ganhua Fu, Krishnakumar V., Schaffner J., Fan C., Zhao K., Klein A., Jaegermann W. Optimized chemical bath deposited cds layers for the improvement of cdte solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2011, 95(3), 816 – 820, doi: 10.1016/j.solmat.2010.10.027.
2. Liu P., Singh V.P, Jarro C.A., Rajaputra S. Cadmium sulfide nanowires for the window semiconductor layer in thin film CdS - CdTe solar cells. *Nanotechnology*, 2011, 14(22), 1 – 9, doi: 10.1088/0957-4484/22/14/145304.
3. Rubio S., Plaza J.L., Dieguez E. Influence of CdS deposition technique for CdS/CdTe solar cells. *Journal of Crystal Growth*, 2014, 401, P. 550 – 553, doi: 10.1016/j.jcrysgro.2014.03.032.
4. Jaber A.Y., Aida M.S., Benghanem M., Abdelaziz A.A. Influence of substrate temperature on thermally evaporated CdS thin film properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 2012, 529, 63 – 68, doi: 10.1016/j.jallcom.2012.03.093.
5. Lisco F., Kaminski P.M., Abbas A., Bass K., Bowers J.W., Claudio G., Losundro M., Walls J.M. The structural properties of CdS deposited by chemical bath deposition and pulsed direct current magnetron sputtering. *Thin Solid Films*, 2015, 582, 323 – 327, doi: 10.1016/j.tsf.2014.11.062.
6. Krishnakumar V., Späth B., Drost C., Kraft C., Siepchen B., Delahoy A., Tan X., Chin K., Peng S., Hirsch D., Zywitzki O., Modes T., Morgner H. Close spaced sublimation deposition of CdTe layers with process gas oxygen for thin film solar cells. *Thin Solid Films*, 2017, 633, 112 – 117, doi: 10.1016/j.tsf.2016.10.009.
7. Khrypunov G., Romeo A., Kurtzesau F., Batzner D.L., Zogg H., Tiwari A.N. Recent developments in evaporated CdTe solar cells. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2006, 90(6), 664 – 677, doi: 10.1016/j.solmat.2005.04.003.
8. Kuzmichyov A. I. Magnetron spraying systems. Introduction to physics and technology of magnetron dispersion. *Kiev: "Avers", 2008, Book 1, 244 p.*
9. Klochko N.P., Khrypunov G.S., Myagchenko Y.O., Melnychuk E.E., Kopach V.R., Klepikova K.S., Lyubov V.M., Kopach A.V. Electrodeposited zinc oxide arrays with the moth-eye effect. *Semiconductors*, 2014, 48, 531 – 537, doi: 10.1134/S1063782614040162.

Поступила (received) 16.12.17

*Д. А. ШОКАРЕВ, Д. А. МИХАЙЛИЧЕНКО, Г. Ю. РЫКОВ*

### **АНАЛИЗ РЕЖИМОВ РАБОТЫ АВТОНОМНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА БАЗЕ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ В КАЧЕСТВЕ ГЕНЕРАТОРА**

В статье рассмотрена возможность и перспективы использования в качестве генератора асинхронной машины с фазным ротором в системах ограниченной мощности или в автономных источниках электропитания питания в составе ВЭС или мини ГЭС. На основе предложенной и разработанной математической модели рассмотрены и проанализированы режимы работы генератора в системах ограниченной мощности и в автономном режиме работы. Построены и исследованы модели систем электроснабжения на основе асинхронной машины с фазным ротором в качестве асинхронного и синхронного генератора.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель с фазным ротором, асинхронный генератор, энергосистема, электрическая станция

*Д. А. ШОКАРЕВ, Д. А. МИХАЙЛИЧЕНКО, Г. Ю. РЫКОВ*

### **АНАЛІЗ РЕЖИМІВ РОБОТИ АВТОНОМНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА БАЗІ АСИНХРОННОЇ МАШИНИ З ФАЗНИМ РОТОРОМ В ЯКОСТІ ГЕНЕРАТОРА**

У статті розглянута можливість і перспективи використання в якості генератора асинхронної машини з фазним ротором в системах обмеженої потужності або в автономних джерелах електроживлення в складі вітроелектростанцій (ВЕС) або міні ГЕС. На основі запропонованої і розробленої математичної моделі розглянуті і проаналізовані режими роботи генератора в системах обмеженої потужності і в автономному режимі роботи. Побудовано та досліджено моделі систем електропостачання на основі асинхронної машини з фазним ротором в якості асинхронного і синхронного генератора.

**Ключові слова:** асинхронний двигун з фазним ротором, асинхронний генератор, енергосистема, електрична станція

*D. A. SHOKAROV, D. A. MIKHAYLICHENKO, G. YU. RYKOV*

### **THE ANALYSIS OF OPERATION MODES OF AUTONOMOUS SYSTEM OF ELECTRICAL POWER SUPPLY ON THE BASIS OF THE ASYNCHRONOUS MACHINE WITH A PHASE ROTOR AS THE GENERATOR**

In the article the possibility of use as the generator of the asynchronous engine with a phase rotor in the systems of limited power such as the independent power supplies on the basis of wind electric station , mini and small hydroelectric power stations is considered. On the basis of the offered mathematical model generator operation modes in the system of limited power and in a standalone mode have been considered and analyzed. Models of the asynchronous engine with a phase rotor in an asynchronous and synchronous operation mode of the generator have been constructed and probed.

**Keywords:** asynchronous engine with a phase rotor, asynchronous generator, a power supply system, electrical station

**Введение:** В настоящее время большое количество фермерских хозяйств, удаленных от крупных населенных пунктов, остаются не подключенными к централизованному источнику электроснабжения, поскольку это в большинстве случаев экономически и технически нецелесообразно.

В то же время малые реки с необходимым запасом гидроресурсов позволяют достаточно экономно решать проблему электроснабжения маломощных потребителей. Достоинством применения гидроэнергии, в сравнении с другими, является зачастую сравнительно небольшое изменение скорости течения воды в течение года, отсутствие периодов затишья.

Электроэнергия, выработанная на мини ГЭС и малых ГЭС имеет самую низкую себестоимость по сравнению с электроэнергией от других возобновляемых и традиционных источников энергии. При их строительстве, в отличие от мощных гидроэлектростанций, практически исключается экологический ущерб (затопление земель, нарушение рыбозаведения и судоходства, изменение баланса климатических условий местности и т.д.).

Одним из важнейших узлов мини ГЭС является генератор. Помимо простого генерирования электроэнергии, генератор должен обеспечить стабилизацию параметров электроэнергии. Из этого вытекает одно из важных требований к генератору

мини ГЭС – это управляемость. Кроме того, конструкция генератора для мини ГЭС должна отвечать таким требованиям как дешевизна и высокая надежность работы на открытом воздухе долгое время [1].

В автономных энергосистемах малой мощности в качестве источников энергии используются таких электрических машин как: синхронный генератор (СГ), генератор постоянного тока (ГПТ), асинхронный генератор (АГ) с короткозамкнутым ротором с конденсаторным возбуждением.

Синхронные генераторы являются наиболее распространенными генераторами для питания автономных потребителей на базе ВЭУ. Отличительная особенность синхронного генератора заключается в том, что они не нуждаются в дополнительном источнике реактивной мощности для создания рабочего магнитного потока, но главными недостатками является высокая стоимость и трудности в регулировании синхронных генераторов при изменении нагрузки на шинах генератора.

В ряде стран для преобразования энергии в установках возобновляемой энергетики (особенно в мини ГЭС и ВЭС) нашли широкое применение АГ.

Идея использования асинхронного генератора для автономных систем давно привлекает внимание исследователей. Опыт показывает, что для ГЭС с малыми установленными мощностями асинхронные

машины в генераторном режиме имеют существенные преимущества по сравнению с синхронными генераторами. Это связано в первую очередь с низкой стоимостью, простотой конструкции и эксплуатации в нормальных режимах, стойкостью к внешним авариям, значительным ресурсом [2...4]. Но главным недостатком, является использование конденсаторных батарей для возбуждения асинхронных генераторов. В энергосистемах малой мощности их использование является нецелесообразным из-за большого потребления реактивной мощности самим генератором. АГ являются потребителями значительной реактивной мощности (50% и более от полной мощности), необходимой для создания магнитного поля в машине, которая должна поступать из сети при параллельной работе асинхронного двигателя в генераторном режиме с сетью или от другого источника реактивной мощности (батарея конденсаторов (БК) или синхронный компенсатор (СК)) при автономной работе АГ. В последнем случае наиболее эффективно включение батареи конденсаторов в цепь статора параллельно нагрузке хотя в принципе, возможно ее включение в цепь ротора. Для улучшения эксплуатационных свойств асинхронного режима генератора в цепь статора дополнительно могут включаться конденсаторы последовательно или параллельно с нагрузкой [4].

**Цель работы:** анализ целесообразности использования асинхронных машин с фазным ротором в качестве генератора в автономных источниках питания (ВЭС или мини ГЭС) работающих на энергосистему ограниченной мощности или в автономном режиме.

**Материалы исследования:** Для разработки мини генераторных систем вызывает интерес применение в качестве генератора асинхронного двигателя с фазным ротором. В системах ограниченной мощности таких как: автономные источники питания на базе ВЭС, мини и малых ГЭС, дизель-бензиновые генераторы [5].

В цепи ротора устанавливается преобразователь частоты, обеспечивающий питание обмотки ротора напряжением регулируемой частоты. Такая схема позволяет получить стабильное напряжение и частоту на выходе асинхронного генератора при широком диапазоне изменения частоты вращения ветроколеса или турбины. Учитывая возможность разнородности элементов схемы (в части временных характеристик и топологии схем замещения) построение модели системы было проведено в среде пакета PSIM. Он содержит в себе вычисление, визуализацию и программирование в удобной среде. PSIM разрешает решать широкий круг научных и инженерных задач. При моделировании с использованием PSIM реализуется принцип визуального программирования, согласно которому, пользователь на экране из библиотеки стандартных блоков создает модель устройства и осуществляет расчеты. В качестве основных элементов системы были разработаны модели следующих блоков:

блок 1 – электрическая подстанция 6/0,4 кВ (ограниченная номинальной мощностью трансформатора 630 кВА);

блок 2 – нагрузка (мощность нагрузки 200 кВт несимметрия в диапазоне 8%);

блок 3 – IGBT транзисторный преобразователь возбуждения АГ с фазным ротором;

блок 4 – механическая часть генератора (турбина микроГЭС);

блок 5 – система управления IGBT преобразователем;

блок 6 – асинхронный генератор с фазным ротором мощностью 120 кВт.

В модели (рис.1) были приняты следующие допущения:

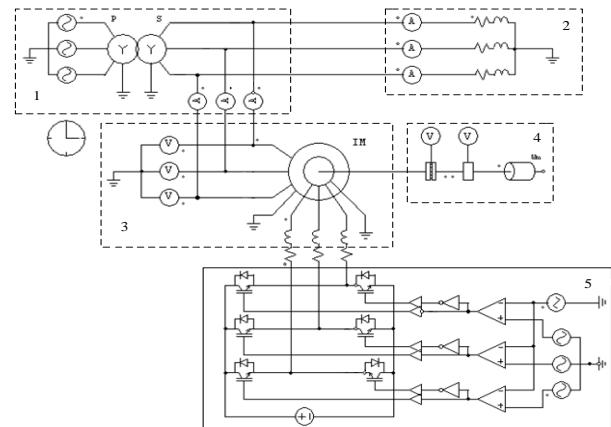


Рис. 1 – Модель автономной энергосистемы на базе асинхронного генератора с фазным ротором и инвертора напряжения

– ключевые элементы (полупроводниковые приборы) и источник питания силовой цепи асинхронного генератора имеют линейные характеристики магнитной системы;

– система формирования напряжения питания работает по классическому синусоидальному закону;

– в асинхронном генераторе не учитывается насыщение

В ходе моделирования решались следующие задачи:

– исследование режимов пуска и работы под нагрузкой генератора при синхронизированном и несинхронизированном режиме работы (сумма частот тока возбуждения и частоты вращения ротора генератора равны частоте сети) и асинхронном режиме работы (сумма частот тока возбуждения и частоты вращения ротора генератора не равны частоте сети);

– несимметричный режим работы (генератор работает в системе с несимметричной нагрузкой);

– исследования и анализ гармонического состава тока асинхронного генератора при различных режимах работы.

Стабилизацию напряжения и синхронизацию с сетью асинхронного генератора можно добиться двумя способами – по частоте вращения ротора или по магнитному потоку генератора.

