



ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИКА ЕНЕРГОАУДИТ

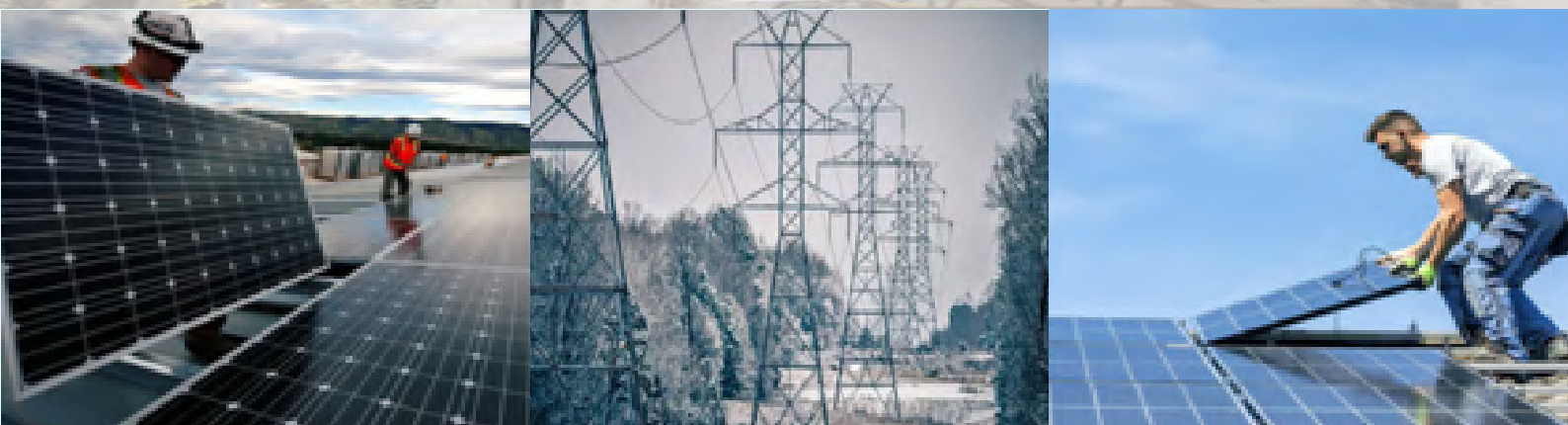


Energy saving · *Power engineering* · *Energy audit*

№11-12 (177-178)
Листопад-грудень 2022

Загальнодержавний науково-виробничий та інформаційний журнал

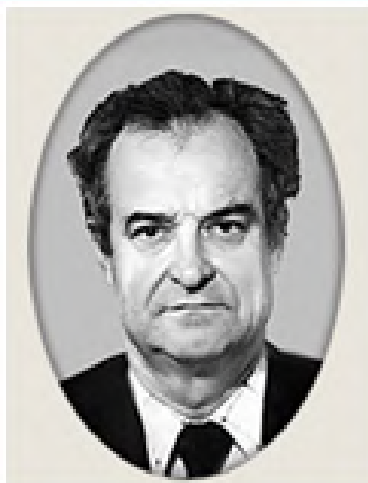
Війна та Мир ХХІ століття: ЛЮДИ, ПОДІЇ, ФАКТИ





ВИДАТНІ ВЧЕНІ ХАРКІВСЬКОГО ПОЛІТЕХНІЧНОГО Наукова школа електротехніки Харківського політехнічного інституту

(1924-2022)



Доктор технічних наук, професор, заслужений працівник вищої школи, почесний доктор Національного технічного університету «ХПІ», Віктор Тимофійович Долбня — зразок інтелігента, в ньому поєднувалися високий професіоналізм, розум, знання, тактовність і людяність, принциповість і справедливість. Віктор Тимофійович Долбня народився 27 вересня 1924 року в м. Харкові, з 1935 по 1938 рр. навчався в СШ № 7 (тоді СШ № 14).

На початку Великої Вітчизняної війни Віктор Тимофійович ще зі школи, як і багато його однолітків, не отримавши атестата зрілості, пішов на фронт. За участь у битвах, він неодноразово нагороджувався бойовими орденами і медалями, серед яких орден «Вітчизняної війни» і медалі «За відвагу» і «За бойові заслуги».