Для этого были смоделированы и проанализированы два режима работы асинхронного генератора (рис.2 и рис .3)

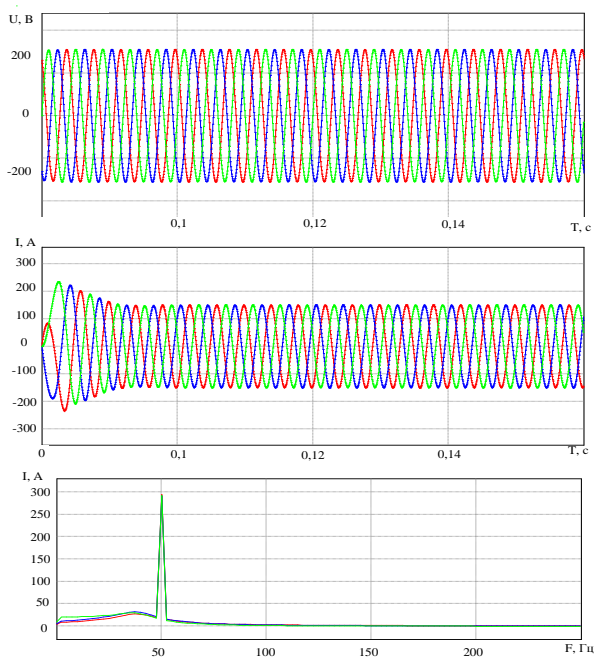


Рис. 2 – Напряжения, токи и их гармонический состав при синхронизированном режиме работы с сетью АГ

Ток и напряжение генератора синхронизировано с током и напряжением энергосистемы, что обусловлено равенством и синхронизацией частоты генератора и сети (рис. 2).

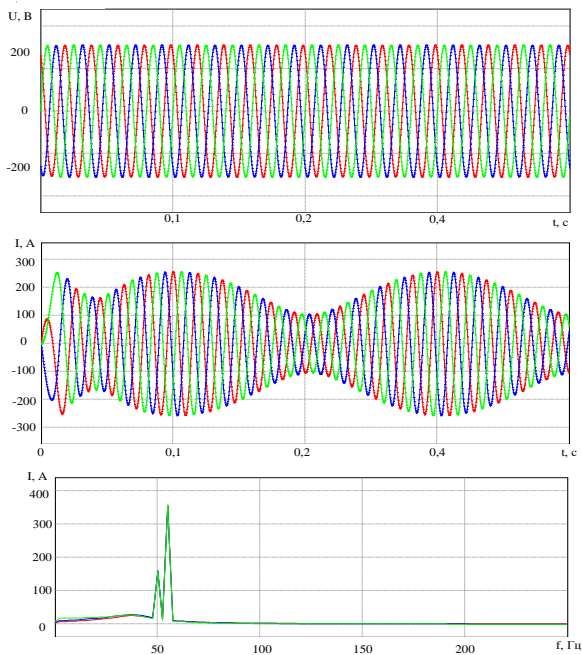


Рис. 3 – Напряжения, токи и их гармонический состав при несинхронизированном режиме работы с сетью

Как видно из (рис. 3) ток генератора несимметричен току в энергосистеме, что объясняется различием частот в энергосистеме и на выходе генератора, что приводит к режиму выхода из синхронного режима работы на сеть.

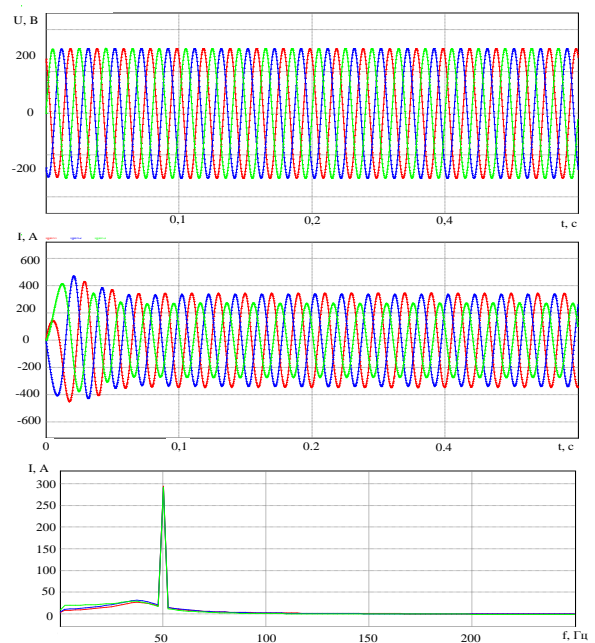


Рис. 4 – Напряжения, токи и их гармонический состав на зажимах АГ при несимметрии нагрузки

Режим работы системы при работе на несимметричную нагрузку приведен на (рис. 4).

Анализ кривых токов и напряжений (рис. 4) показал, что несимметричная нагрузка существенно влияет на режим работы генератора, а именно приводит к несимметрии токов на выходе генератора и приводит к изменению в их гармоническом составе.

На рис. 5 приведены в виде двух временных интервалов зависимости фазной средней активной мощности  $P_{ABC}$  и фазной средней реактивной мощности  $Q_{ABC}$ , полученные для случая работы с фазной несимметрией нагрузки 10% (рис. 5).

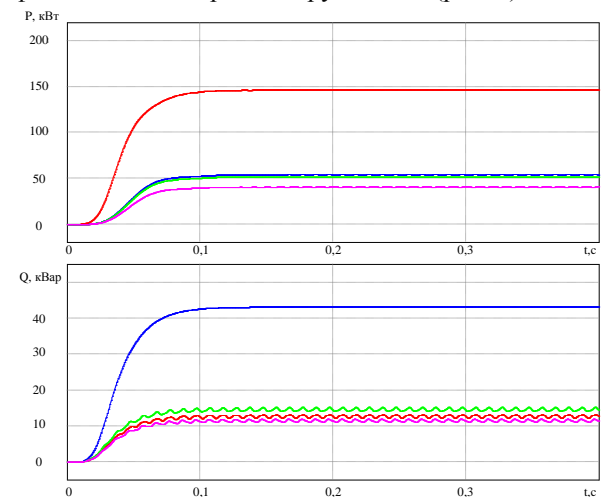


Рис. 5 – Активная и реактивная мощность (суммарная) и в каждой фазе генератора при несимметрии нагрузки 10%

Оценивание гармонического состава тока статора АГ выполнено по методике [6], на основании анализа суммарного гармонического искажения Total Harmonic Distortion (THD).

На рис. 3 (б, в) и 4 (б, в) приведен график тока статора, а также его спектральный анализ

гармонического состава. Частота ШИМ при этом составляла 2кГц. Из диаграммы FFT analysis (быстрого преобразования Фурье) видно, что помимо первой (основной) гармоники в гармоническом составе присутствуют высшие гармоники: 5-я, 7-я, 11-я и 13-я (т. е. 250, 350, 550 и 650 Гц соответственно), амплитуды которых, с ростом номера гармоники уменьшаются табл. 1. При этом коэффициент THD составляет 6.6%. Отсутствие четных гармоник, а также гармоник кратных трем объясняется тем, что ротор АГ на выходе ПЧ является симметричной нагрузкой, включенной по схеме “звезда”. С увеличением несущей частоты модуляции ШИМ, амплитуды перечисленных высших гармоник уменьшаются, что приводит к уменьшению коэффициента THD.

Таблица 1 – Гармонический состав тока АГ

	Номер гармоники				
	1	5	7	13	21
Ток (синхр. режим)	209,96	4,32	2,31	1,82	0,01
Ток (несинхр. режим)	208,12	7,12	3,56	2,41	0,09

Далее в работе был выполнен анализ целесообразности использования АД с фазным ротором в режиме СГ. Отличительная особенность СГ заключается в том, что они не нуждаются в дополнительном источнике реактивной мощности для создания рабочего магнитного потока. Мощность возбуждения СГ не превышает нескольких процентов от мощности генератора. В автономном режиме работы СГ возбуждается от выходного напряжения якорной обмотки через выпрямитель. Идея использования АГ для автономных систем давно привлекает внимание исследователей. Опыт показывает, что для малых ГЭС АД в генераторном режиме имеют существенные преимущества.

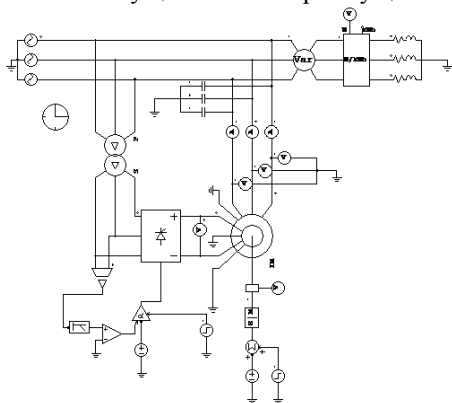


Рис. 5 – Динамическая модель автономной энергосистемы на базе АД с фазным ротором в режиме СГ

Это связано в первую очередь с низкой стоимостью, простотой конструкции и эксплуатации в нормальных режимах, стойкостью к внешним авариям, значительным ресурсом [2...4]. Возможность использования асинхронной машины с

фазным ротором в режиме СГ обоснована в работах [7]. В режиме генератора две фазы обмотки ротора используются в качестве обмотки возбуждения генератора (рис. 5).

Начальное самовозбуждение СГ осуществляется цепи статора за счет остаточного магнитного потока машины и емкостного возбуждения. При вращении ротора генератора в обмотке статора потоком остаточного магнетизма индуцируется остаточная ЭДС  $E_{ост}$ , которая создает в конденсаторе ток  $i_c$ . Этот ток, протекает по обмотке статора, усиливается, в результате чего индуцируемая в генераторе ЭДС  $e_2$  и ток конденсатора растет

Переходный процесс самовозбуждения генератора в обмотках статора, продолжается до тех пор, пока напряжение  $U_2$  не станет равным напряжению на конденсаторе  $U_c$ , Это условие можно выразить в виде равенства сопротивлений  $X_c = X_1 + X_\mu$  (где  $X_1$  – индуктивное сопротивление статора,  $X_\mu$  – индуктивное сопротивление намагничивающего контура,  $X_c$  – емкостное сопротивление конденсаторов) откуда емкость, необходимая для возбуждения генератора при заданной частоте [8]:

$$C_{нач} = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot f)^2 (L_1 + L_m)} \quad (1)$$

где  $L_1$  – индуктивность статора;

$L_m$  – индуктивность контура намагничивания;

$f_1$  – частота тока статора.

Анализ режимов работы генератора в автономном режиме проводился для напряжений и токов при различной частоте вращения приводного механизма, при симметричной нагрузке (рис. 6) и несимметрии нагрузки  $\pm 10\%$  (рис. 7).

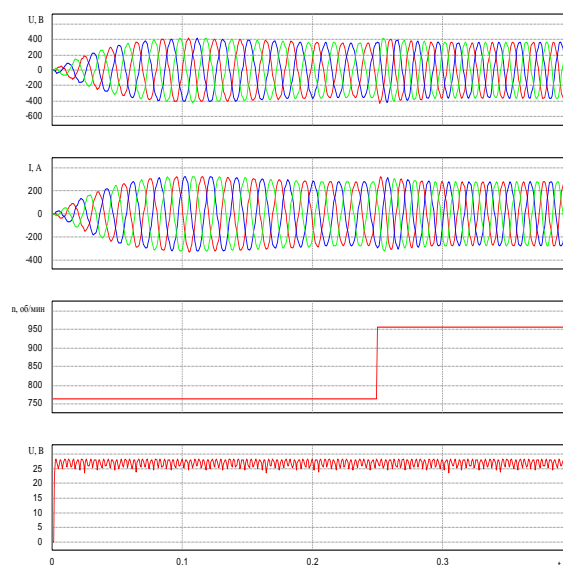


Рис. 6 – Напряжения, токи (а,б) на зажимах генератора при изменении скорости (в), напряжение ротора (г) в режиме СГ

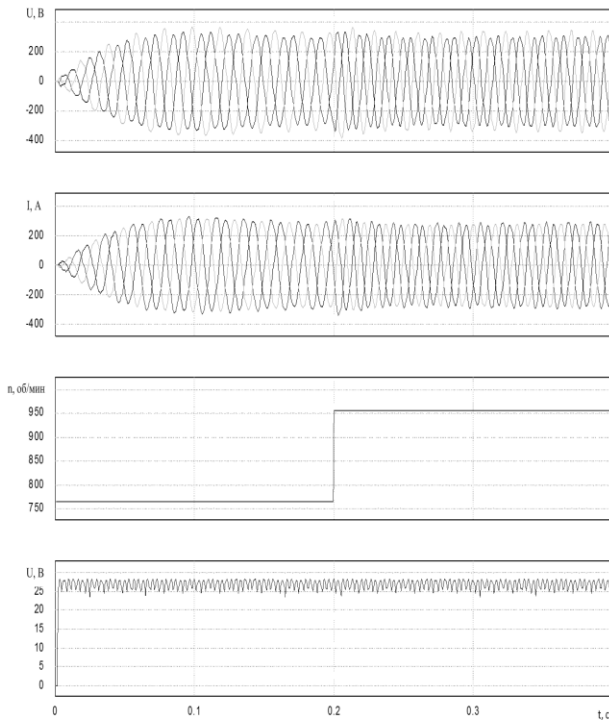


Рис. 7 – Напряжения, токи (а,б) на зажимах генератора при изменении скорости (в), напряжение ротора (г) в режиме СГ при несимметрии нагрузки

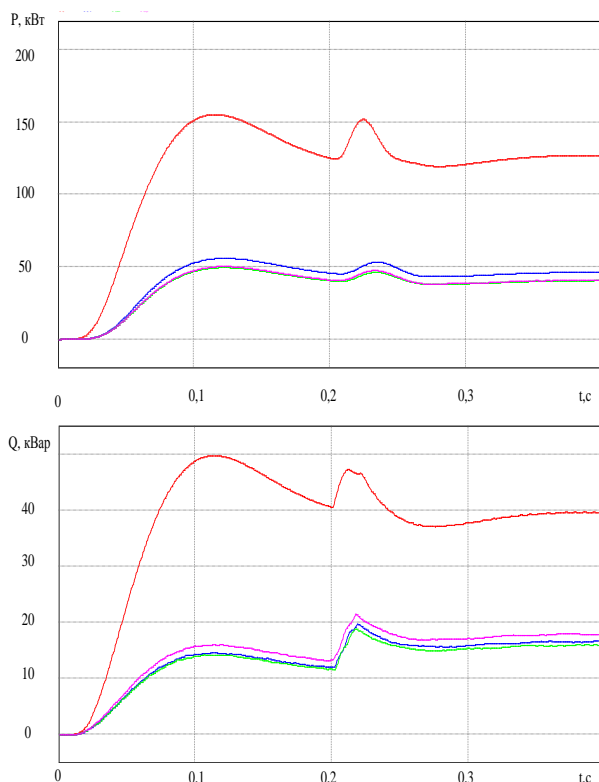


Рис. 8 – Активная мощность (а) и реактивная мощность (а) суммарная и в каждой фазе генератора при несимметрии нагрузки

Из графиков видно, что изменение скорости вращения ротора генератора существенно влияет на частоту выходного напряжения, а напряжение

возбуждения влияет только на амплитуду выходного напряжения. А несимметрия нагрузки приводит к несимметрии напряжений, токов и соответственно генерируемых мощностей (рис. 8).

**Выводы:** Существующие системы регулирования напряжения автономных асинхронных генераторов рассчитаны на номинальную или к близкую к номинальной скорости ротора генератора. В случае, когда первичным двигателем служит микротурбина с мощностью равной или близкой к мощности генератора, скорость ротора генератора может существенно изменяться в зависимости от напора воды и нагрузки генератора. Это в свою очередь может привести к отклонению выходного напряжения генератора за пределы допустимого значения. Как показал проведенный анализ, изменения частоты ШИМ возбуждения и скорости вращения ротора генератора существенно влияет на качество выходного напряжения, а именно приводит к изменению в гармоническом составе генерируемого напряжения. Подключении к энергосистеме несимметричной нагрузки, приводит к появлению несимметрии в токе генератора. Для нормального режима работы энергосистемы несимметрия нагрузки не должна превышать  $\pm 5\%$ . Эту проблему возможно решить путем построения замкнутой системы регулирования возбуждением с пофазным регулированием частоты и напряжения на выходе возбудителя. Увеличение частоты модуляции ШИМ улучшает гармонический состав тока фазы статора АГ. Оптимальная несущая частота составляет 10 кГц. Дальнейшее повышение частоты ШИМ к существенному уменьшению THD не приводит.

#### Список литературы

1. Свит П.П. Разработка микро-ГЭС с асинхронными генераторами для сельскохозяйственных потребителей: автореф. канд. техн. наук. Барнаул, 2007. – 24с.
2. Григораш О.В. Современное состояние и перспективы применения асинхронных генераторов в автономной энергетике. // Промышленная энергетика. – 1995, №3. – С.29–32.
3. Шокаръев Д.А., Колесник Я. Н. Анализ систем возбуждения асинхронных генераторов // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету, вып.1 – Кременчук, 2003, С. 116–1205.
4. Гриценко О. І., Маслов В.С., Пасічник В. І., Риков Г. Ю., Родькін Д. Й., Шокаръев Д.А. Спосіб формування джерела аварійного резервного живлення і пристрій для його здійснення Патент. № 73706. Україна МПК (2007.01) H02J 9/00, F02D 11/10 – заявник та патентоутримувач Кременчуцький державний політехнічний університет. – № а200606814; Заявл.19.04.2005 ; Опубл. 15.08.2005, бюл. № 1
5. Зачепа Ю. В. Шокарев Д. А. К вопросу построения системы регулирования емкостного тока возбуждения асинхронного генератора // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. Випуск 4/2006 (39). Частина 1 – Кременчук, 2006, С. 82–84.
6. Герман–Галкин С.Г. Модельное исследование основных характеристик силовых полупроводниковых преобразователей. Моделирование устройств силовой электроники / Герман–Галкин С.Г. // Силовая электроника. – 2008 г. – No1. – с. 92–99
7. Чернопяттов Н.Н., Петров Г.А., Емец В.Ф., Частовский А.В. Использование асинхронных двигателей в качестве синхронных генераторов // Изв. вузов, серия: Энергетика, 1983, №9/.
8. Радин В.И., Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Электрические машины, М., Высшая школа, 1988, 329 с.

#### References (transliterated)



1. Svit P.P. Razrabotka mikro-GES s asinhronnyimi generatorami dlya selskohozyaystvennykh potrebiteley: avtoref. kand. tehn. nauk. Barnaul, 2007. – 24s.
2. Grigorash O.V. Sovremennoe sostoyanie i perspektivy primeniya asinhronnykh generatorov v avtonomnoy ener-getike.// Promyshlennaya energetika. – 1995, №3. –S.29–32.
3. Shokarov D.A., Kolesnik Ya. N. Analiz sistem vzbuzh-deniya asinhronnykh generatorov VIsnik Kremenchutskogo derzhavnogo polItehnIchnogo unIversitetu, vyip.1 – Kremen-chuk, 2003, C. 116–1205.
4. Gritsenko O. I., Maslov V.E., PasIchnik V. I., Rikov G. Yu., Rodkin D. Y., Shokarov D.A. SposIb formuvannya dzhe-rela avarIynogo rezervnogo zhivlennya I pristrIly dlya yogo zdIysnennya Patent. №73706. UkraYina MPK (2007.01) H02J 9/00, F02D 11/10 – zayavnik ta patentoutrimuvach Kremenchu-tskiy derzhavniy polItehnIchniy unIversitet. –№ a200606814; Zayavl.19.04.2005 ; Opubl. 15.08.2005, byul. №1
5. Zachepa Yu. V. Shokarev D. A. K voprosu postroeniya sis-temy regulirovaniya emkostnogo toka vzbuzhdeniya asinh-ronnogo generatora VIsnik Kremenchutskogo derzhavnogo polItehnIchnogo unIversitetu. Vipusk 4/2006 (39). Chastina 1 – Kremen-chuk, 2006, C. 82–84.
6. German-Galkin S.G. Modelnoe issledovanie osnovnykh harakteristik silovykh poluprovodnikovyykh preobrazovateley. Modelirovanie ustroystv silovoy elektroniki / German-Galkin S.G. // Silovaya elektronika. –2008 g. –№1. –s. 92–99
7. Chernopyatov N.N., Petrov G.A., Emets V.F., Chastovskiy A.V. Ispolzovanie asinhronnykh dvigateley v kachestve sinhronnykh generatorov /Izv.vuzov,seriya: Energeti-ka,1983,#9/.
8. Radin V.I., Bruskin D.E., Zorohovich A.E., Elektricheskie mashiny, M., Vysshaya shkola, 1988, 329 s.

Надійшла (received) 05.01.2018

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Шокарьов Дмитро Анатолійович (Шокарев Дмитрий Анатольевич, Shokarov Dmytro Anatol'yevich)**, канд. техн. наук, доцент кафедри електричних станцій, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", м. Харків, [shokareff@gmail.com](mailto:shokareff@gmail.com).

**Михайличенко Дмитро Анатолійович (Михайличенко Дмитрий Анатольевич, Mykhailychenko Dmytro Anatol'yevich)**, старший викладач кафедри систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, Кременчуцький національний університет ім. Михайла Остроградського, Україна, м. Кременчуг, вул. Первомайская 20, E-mail: [lindenn@ukr.net](mailto:lindenn@ukr.net)

**Риков Геннадій Юрійович (Рыков Геннадий Юрьевич, Rykov Gennadiy Yur'yevich)**, старший викладач кафедри електричних машин і апаратів, Кременчуцький національний університет ім. Михайла Остроградського, Україна, м. Кременчуг, вул. Першотравнева 20

Укладач: С. О. Федорчук, аспірант.

*В. Г. ЯГУП, К. В. ЯГУП*

### **ЗАСТОСУВАННЯ ОПТИМІЗАЦІЙНИХ МЕТОДІВ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ**

Стаття присвячена розробці і дослідженню методів оптимізації режимів систем електропостачання електротехнічних комплексів і систем з несиметричними і нелінійними навантаженнями з метою підвищення енергетичних показників і розрахунку параметрів симетро-компенсуючих пристроїв та силових активних фільтрів, що забезпечують оптимальні режими з допомогою математичних і комп'ютерних моделей і з застосуванням пошукової оптимізації, реалізованої з використанням сучасних програмних засобів комп'ютерної математики.

**Ключові слова:** система електропостачання, несиметрія струмів і напруг, реактивна потужність, симетро-компенсуючий пристрій, силовий активний фільтр, змінні оптимізації, критерій оптимізації.

*В. Г. ЯГУП, К. В. ЯГУП*

### **ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Статья посвящена разработке и исследованию методов оптимизации режимов систем электроснабжения электротехнических комплексов и систем с несимметричными и нелинейными нагрузками с целью повышения энергетических показателей и расчета параметров симетро-компенсирующих устройств и силовых активных фильтров, обеспечивающих оптимальные режимы с помощью математических и компьютерных моделей и с применением поисковой оптимизации, реализованной с использованием современных программных средств компьютерной математики.

**Ключевые слова:** система электроснабжения, несимметрия токов и напряжений, реактивная мощность, симетрией-компенсирующее устройство, силовой активный фильтр, переменные оптимизации, критерий оптимизации.

*V. G. YAGUP, K. V. YAGUP*

### **APPLICATION OF OPTIMIZATION METHODS FOR SOLVING THE PROBLEM OF ENHANCING ENERGY EFFICIENCY OF ELECTRIC POWER ENGINEERING SYSTEMS**

The thesis is devoted to the development and research of methods for optimizing the modes of power supply systems for electrotechnical complexes and systems with asymmetric and nonlinear loads in order to increase energy parameters and calculate the parameters of symmetric-compensating devices that provide optimal modes by means of mathematical and computer models and using search optimization implemented using modern software of computer mathematics. Generalized algorithms for implementing search optimization using modern computer software packages have been developed. The possibilities of applying various optimization criteria for solving the problems of increasing the power indicators of power supply systems with asymmetrical and non-linear loads are shown.

**Keywords:** power supply system, asymmetry of currents and voltages, reactive power, symmetric-compensating device, power active filter, optimization variables, optimization criterion.

**Вступ.** Проблеми якості електричної енергії стають все більш нагальними тому що збільшується електроозброєність всіляких галузей і зростає номенклатура навантажень. При цьому в мережі зростають частки потужностей зсуву, несиметрії та спотворення, що значно погіршує основні енергетичні параметри електричної мережі [1]. Граничні значення цих параметрів задаються нормативними документами, однак на практиці контроль реальних значень здійснюється недостатньо.

Розвиток силової напівпровідникової техніки та мікроконтролерів відкриває нові можливості для покращання енергетичних показників в системах електропостачання.

Тому розробка нових методів аналізу електромагнітних процесів і синтезу симетро-компенсуючих пристроїв і силових активних фільтрів представляється актуальною.

Перспективними в цьому напрямку є методи, основані на використанні комп'ютерних моделей в поєднанні з оптимізаційними методами.

**Метою статті** є дослідження застосування пошукової оптимізації та комп'ютерних моделей для розв'язання задач покращання енергетичних показників систем електропостачання в трипровідних та чотирипровідних трифазних системах з несиметричними та з нелінійним навантаженнями.

**Пошукова оптимізація.** Під пошуковою оптимізацією стосовно задачі покращання енергетичних показників електротехнічних комплексів та систем будемо розуміти обчислювальний процес пошуку оптимальних режимів і параметрів електротехнічної системи за допомогою оптимізаційних алгоритмів і комп'ютерних програм з адаптацією до умов отримання рішення шляхом введення обмежень та корекцій, пов'язаних з фізичною реалізуемістю симетро-компенсуючих пристроїв.

При реалізації пошукової оптимізації необхідно визначити параметри оптимізації і сформулювати критерій оптимізації. Параметрами оптимізації можуть виступати параметри реактивних елементів симетро-компенсуючого пристрою, а при застосуванні силових активних фільтрів – амплітуда еталонних сигналів і початкова напруга на накопичувальному конденсаторі. Критеріями оптимізації можуть бути: баланс активних потужностей на навантаженні та на джерелах живлення, відсутність реактивної потужності, рівність амплітуд живильних струмів, або зменшення амплітуд живильних струмів до найменшого значення, зведення до нуля зворотної симетричної складової струму в трифазних трипровідних системах та подавлення нульової  $I_0$  і зворотної  $I_2$  симетричних складових, у випадку

чотирипровідних систем.

Якщо виходити з цих положень, то має сенс цільову функцію формувати у вигляді кульової метрики. Наприклад, кульова метрика, складена з реактивних потужностей джерел має такий вигляд:

$$M = \sqrt{Q_a^2 + Q_b^2 + Q_c^2}. \quad (1)$$

Процес пошукової оптимізації може бути організованим в обчислювальному середовищі MATLAB шляхом взаємодії програмного забезпечення та візуальної моделі через робочий простір середовища моделювання. Реалізація пошукової оптимізації може бути здійснена за допомогою вбудованих функцій `fminsearch()`, яка працює із використанням алгоритму деформованого багатогранника, або `fminunc()` – із використанням методу Ньютон.

Інший спосіб реалізації пошукової оптимізації виконується за допомогою попередньо складеної математичної моделі електричної системи, яка оптимізується у пакеті MathCAD за допомогою блоку `given-find`.

Оптимізація режиму роботи трипровідної системи електропостачання.

Традиційно для симетрування струмів застосовуються симетро-компенсуючі пристрої, що представляють собою реактивні елементи, найчастіше косинусні конденсатори, які підключені між фазами [2]. Точне значення реактивних елементів симетро-компенсуючого пристрою можна розрахувати із використанням пошукової оптимізації.

Проведено дослідження несиметричного режиму роботи системи електропостачання з використанням математичного пакета MathCAD для вирішення сформованої математичної моделі, що складається з топологічних і компонентних рівнянь системи.

Для здійснення розрахунку параметрів симетро-компенсуючого пристрою в пакеті MathCAD з використанням пошукової оптимізації, змінні повної системи були доповнені комплексними опорними компенсуючих елементів. Умови компенсації реактивної потужності сформульовані у вигляді критерію нерівності нулю реактивної потужності, що віддається кожним джерелом е.р.с. Для реалізації симетро-компенсуючого пристрою виключно реактивними елементами, введені відповідні обмеження на відсутність дійсних частин у опорів цих елементів. Додатково введено також обмеження на знак уявної частини опорів симетро-компенсуючих елементів, який відповідає саме ємнісному характеру цих елементів.

Для схеми з прийнятими параметрами після завершення виконання пошукової оптимізації амплітуди струмів в найбільш навантажених фазах зменшилися в чотири рази, амплітуди напруг на вузлах навантаження стали однаковими, струми в кожній з фаз повністю збіглися за фазовими кутами з їх напругами.

Аналітичний метод розрахунку параметрів симетро-компенсуючого пристрою, не виконав повного симетрування струмів [3]. Суть методу

полягає в розрахунку струму зворотної послідовності по амплітудам несиметричних струмів мережі і подальшому обчисленні струмів симетруючого пристрою. Крім того, аналітичний метод не враховує можливість того, що навантаження несе індуктивний характер, внаслідок чого реактивна потужність не була скомпенсована.

Пошукова оптимізація параметрів симетро-компенсуючого пристрою була так само здійснена за допомогою візуальної моделі, створеної в системі SimPowerSystem (SPS) в програмі MATLAB. Перевагою такого методу є відсутність необхідності складання РІВНЯНЬ математичної моделі. Цільова функція сформована, як кульова метрика з реактивних потужностей.

Знайдені значення ємностей компенсуючих конденсаторів практично співпали з тими значеннями, які були обчислені в MathCAD.

На практиці вимірювання електричних показників здійснюється на стороні навантаження. Тому для здійснення умов, наближених для реальних, цільова функція формується шляхом вимірювань на стороні навантаження за допомогою фільтра симетричної складової зворотної послідовності, що представляє собою резистивно- ємнісний фільтр (рис. 1).

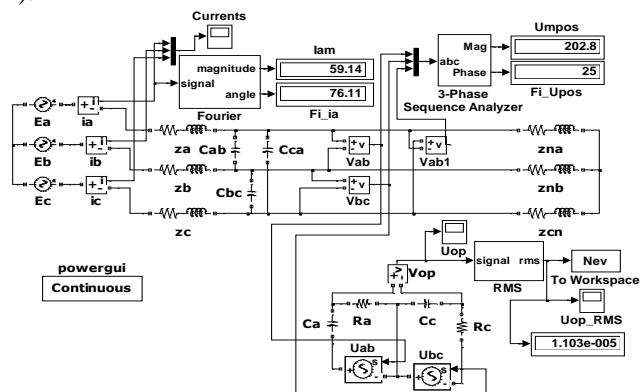


Рис.1 – Візуальна модель трифазної системи електропостачання з резистивно-ємнісним фільтром

При цьому в якості цільової функції використовується діюче значення вихідної напруги фільтра.

Слід зазначити, що в залежності від початково заданих значень в результаті оптимізації виходять різні варіанти значень ємностей симетруючих конденсаторів. При цьому для деяких варіантів може виникати перекомпенсація або недокомпенсація реактивної потужності. Для приведення системи до оптимального режиму запропонований метод обертання векторів струмів в лініях електропередачі шляхом зміни величин ємностей батарей конденсаторів на одну і ту ж величину. Найбільш прийнятною ознакою входу в оптимальний режим є зниження амплітуди лінійного струму до мінімуму. Передбачено варіант переходу до двоконденсаторного симетруючого пристрою, який здійснюється вирахуванням з величин ємностей триконденсаторного симетруючого пристрою ємності конденсатора з найменшою ємністю.

**Оптимізація режиму роботи чотирипровідної системи електропостачання.** При оптимізації режиму чотирипровідних трифазних систем із нульовим проводом для формування цільової функції використовуються три вихідні величини аналізаторів: амплітуда зворотної  $I_2$  та амплітуда нульової  $I_0$  послідовностей струмів, а також фаза  $\phi_1$  прямої послідовності. Симетро-компенсуючий пристрій представлено п'ятьма елементами, три елементи підключаються між фазами, а решта два – між фазами і нульовим проводом. Для вирішення задачі синтезу, спочатку всі типи елементів були задані, як конденсатори, а потім в процесі оптимізації виявлялося, які з елементів були призначені невірно. Сигналом на витіснення елемента було прагнення процесу оптимізації дати параметру оптимізації граничне значення. При цьому величина цільової функції перестає змінюватися, не досягаючи свого оптимального значення. В цьому випадку необхідно або виключити елемент шляхом його розірвання (закорочування), або змінити тип реактивного елемента на дуальний. Недоліком цього методу є те, що процес визначення типу елемента не є автоматичним, і потребує участі людини.

Автоматизація процесу оптимізації здійснена за рахунок підключення надлишкового числа параметрів оптимізації. Для автоматичного визначення типу елемента, використовується штучний прийом включення в кожній гілці симетро-компенсуючого пристрою пари шунтуючих один одного конденсатора і котушки індуктивності, що утворюють узагальнений реактивний елемент з можливістю одночасної зміни параметрів обох елементів в процесі оптимізації (рис. 2).

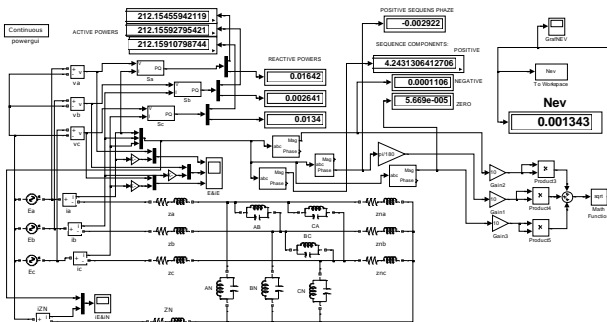


Рис. 2 – Візуальна модель чотирипровідної системи електропостачання

По завершенні процесу оптимізації необхідно виконати заміну пари кожного узагальненого реактивного елемента одним реактивним елементом, тип якого визначається превалюванням реактивності в узагальненому елементі, який слід замінити. Крім того, передбачена можливість переходу на п'ятиелементну схему пристрою, шляхом виключення такого надлишкового елемента, опір якого перевищує опори інших елементів на кілька порядків.

Розроблений метод визначення оптимального режиму, що базується на декомпозиції системи електропостачання, дозволяє визначити режимні параметри системи електропостачання без

підключення симетро-компенсуючого пристрою. Такий підхід дозволяє поліпшити збіжність процесів рішення і прискорити отримання параметрів оптимального режиму і синтезу симетро-компенсуючого пристрою. За допомогою запропонованого методу були отримані всі шість варіантів п'ятиелементного симетро-компенсуючого пристрою для чотирипровідної трифазної несиметричної системи.

Розрахунок параметрів симетро-компенсуючих пристроїв для двох паралельно ввімкнених споживачів з урахуванням вкладу кожного з них

Розрахунок параметрів симетрувальних пристроїв уряді робіт [2 – 4] проводиться за прикладі узагальненої системи, що складається з джерел електричної енергії, лінії електропередачі і несиметричним комплексним навантаженням. При цьому розрахунки проводяться для симетро-компенсуючого пристрою, фактично призначеного компенсувати реактивну потужність всього еквівалентного навантаження в даній точці приєднання, без врахування впливу кожного конкретного споживача на вклад в збільшення ім реактивної потужності в залежності від обладнання, яке споживає енергію в системі. У той же час раціональним представляється підхід, при якому кожен споживач відповідає за внесену ним частку в погіршення умов електроспоживання через несиметрію і реактивності навантаження [5, 6].

Розроблений метод дозволяє розрахувати параметри симетро-компенсуючих пристроїв для випадку двох несиметричних комплексних навантажень, включених паралельно, з урахуванням конкретного внеску кожного споживача щодо несиметрії і реактивної потужності в трифазній системі електропостачання (рис. 3).

Джерело енергії PE передає електроенергію споживачам Load1 і Load2 через лінію електропередачі PL. Розглядається паралельне включення навантажень, що обумовлює наявність одного загального пункту підключення споживачів (вузли a, b, c). Кожне з навантажень вносить свою частку реактивної потужності, обумовлену реактивним характером навантаження і несиметрією її параметрів. Симетро-компенсуючі пристрої SCD1 і SCD2 призначені для повної компенсації реактивних потужностей, що створюються кожним з навантажень. Завдяки такій постановці завдання, в кінцевому рахунку, досягається оптимальний режим при мінімізації втрат на ділянці лінії електропередачі PL.

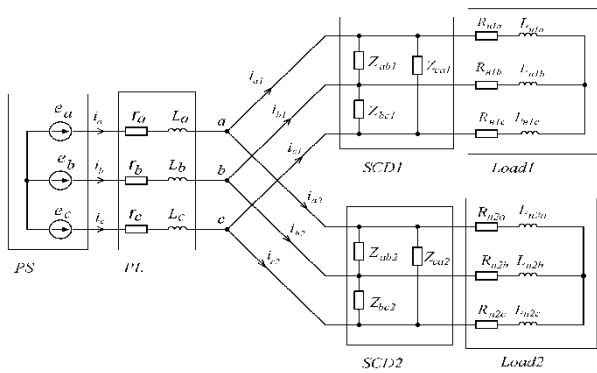


Рис. 3 – Принципова схема системи з двома паралельними навантаженнями

Візуальна модель системи, що досліджується (рис. 4) характеризується наступними параметрами:

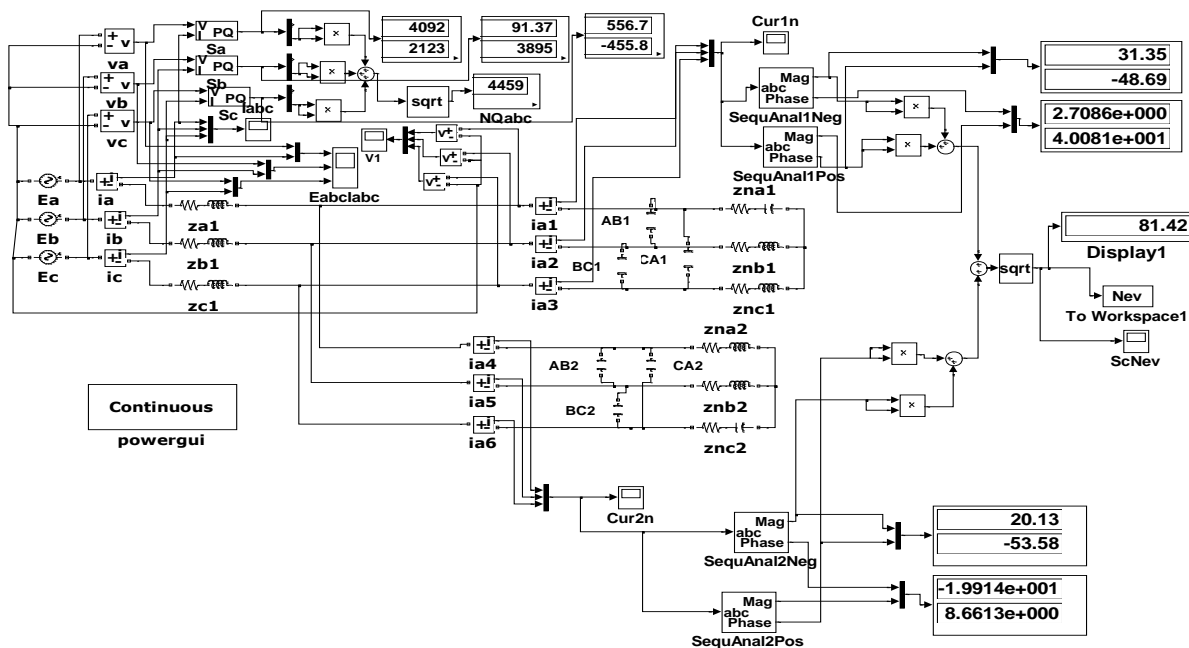


Рис. 4 - Візуальна модель системи електропостачання з двома споживачами

Аналіз несиметричного режиму демонструє різку різницю струмів по амплітудах у всіх лініях електропередачі (рис. 5, 6, 7). Напруги в пунктах підключення навантажень (a, b, c) істотно знижуються в порівнянні з номінальною амплітудою напруги 100 В. Фази струмів в лініях джерел не збігаються з фазами живильних напруг.

Показання віртуальних приладів для вимірювання активних і реактивних потужностей (рис. 4), свідчать про те, що джерела навантажені нерівномірно. Повні потужності, що віддаються джерелами, складають величини  $Sea = (4092 + j2123)$  ВА;  $Seb = (91.37 + j3895)$  ВА;  $Sec = (556.7 - j455.8)$  ВА.

живильні джерела мають амплітуди 100 В і частоту 50 Гц; комплексні опори ліній електропередачі прийняті рівними  $z1=z2=(0.1+j\omega 0.001)$  Ом. Навантаження включені за схемою зірки. Параметри першого навантаження:  $zNa1=0.7-j\omega 0.005$ ;  $zNb1=1+j\omega 0.04$ ;  $zNc1 = 2 + j\omega 0.04$ . Параметри другого навантаження:  $zNa2 = 0.7 + j\omega 0.005$ ;  $zNb2 = 1 + j\omega 0.04$ ;  $zNc2 = 2 - j\omega 0.04$ . Таким чином, в кожній з трифазних навантажень містяться несиметричні комплекси фазних навантажень, які відрізняються як за величинами, так і за типами реактивності. Такі параметри забезпечують роботу системи в різко несиметричному режимі зі значними рівнями реактивної потужності.

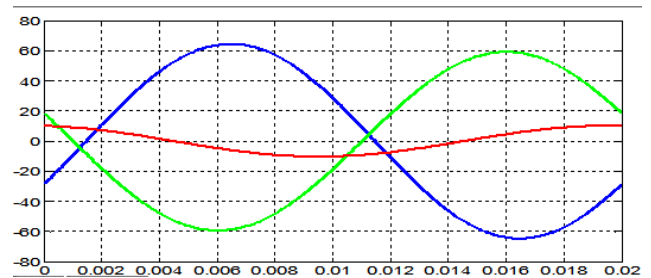


Рис. 5 – Діаграми струмів в лініях навантаження Load1

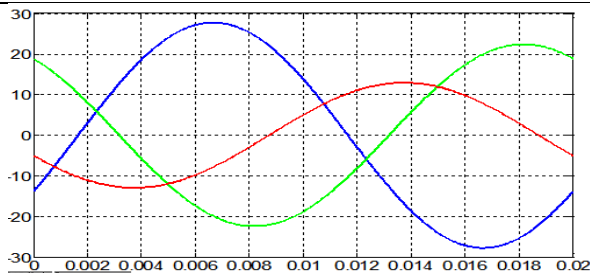


Рис. 6 – Діаграми струмів в лініях навантаження Load2

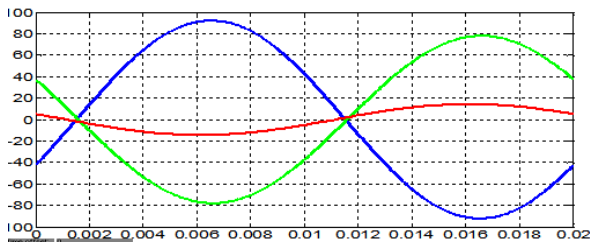


Рис. 7 – Діаграми струмів в лініях джерел живлення

З зіставлення діаграм видно, що струми різко відрізняються по амплітудах у всіх лініях електропередачі. Напруги в пунктах підключення навантажень (а, б, с) істотно знижуються в порівнянні з номінальною амплітудою напруги 100 В.

Визначення режиму повної компенсації реактивної потужності здійснюється методом пошукової оптимізації з використанням візуальної моделі. Метою пошукової оптимізації є знаходження параметрів симетро-компенсуючих пристроїв, при яких забезпечується компенсація реактивної потужності і усунення несиметрії струмів і напруг в системі.

Формування цільової функції, яка забезпечить справедливий розподіл компенсуючих реактивностей між СКУ1 і СКУ2, є ключовим завданням у вирішенні поставленої проблеми обліку вкладу кожного з навантажень в створення несиметрії і генерацію реактивної потужності.

Цільова функція  $N_{ss}$  формується як кульова метрика амплітуд зворотних послідовностей і значень фазових кутів прямих послідовностей для обох навантажень:

$$N_{ss} = \sqrt{ImNeg1^2 + \varphiPos1^2 + ImNeg2^2 + \varphiPos2^2} \quad (2)$$

де  $ImNeg1$  і  $ImNeg2$  – амплітудні значення зворотних симетричних складових для струмів у фідерах першого та другого навантажень відповідно;

$\varphiPos1$  і  $\varphiPos2$  – фазові кути прямих симетричних складових для струмів у фідерах першого та другого навантажень відповідно.

Як програма оптимізації використовується вбудована функція  $fminunc()$ , що реалізує стратегію і алгоритм методу спряжених градієнтів.

Визначення типів симетро-компенсуючих елементів в ході оптимізації із використанням властивості процесу оптимізації витіснити ті елементи, які не сприяють знаходженню мінімуму.

В кінцевому рахунку були визначені наступні параметри симетро-компенсуючих пристроїв:  $Cab1 = 1144.7698$  мкФ,  $Cbc1 = 633.1286$  мкФ,  $Lca1 = 0.019592$  Гн,  $Cab2 = 673.3340$  мкФ,  $Cbc2 = 23.3706$  мкФ,  $Lca2 = 0.038555$  Гн. При цьому сталий симетричний режим характеризується наступними результатами. Амплітуди струмів, що протікають в лінії електропередачі для Load1 по фазах А, В і С складають величини 41.285А. Значення амплітуд струмів, що протікають в лінії електропередачі для Load2 рівні 7.87А.

Оптимізація режиму роботи із застосуванням силових активних фільтрів.

У разі нелінійного навантаження реактивну потужність доцільно компенсувати застосовуючи силові активні фільтри [7– 9]. Традиційно такі фільтри представляють собою мостові інвертори, зібрані на IGBT транзисторах з шунтуючими діодами, живлення яких здійснюється накопичувальним конденсатором. Компенсація реактивної потужності і симетрування струмів здійснюється сформованими фільтром струмами, що інжектуються у систему електропостачання через буферні дроселі.

Застосування методу пошукової оптимізації дозволяє уникнути складних перетворень Кларк і Парка для визначення параметрів фільтра, які оптимізують режим роботи системи електропостачання. При цьому необхідно, щоб транзистори управлялися таким чином, щоб в джерелах еталонного сигналу сформувалися такі коригувальні сигнали, які забезпечать в системі мінімізацію реактивної потужності. Слід зазначити, що параметром оптимізації буде амплітуда еталонного сигналу, яка буде однаковою для всіх трьох каналів управління.

Цільова функція може бути сформована, як різниця між сумою активних потужностей, заміряних на стороні джерел і на стороні навантаження. Для розглянутого випадку лінійного навантаження необхідно забезпечити також мінімізацію в кривих струмів джерел і коригувальних струмів вищих гармонік, що досягається включенням відповідних показників в цільову функцію.

Запуск процесу оптимізації може здійснюватися при завданні початкового значення напруги як рівного нулю, та і відмінного від нуля на накопичувальному конденсаторі інвертора. Тривалість цього процесу може бути відносно великою, що уповільнює процес оптимізації. Тому доцільно ставити значення початкової напруги на конденсаторі близьким до сталого значення.

Орієнтовно це значення визначається як вихідна напруга еквівалентного мостового випрямляча, що заряджає накопичувальний конденсатор інвертора. Це значення також може бути включено як складова цільової функції, і в цьому випадку рішення буде

знайдено, в тому числі і для сталого значення цієї напруги.

В результаті виконання оптимізації значення амплітуд струмів стало рівним 7,771117 А (рис. 9).

Сумарна реактивна потужність джерел при несиметрії 3283 VAR звелася до значення 0,248 Var (рис. 8).

Початкове значення напруги на накопичувальному конденсаторі приймалося нульовим, тому в першу чверть періоду протікає перехідний процес заряду конденсатора через зворотні діоди, які шунтують силові транзистори активного фільтра (рис. 10).

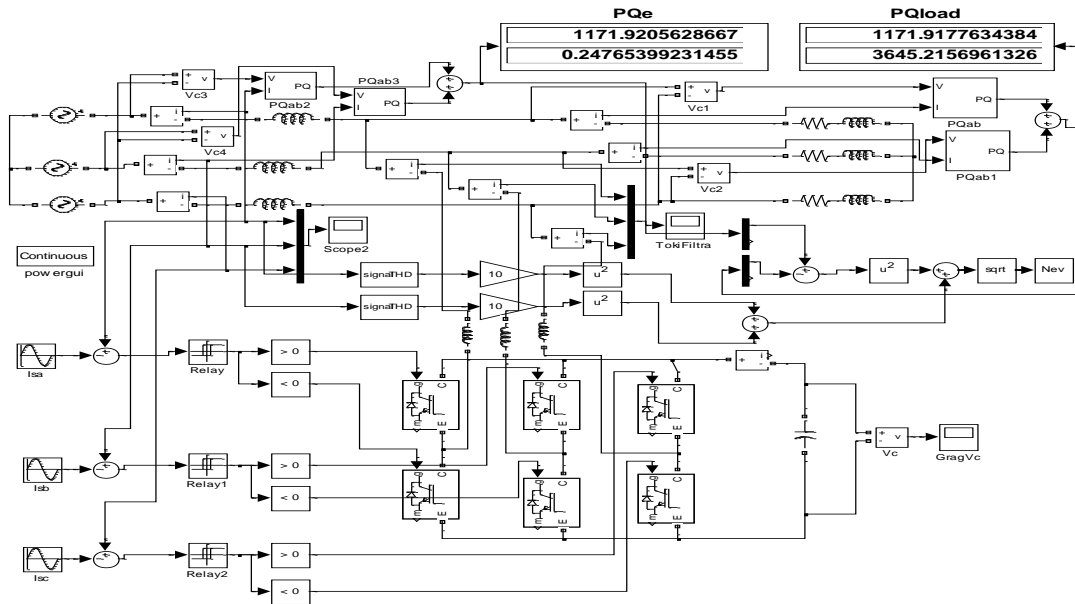


Рис. 8- Візуальна-модель системи електропостачання з паралельним силовим активним фільтром

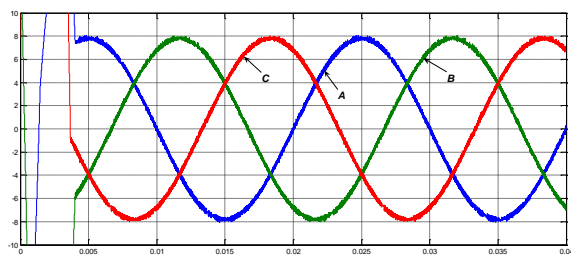


Рис. 9- Струми в лініях електропередачі після завершення оптимізації режиму

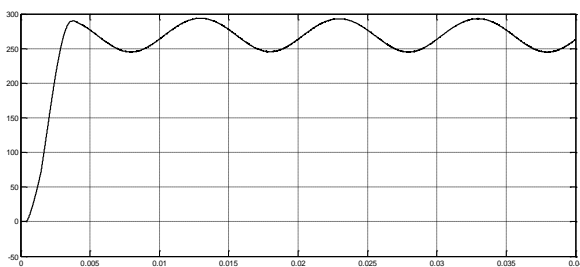


Рис. 10 - Напруга на накопичувальному конденсаторі силового активного фільтра

На інтервалі цього перехідного процесу транзистори замкнені і на керуючі сигнали не реагують. Накопичувальний конденсатор забирає на себе енергію, запасену в дроселях активного фільтра, тому напруга на конденсаторі перевищуватиме амплітуду живильної напруги, що живить джерела енергії.

При виході на рішення в процесі оптимізації після заряду конденсатора напруга на конденсаторі

змінюється за періодичним законом. В інших випадках напруга на конденсаторі або наростає (якщо конденсатор отримує від джерел напруги живлення надлишкову енергію), або зменшується (якщо енергія від джерел недостатня для підтримки роботи активного фільтра).

При надлишковій амплітуді еталонних сигналів спостерігається наростання напруги на накопичувальному конденсаторі, при недостатній же її амплітуді напруга на конденсаторі прагне знизитися до нуля. Лише при оптимальному значенні амплітуд еталонних сигналів напруга на конденсаторі має періодично повторювану форму.

Тому критерієм оптимізації може служити періодичність напруги на накопичувальному конденсаторі, який виступає чутливим елементом щодо виконання умови врівноваженості потужностей в системі електропостачання. Таким чином цільова функція може бути сформована з дискретних значень напруги на конденсаторі, заміряних на початку кожного періоду:

$$N_{ev} = \sqrt{(V_{C5} - V_{C4})^2 + (V_{C4} - V_{C3})^2 + (V_{C3} - V_{C2})^2 + (V_0 - 300)^2} \quad (3)$$

де  $V_{C2}, V_{C3}, V_{C4}, V_{C5}$  – напруги на конденсаторі в кінці 2, 3, 4 і 5 періодів;

$V_0$  – середнє значення напруги на конденсаторі.

Для реалізації сформованої цільової функції блок To Workspace Vc передає вектор дискретних значень напруг з моделі в програму. Цей блок налаштований таким чином, що значення напруги на

конденсаторі знімаються кожні 0.02 сек. Отримані дані зберігаються в масиві робочого простору, з елементів якого далі і формується перша частина цільової функції (3).

Для завдання певного рівня напруги на накопичувальному конденсаторі цільова функція доповнена другою частиною, яка представляє квадрат

різниці між значенням нульової гармоніки напруги і значенням, відповідним рівню напруги на конденсаторі, що задається. Реалізація такого розрахунку в моделі (рис. 11) здійснюється блоком виділення нульовий гармоніки Fourier і блоком передачі даних з моделі в робочий простір MATLAB To Workspace у вигляді змінної з ім'ям V0.

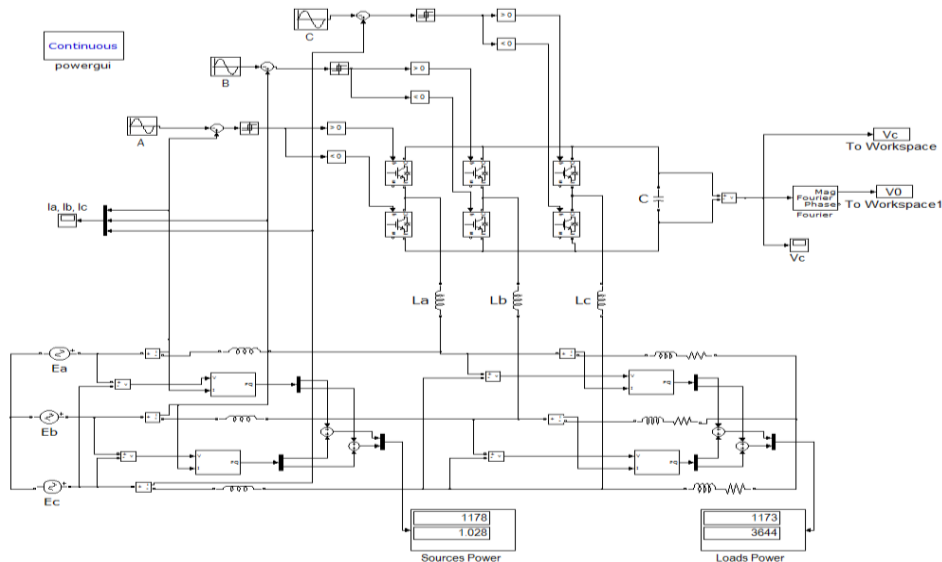


Рис. 11 – Візуальна модель несиметричної системи електропостачання з силовим фільтром

Слід зазначити, що в цільовій функції не використовуються значення напруги в перший період коливання, так як в цей момент часу відбувається перехідний процес, і дані з цього проміжку часу не є інформативними. Час роботи моделі налаштований на 0.1 сек.

Пошукова оптимізація була завершена після виконання 298 ітерацій, в результаті чого була визначена амплітуда еталонного сигналу рівна  $I=7.7875A$ , а також початкова напруга на конденсаторі  $V_{C0} = 301.2154 V$ . При цьому струми стали симетричними (рис. 12), а їх фази стали збігатися з відповідними фазами джерел напруг.

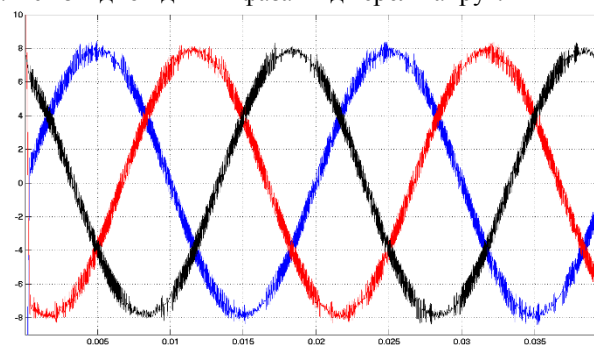


Рис. 12 - Діаграми мережних струмів після завершення виконання пошукової оптимізації

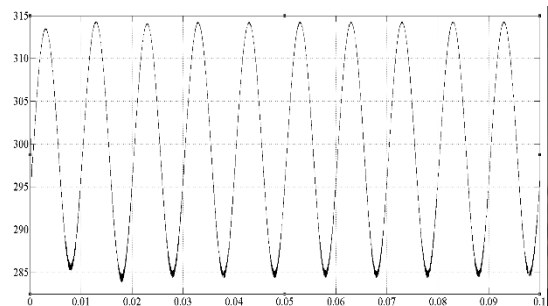


Рис. 13 - Пульсації напруги на конденсаторі САФ

### Висновки

Розроблені критерії та визначені параметри оптимізації при оптимізації роботи системи електропостачання із підключенням симетрокомпенсуючого пристрою та силового активного фільтра. Застосування запропонованого методу на імітаційній моделі показало його працездатність і високу точність. Встановлено, що в процесі проведення пошукової оптимізації автоматично визначається раціональний режим роботи системи електропостачання із несиметричним навантаженням, який характеризується підвищенням коефіцієнта потужності, зменшенням амплітуди споживаного від мережі струму і істотним зниженням втрат в системі електропостачання. При цьому реактивна потужність повністю компенсується, а амплітудні значення струмів мережі істотно знижуються.

### Список літератури

1. Жежеленко И.В. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях / Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л.–4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2005.–261 с.



2. Кузнецов В. Г. Снижение несимметрии и несинусоидальности напряжений в электрических сетях / В. Г. Кузнецов, А. С. Григорьев, В. Б. Данилюк. – К.: Наукова думка, 1992. – 240 с.
3. Веников В.А. Электрические сети / В.А.Веников, А.А.Глазунов, Л.А.Жуков и др. – М.:Высшая школа,1971. – 438 с.
4. Шидловский А. К., Симметрирование однофазных и двухплечевых электротехнологических установок / Шидловский А. К., Борисов Б.П.– Киев: Наукова думка, 1977.–159 с.
5. Сендерович Г.А. Актуальность определения ответственности за нарушение качества электроэнергии по показателям колебаний напряжения / Г. А. Сендерович, А. В. Дяченко. – Електротехніка і Електромеханіка. - 2016. - №2. – С. 54-60.
6. Дерзкий В.Г., Расчет платы за реактивную мощность /Дерзкий В.Г., Скиба В.Ф. // Энергетика та електрифікація. – 2010. – №2. – С. 53–57.
7. Murat Kale. An adaptive band current controller for shunt active power / Murat Kale, Engin Ozdemir// Electric Power Systems Research. – 2005 – N. 73. – P. 113 – 119.
8. Розанов Ю.К. Современные методы регулирования качества электроэнергии средствами силовой электроники / Ю. К. Розанов, М. В. Рябчицкий, А. А. Кваснюк. – Електротехніка. – 1999. – № 4. – С. 28–32.
9. Чопик В.В. Просторово-векторне керування паралельними активними фільтрами / В.В.Чопик, В.М.Михальський, С.Й.Поліщук, В.М.Соболев // Технічна електродинаміка. – 2013. - №4. – С.34-41.

## References (transliterated)

1. Zhezhelenko I.V. Kachestvo elektroenergii na promyshlennykh predpriyatiyakh / Zhezhelenko I.V., Sayenko YU.L.–4-ye izd., pererab. i dop. – M.: Energoatomizdat, 2005.–261 s.
2. Kuznetsov V. G. Snizheniye nesimmetrii i nesinusoidal'nosti napryazheniy v elektricheskikh setyakh / V. G. Kuznetsov, A. S. Grigor'yev, V. B. Danilyuk. – K.: Naukova dumka, 1992. – 240 s.
3. Venikov V.A. Elektricheskiye seti / V.A.Venikov, A.A.Glazunov, L.A.Zhukov i dr. – M.:Vysshaya shkola,1971. – 438 s.
4. Shidlovskiy A. K., Simmetrirovaniye odnofaznykh i dvukhplechevykh elektrotekhnologicheskikh ustanovok / Shidlovskiy A. K., Borisov B.P.– Kiyev: Naukova dumka, 1977.–159 s.
5. Senderovich G.A. Aktual'nost' opredeleniya otvetstvennosti za narusheniye kachestva elektroenergii po pokazatelyam kolebaniy napryazheniya / G.A. Senderovich, A.V. Dyachenko.– Yelektrotekhnika i Yelektromekhanika. 2016. №2. –S. 54 60.
6. Derzkiy V.G., Raschet platy za reaktivnyuyu moshchnost' /Derzkiy V.G., Skiba V.F. // Energetika ta yelektrifikatsiya. – 2010. – №2. – S. 53–57.
7. Murat Kale. An adaptive band current controller for shunt active power / Murat Kale, Engin Ozdemir// Electric Power Systems Research. – 2005 – N. 73. – P. 113 – 119.
8. Rozanov YU. K. Sovremennyye metody regulirovaniya kachestva elektroenergii sredstvami silovoy elektroniki / YU.K. Rozanov, M.V. Ryabchitskiy, A.A. Kvasnyuk – Elektrotekhnika. – 1999. – № 4. – S. 28–32.
9. Chopik V.V. Prostorovo-vektorne keruvannya paralel'nimi aktivnimi fil'trami / V.V.Chopik, V.M.Mikhal'skiy, S.Y.Polishchuk, V.M.Sobol'ev // Tekhnichna yelektrodinamika. – 2013. №4. – S.34-41.

Надійшла

(received)

03.12.2017

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Ягуп Катерина Валеріївна (Ягуп Екатерина Валериевна, Yagup Katerina Valeriivna)** – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова, м. Харків; тел.: (057) 731-30-40; e-mail: kata3140@gmail.com.

**Ягуп Валерій Григорович (Ягуп Валерий Григорьевич, Yagup Valery Grigorovich)** – доктор технічних наук, професор кафедри електропостачання міст, Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова, м. Харків; тел.: (057) 731-30-40; e-mail: yagup.walery@gmail.com.

Укладач: С. О. Федорчук, аспірант.

УДК 621.311

**А.А. МАКОВІЙЧУК****АНАЛІЗ МОДЕЛІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ДВОМОДУЛЬНОЇ АЕС З РЕАКТОРАМИ ЧЕТВЕРТОГО ПОКОЛІННЯ ТИПУ НТР**

Проведено аналіз технологічної частини АЕС з модульним реактором типу НТР. Виявлено основні проблеми дослідження маневреності та стабільної роботи АЕС з модульними реакторами. Створена динамічна модель в середовищі MATLAB/Simulink для АЕС типу НТР-PM з двома реакторними модулями для дослідження основних законів управління реакторними модулями та координації модулів. Отримані результати моделювання підтверджують стабільну роботу мультимодальної АЕС під час поетапного зниження потужності першого та другого модулів.

**Ключові слова:** двомодульна АЕС, координація модулів, зворотний зв'язок, система управління, алгоритм регулювання, динамічне моделювання

**А.А. МАКОВІЙЧУК****АНАЛИЗ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВУХМОДУЛЬНОЙ АЭС С РЕАКТОРАМИ ЧЕТВЕРТОГО ПОКОЛЕНИЯ ТИПА НТР**

Проведен анализ технологической части АЭС с модульным реактором типа НТР. Выявлены основные проблемы исследования маневренности и стабильной работы АЭС с модульными реакторами. Создана динамическая модель в среде MATLAB / Simulink для АЭС типа НТР-PM с двумя реакторными модулями для исследования основных законов управления реакторными модулями и координации модулей. Полученные результаты моделирования подтверждают стабильную работу мультимодальной АЭС во время поэтапного снижения мощности первого и второго модулей.

**Ключевые слова:** двухмодульная АЭС, координация модулей, обратная связь, система управления, алгоритм регулирования, динамическое моделирование

**А.А. МАКОВІЙЧУК****ANALIZING OF CONTROL SYSTEM MODEL OF TWO-MODULAR NUCLEAR POWER PLANT WITH GENERATION 4 REACTORS TYPE HTR**

The analysis of the technological part of the nuclear power plant with a modular reactor of the HTR type was carried out. The main problems of studying the mobility and stable operation of nuclear power plants with modular reactors are revealed. A dynamic model was created in the MATLAB/ Simulink environment for the HTR-PM type nuclear power plant with two reactor modules for studying the basic laws governing reactor modules and coordinating modules. The obtained simulation results confirm the stable operation of the multi-module nuclear power plant during the stage-by-stage reduction of the power of the first and second modules. The high-temperature gas-cooled reactor is a reliable concept for the fourth generation modular reactor, which can be considered as the basic option for further development of the nuclear energy sector of Ukraine.

**Keywords:** two-modular NPP, module coordination, feedback, control system, control algorithm, dynamic modeling

**Вступ.**

Високотемпературний газоохолоджувальний реактор (НТР) – надійна концепція модульного реактору четвертого покоління, що може розглядатися як базовий варіант для подальшого розвитку ядерного сектору енергетики України. Завдяки високій температурі теплоносія на виході реактора, НТР можна застосовувати не тільки для виробництва електроенергії, але й як джерело тепла для промислових комплексів. Даний тип реактору має мультимодульну схему - на одну турбіну можливо підключати від двох ядерних реакторів до восьми, тобто перегріті потоки пари, що виробляються в модулях на основі ядерної розпаду, об'єднуються в турбіні для керування загальним тепловим навантаженням. Оскільки технологія контролю потужності традиційних одномодульних атомних станцій не може бути безпосередньо застосована до мультимодульних АЕС, необхідно провести аналіз методу управління потужністю мультимодульних установок, що пропонується для використання на протопитній АЕС типу НТР-PM, що споруджується в Китаї.

В даній роботі узагальнено дослідження проблеми управління потужністю для двомодульного блоку НТР-PM та отримані результати верифікації, що базуються на чисельному моделюванні.

**Загальна концепція системи управління АЕС з реактором типу НТР.** Система управління технологічними процесами - це ключова методика забезпечення безпечної, стабільної та ефективної роботи кожної атомної станції та збалансування процесів енергопостачання та попиту. Оскільки два модулі реакторів АЕС типу НТР-PM об'єднані спільною вторинною петлею, включаючи турбінний / генераторний режими, і оскільки розташовані поруч два модулі тісно пов'язані один з одним трубопроводами (основні та допоміжні магістралі), доволі складно спроектувати стратегію керування потужністю для двомодульної АЕС, ніж для традиційної одномодульної. Крім того, установка НТР-PM є, по суті, нелінійною системою з великою місткістю та множинними входами, складність якої через динаміку безумовно призводить до ускладнення стратегії управління АЕС в цілому.

Як правило, використовується єдиний контрольний контур для регулювання кожного параметру процесу, такого як первинний потік, витрата живильної води, температури гелію та температури пари. Оскільки поєднання всіх цих одноконтрольних петель глибоко впливає на динамічну поведінку установки в цілому, необхідно узгодити ці керуючі петлі для задовільної стабільності роботи моделі.

© А.А. Маковійчук, 2018

**Проект системи управління.** Система управління АЕС з реакторами типу НТР має дві основні складові, проект контурів зворотного зв'язку та проект основного закону управління, які тісно пов'язані один з одним. Основним методом проектування системи управління технологічними процесами АЕС обрано метод аналізу відносного посилення. У цій роботі як петлі зворотного зв'язку, так і закон управління системи керування НТР-РМ розроблені за допомогою методів, запропонованих в [1-7] та методу координації модулів, запропонованих в [8, 9], які забезпечують глобально асимптотичну замкнуту стабільність через, що гарантує збільшення кінетики нейтронів, а також кінетичною енергією, що зберігається у вторинній петлі АЕС.

В даній роботі розглядається проект системи управління прототипної АЕС типу НТР-РМ, що споруджується в Китаї.

**Управління ядерними модулями.** Два ядерні модулі створюють складну нелінійну динамічну систему. Щоб забезпечити точні значення вихідного результату, необхідно надати належні закони управління для ядерного модуля.

Нещодавно, для АЕС з реакторами НТР, була запропонована нова модель управління [9], яка забезпечує глобально асимптотичну стійкість для ядерного модуля, якщо температура живильної води є сталою, а витрата гелію та витрати живильної води добре регулюється. Ця стратегія управління ядерним модулем може бути реалізована за допомогою циклів зворотного зв'язку та простих законів управління.

Завдяки мультимодульності схеми можливо створити АЕС бажаної потужності лише змінивши кількість модулів. Контроль координації модулів є однією з найважливіших характеристик мультимодулярної атомні станції, такої як НТР-РМ.

В [8] з'ясовано, що проблема координації модулів, по суті, є задача регулювання тиску вторинної петлі.

Контроль реакторних модулів забезпечують контролери для регулювання ядерної потужності, витрати потоку гелію, температури гелію на виході реактора, температури пари та вихідної теплової потужності реактору.

Загальна модель системи управління блоку АЕС з двома модулями наведена на рис.1 [9], основні параметри моделі наведені в табл.1 [9].

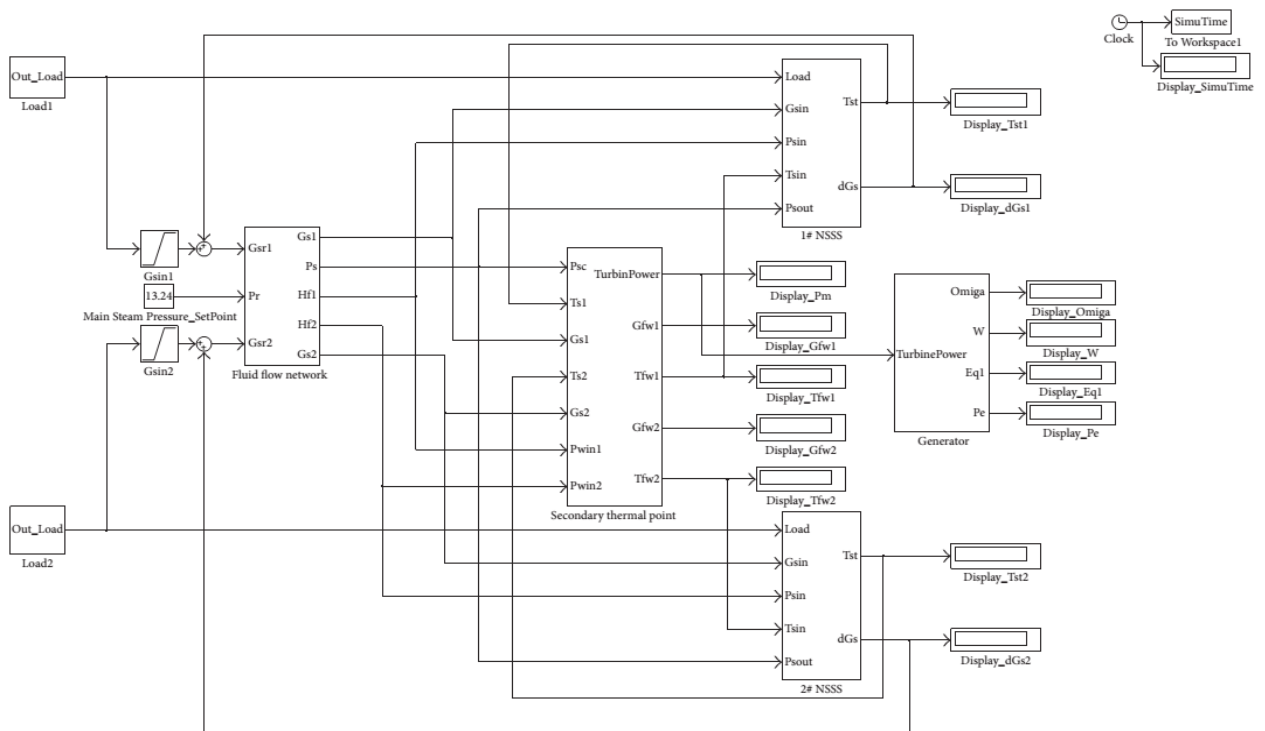


Рис. 1 – Модель системи управління блоку АЕС з реакторами типу НТР створена в Simulink



$$G_{HF}(s) = \frac{u_{HF}(s)}{W_{H,e}(s)} = k_{hf,p} + \frac{k_{hf,i}}{s}, \quad (2)$$

де  $k_{hf,p}$  - пропорційний коефіцієнт зворотного зв'язку;

$k_{hf,i}$  - інтегральний коефіцієнт зворотного зв'язку;

$u_{HF}$  - швидкість обертання первинної гелієвої повітродувки;

$W_{H,e}$  - помилка між посиланнями та фактичними значеннями витрати первинного гелію.

Загальна ефективність системи управління АЕС спирається на дві основні складові, ефективність системи управління модулями, та координація модулів. Перший - гарантується підходом контролю фізичних процесів реактору, другий забезпечується методом контролю тиску потоку. Усі закони управління приймаються за формами [1-7] як закони зворотного зв'язку з ПІ або ПД. Для законів керування ПІ, пропорційний коефіцієнт збільшений. Більш того, інтегральний коефіцієнт посилення більший, а перехідний період до стаціонарного стану коротший, але перебільшення більше. Зазвичай, пропорційний коефіцієнт вибирається не більше 1,0, а інтегральний коефіцієнт підсилення вибирається не більше 0,1. Для

закону ПД для регулювання виробки ядерної енергії пропорційний коефіцієнт вибирається не більше 0,5, а диференціальний коефіцієнт вибирається не більше, ніж 3,0.

**Результати моделювання.** Динамічні реакції зміни потужності від 100% до 95% від повної потужності блоку АЕС отримуються шляхом чисельного моделювання.

Моделювання проведено в програмному комплексі MATLAB в середовищі Simulink на основі моделі, наведеній на рис. 1.

Вихідний режим - установка НТР-РМ залишається в стаціонарному стані, потужність 100%, що означає, що два модулі працюють на повній потужності 100% реактора.

При 5000 с, задана величина теплової потужності першого модуля знижується зі 100% до 95%, а потім в 10 000 с, згадана тепла потужність другого модуля знижується від 100% до 95%. Динамічні реакції відносних ядерних сил, температура гелію на виході реактора, температура вихідної пари та теплові потужності модулів 1 та 2 наведені на рис. 2. Відгуки витрат  $Q_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ), тиск живильної води  $-H_{fk}$  ( $k = 1, 2$ ) і основний тиск пари, наведені на рис. 3.

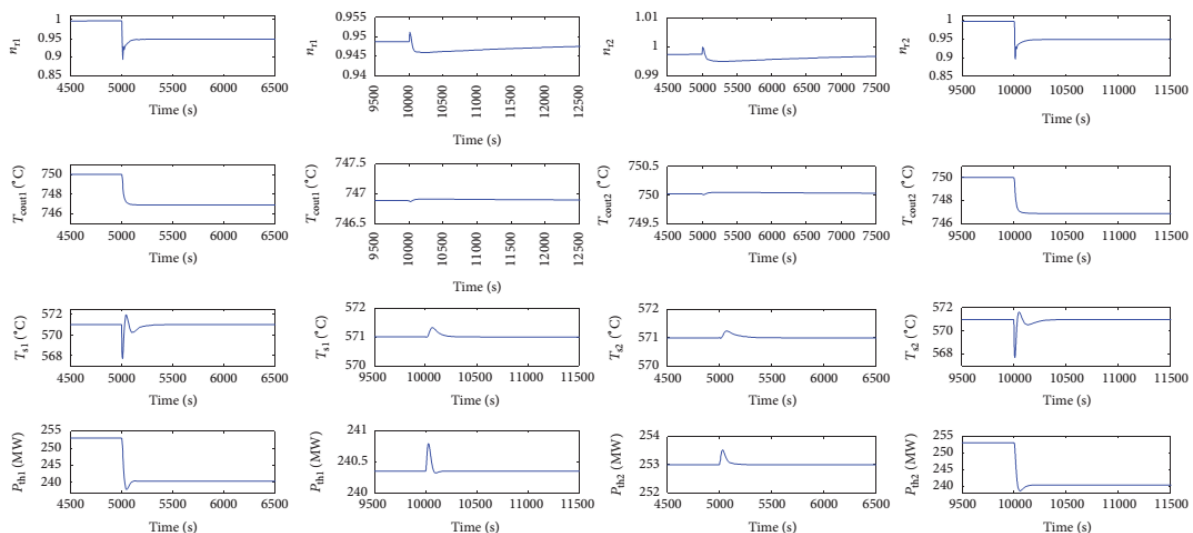


Рис. 2 – Відгуки в системі при зниженні потужності першого та другого модулів

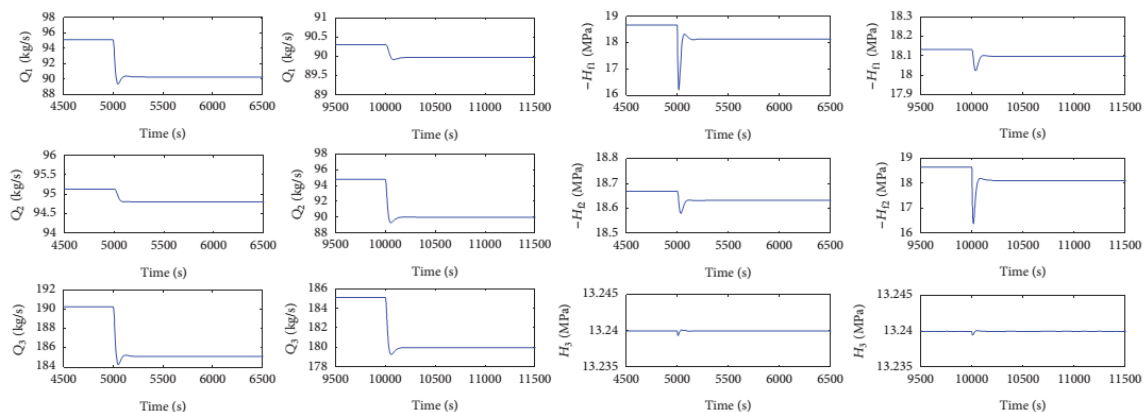


Рис. 3 – Реакції вторинного контуру і падіння тиску в разі зниження потужності модулів

**Висновки.** Завдяки властивій безпеці та потенційній економічній привабливості, високотемпературний реактор з газовим охолодженням четвертого покоління вже розглядається як один з найкращих кандидатів на будівництво атомних станцій нового покоління. Реактор типу НТР один з найкращих варіантів для подальшого будівництва АЕС в Україні.

В даній роботі розглянуто динамічне моделювання основних елементів прототипної АЕС НТР-РМ, проаналізовано систему контролю, включаючи цикли зворотного зв'язку та запропоновані закони управління. Моделювання процесів було проведено в середовищі MATLAB / Simulink.

Моделювання проведено для випадку зменшення потужності модулів, підтверджено, що обрана стратегія системи управління АЕС забезпечує задовільну стабільність замкнутого циклу та перехідні характеристики для АЕС НТР-РМ.

Подальше дослідження буде полягати в дослідженні інших нестационарних режимів, що можуть виникати під час експлуатації модульного блоку АЕС.

#### Список літератури

1. Z. Dong, J. Feng, X. Huang, and L. Zhang, "Power-level control of nuclear reactors based on feedback dissipation and backstepping," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol.57, no. 3, pp. 1577–1588, 2010.
2. Z. Dong, "Nonlinear state-feedback dissipation power level control for nuclear reactors," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol.58, no.1, pp.241–257, 2011.
3. Z. Dong, "Physically-based power-level control for modular high temperature gas-cooled reactors," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol.59, no.5, pp.2531–2549, 2012.
- Z. Dong, "Power-level control for MHTGRs with time-delay in helium temperature measurement," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol.61, no.3, pp.1349–1359, 2014.
4. Z. Dong, "Model-free power-level control of MHTGR against input saturation and dead-zone," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol.62, no.6, pp.3297–3310, 2015.

5. Z. Dong, X. Huang, and L. Zhang, "Saturated output feedback dissipation steam temperature control for the OTSG of MHTGRs," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol.58, no.3, pp. 1277–1289, 2011.
6. Z. Dong, "Model-free coordinated control for MHTGR-based nuclear steam supply systems," *Energies*, vol.9, no.1, article37, 2016.
7. G. R. Ansarifard and H. R. Akhavan, "Sliding mode control design for a PWR nuclear reactor using sliding mode observer during load following operation," *Annals of Nuclear Energy*, vol. 75, pp. 611–619, 2015.
8. Y. B. Shtessel, "Sliding mode control of the space nuclear reactor system," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 34, no. 2, pp. 579–589, 1998.

#### References (transliterated)

1. Z. Dong, J. Feng, X. Huang, and L. Zhang, "Power-level control of nuclear reactors based on feedback dissipation and backstepping," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol.57, no. 3, pp. 1577–1588, 2010.
2. Z. Dong, "Nonlinear state-feedback dissipation power level control for nuclear reactors," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol.58, no.1, pp.241–257, 2011.
3. Z. Dong, "Physically-based power-level control for modular high temperature gas-cooled reactors," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol.59, no.5, pp.2531–2549, 2012.
- Z. Dong, "Power-level control for MHTGRs with time-delay in helium temperature measurement," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol.61, no.3, pp.1349–1359, 2014.
4. Z. Dong, "Model-free power-level control of MHTGR against input saturation and dead-zone," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol.62, no.6, pp.3297–3310, 2015.
5. Z. Dong, X. Huang, and L. Zhang, "Saturated output feedback dissipation steam temperature control for the OTSG of MHTGRs," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol.58, no.3, pp. 1277–1289, 2011.
6. Z. Dong, "Model-free coordinated control for MHTGR-based nuclear steam supply systems," *Energies*, vol.9, no.1, article37, 2016.
7. G. R. Ansarifard and H. R. Akhavan, "Sliding mode control design for a PWR nuclear reactor using sliding mode observer during load following operation," *Annals of Nuclear Energy*, vol. 75, pp. 611–619, 2015.
8. Y. B. Shtessel, "Sliding mode control of the space nuclear reactor system," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 34, no. 2, pp. 579–589, 1998.

Надійшло (received) 11.04.2018

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Маковійчук Анатолій Анатолієвіч (Маковийчук Анатолий Анатолієвич Makoviychuk Anatoliy Anatoliyich)** – студент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: 0930681330; e-mail: Jokereee2412@mail.ru.

Укладач: С. О. Федорчук, аспірант.

## ЗМІСТ

<b>Булгаков О. В., Немировський І. А.</b> Визначення витрат теплової енергії будівлею з урахуванням змінного добового графіку внутрішньої температури .....	3
<b>Воловецький В. Б., Гнітко А. В., Василенко С. В., Щирба О. М., Коцаба В. І., Величко В.В.</b> Експлуатація газоконденсатних свердловин в умовах низьких робочих тисків.....	7
<b>Головешко О. С., Терещенко А. М., Федорчук С. О.</b> Оцінка можливості використання гідропотенціалу очисних споруд для генерації електричної енергії .....	14
<b>Горюшко В. В., Данільченко Д. А., Лищина В. В., Безкостний П. И., Яковенко И .С., Якименко І. В., Ткачев Ю. В., Переверзев Б. Г.</b> Діагностика ліній електропередач за допомогою літального апарату з підвищеною дальністю польоту .....	19
<b>Довгальок О. М., Безкостний П. І.</b> Дослідження особливостей впровадження сонячних електростанцій в Україні та їх впливу на роботу електроенергетичних систем.....	24
<b>Довгальок О. М., Лазуренко О. П., Жуков Ю. О., Лухтура М. І., Саїдов Ш. Н.</b> Застосування малих ГЕС для забезпечення резерву потужності в час пік електроенергетичної системи.....	32
<b>Зайцев Р. В., Кіріченко М. В., Прокопенко Д. С.</b> Високовольтна система відбору потужності для сонячної станції .....	41
<b>Зайцева Л. В.</b> Ємнісні датчики для довгохвильового акустичного контролю .....	48
<b>Івахнов А. В., Лазуренко О. П., Федорчук С. О.</b> Системи акумулявання електроенергії, аналіз можливостей та їх поєднання для застосування в енергосистемі .....	53
<b>Омеляненко Г. В., Качалка Р. Р.</b> Вплив електромагнітного поля на екологію в цілому .....	60
<b>Ковальова Ю. В.</b> Автоматична компенсація реактивної потужності асинхронного електродвигуна з тиристорним регулятором напруги.....	64
<b>Мірошник О. О., Черкашина В. В., Пазій В. Г., Дишлевский А. В.</b> Удосконалення Методики визначення збитків від пошкоджень в розподільних електричних мережах .....	68
<b>Санін Ю. К.</b> Аналітичні дослідження впливу ультрафіолетового опромінювання на біооб'єкти .....	72
<b>Семененко Л. В.</b> Проблеми нормування питомих витрат паливно-енергетичних ресурсів в установах бюджетної сфери .....	76
<b>Бондаренко В. О., Федосєєнко О. М., Старков К. О., Ганус О. І.</b> Використання вертикальних заземлювачів підвищеної провідності розтіканню в умовах діючих електроустановок.....	82
<b>Зайцев Р. В., Кіріченко М.В., Хрипунок Г. С.</b> Тонкі плівки сульфід кадмію для гнучких сонячних елементів, отримані методом магнетронного розпилення.....	87
<b>Шокарев Д. А., Михайличенко Д. А., Риков Г. Ю.</b> Аналіз режимів роботи автономної системи електропостачання на базі асинхронної машини з фазним ротором в якості генератора.....	92
<b>Ягуп В. Г., Ягуп К. В.</b> Застосування оптимізаційних методів для вирішення задач підвищення енергоефективності електроенергетичних систем .....	98
<b>Маковійчук А. А.</b> Аналіз моделі системи управління двомодульної АЕС з реакторами четвертого покоління типу НТР.....	106

## CONTENT

<b>Bulhakov O. V., Nemirovskiy I.</b> A Determination of thermal energy costs of the building taking into account the variable daily internal temperature profile .....	3
<b>Volovetskiy V. B., Hnitko A. V., Vasilenko S. V., Shchyryba O. M., Kotsaba V. I., Velychko V. V.</b> Operation of gas-condensate wells with low working pressures .....	7
<b>Goloveshko O. S., Tereshchenko A. M., Fedorchuk S. O.</b> Evaluation of use hydro potential treatment facilities for electric energy generation.....	14
<b>Goryushko V. V., Danylchenko D. O., Lishina V. V., Bezkostnyy P. I., Yakovenko I. S., Yakimenko I. V., Tkachev Y. V., Pereverzev B. G.</b> Diagnostics of overhead power lines using unmanned aerial vehicles with extended range.....	19
<b>Dovgalyuk O. M., Bezkostnyy P. I.</b> Investigation of the peculiarities of the solar power plants implementation in Ukraine and their impact on the work of power systems.....	24
<b>Dovgalyuk O. M., Lazurenko O. P., Zhukov YU. O., Lukhtury M. I., Saidov SH. N.</b> The use of small hydropower plants to provide power reserve in the peak hour of the electric power system .....	32
<b>Zaitsev R. V., Kirichenko M. V., Prokopenko D. S.</b> High-voltage power take-off system for solar station .....	41
<b>Zaitseva L. V.</b> Capacitive sensors for the long-wave acoustic control.....	48
<b>Ivakhnov A. V., Lazurenko O. P., Fedorchuk S. O.</b> Power storage systems, opportunities analysis and their combinations for use in the power system.....	53
<b>Omelyanenko G. V., Kachalk R. R. a</b> Influence of electromagnetic field on ecology in general .....	60
<b>Kovalova J. V.</b> Automatic compensation of reactive power AC electric drive with thiristor regulator of voltage .....	64
<b>Miroshnyk O. O., Cherkashyna V. V., Pazy V. H., Dyshlevs'kyi A. V.</b> Improvement of methods for determining damages from damage in distribution electric networks .....	68
<b>Yu.K. Sanin</b> Analytical studies of the influence of UV on bio objects.....	72
<b>L. V. Semenenko</b> The problems of normalization of specific consumption of fuel and energy resources by the institutions of the public sector.....	76
<b>Bondarenko V. O., Fedoseenko O. M., Starkov K. O., Ganus O. I.</b> The use of vertical ground conductors of high conductivity spreading in the operating electrical installations .....	82
<b>Zaitsev R. V., Kirichenko M. V., Khrypunov G. S.</b> Cadmium sulfide thin films for flexible solar cell received by magnetron dispersion method.....	87
<b>Shokarov D. A., Mikhaylichenko D. A., Rykov G. YU.</b> The analysis of operation modes of autonomous system of electrical power supply on the basis of the asynchronous machine with phase rotor as the generator .....	92
<b>Yagup V. G., Yagup K. V.</b> Application of optimization methods for solving the problem of enhancing energy efficiency of electric power engineering systems .....	98
<b>Makoviychuk A. A.</b> Analizing of control system model of two-modular nuclear power plant with generation 4 reactors type HTR.....	106



НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХП».  
СЕРІЯ: ЕНЕРГЕТИКА: НАДІЙНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ**

**Збірник наукових праць**

**№ 10 (1286) 2018**

Відповідальний редактор: Гурин А. Г., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХП», Україна  
Відповідальний секретар: Федорчук С. О., аспірант, НТУ «ХП», Україна

Відповідальний за випуск Обухова Г. Б., канд. техн. наук

**АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ:** 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2, НТУ «ХП».  
Кафедра електроізляційної та кабельної техніки  
Тел.: +38 (057) 707-66-63, (057) 707-65-44; e-mail: majonima@gmail.com

Обл.-вид. № 53–13.

Підп. до друку 10.05.2018 р. Формат 60×84 1/8. Папір офсетний.  
Друк офсетний. Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 8,0. Облік.-вид. арк. 8,75.  
Тираж 300 пр. Зам. № 23. Ціна договірна.

---

Видавничий центр НТУ «ХП». Свідоцтво про державну реєстрацію  
суб'єкта видавничої справи ДК № 5478 від 21.08.2017 р.  
61002, Харків, віл Кирпичова, 2

---