Після демобілізації в 1947 р. Віктор Тимофійович Долбня працював на заводі ім. Малишева на посаді бригадира - електромонтера і без відриву від виробництва закінчив в 1947 р. із золотою медаллю школу робочої молоді. Працюючи вступив в 1947 р. до вечірнього відділення в Харківський електротехнічний інститут, який також закінчив з відзнакою. В 1955 р. він вступив до аспірантури на кафедрі «Електрифікація промислових підприємств». Після захисту дисертації в 1959 році працював асистентом на кафедрі. У 1959 р. захистив кандидатську дисертацію. З 1960 р. Віктор Тимофійович Долбня виконував обов'язки заступника декана, а з 1961 р. працював деканом спочатку факультету «Автоматики і приладобудування», а з 1963 р. до 1978р. — деканом факультету «Електромашинобудування».

У 1963 р. разом з професором О. А. Маєвським, Віктор Тимофійович створює кафедру «Промислова електроніка», завідувачем якої він став в 1971 р. і працював на цій посаді до 1989 р. В 1980 р. захистив докторську дисертацію в Інституті електродинаміки АН УРСР на тему «Топологічні методи дослідження складних електромеханічних систем». З цього ж року - професор кафедри «Автоматизовані електромеханічні системи» ХГПУ. З 1978 р. по 1989 р. Віктор Тимофійович — проректор ХПІ, очолює навчально-методичну роботу в інституті.

Віктор Тимофійович Долбня підготував два доктори технічних наук і вісім кандидатів технічних наук. Він опублікував 170 наукових робіт, серед яких: шість монографій, одинадцять підручників і навчальних посібників.

З 1989 року професор В. Т. Долбня працював на кафедрі «Автоматизовані електромеханічні системи», був зразком відповідальності, організованості, педагогічної майстерності і невичерпної творчої активності. У цей час він пише монографію «Топологічний аналіз і синтез електричних і електромеханічних систем» (2005 р.), опублікував в співавторстві з Ю. Д. Сакарой і Т. В. Миланич навчальний посібник з грифом Мінвузу «Електроніка і мікросхемотехніка» (2006 р.), написав ряд статей і методичних матеріалів.

Упродовж багатьох років Віктор Тимофійович Долбня очолював спеціалізовану Раду із захисту дисертацій. Більш 650 молодих учених отримали його підтримку і кваліфікаційну оцінку своїх робіт.

У 2013 р. у видавництві «Підручник НТУ «ХПІ» вийшла книга В. Т. Долбні «Тисяча чотириста вісімнадцять днів. Військовий щоденник» (22 червня 1941 - 9 травня 1945). Вона заснована на унікальних історичних матеріалах — військових щоденниках, які автор збирав упродовж усього свого фронтового життя, з першого дня війни до Великої Перемоги. Ця книга — приголомшливий твір, який дозволяє зрозуміти, як формувався характер цієї прекрасної людини, бо війна залишила важкий слід в долі Віктора Тимофійовича. Долбня В. Т. має 27 нагород: 7 бойових, 6 трудових і 14 ювілейних.



№11-12 (177-178)

Листопад-грудень
2022 р.

ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИКА ЕНЕРГОАУДИТ



Energy saving · Power engineering · Energy audit

Загальнодержавний науково-виробничий та інформаційний журнал

Редакційна колегія

Головний редактор:

Лазуренко О. П. канд. техн. наук, проф., Харків, Україна

Перший заступник головного редактора:

Мехович С. А. д-р екон. наук, проф., Харків, Україна

Заступники головного редактора:

Клепиков В. Б. д-р техн. наук, проф., Харків, Україна

Єршова Н. Ю. д-р екон. наук, проф., Харків, Україна

Другова О. С. канд. екон. наук, доц., Харків, Україна

Міщенко В. А. д-р екон. наук, проф., Харків, Україна

Члени редакційної колегії:

Безпрозваних Г. В. д-р техн. наук, проф., Харків, Україна

Бекбасєв А. Б. д-р техн. наук, проф., Алма-Ата, Казахстан

Болух В. Ф. д-р техн. наук, проф., Харків, Україна

Ілляшенко С. Н. д-р екон. наук, проф., Суми, Україна

Клепиков В. Б. д-р техн. наук, проф., Харків, Україна

Коциські Дьордь д-р екон. наук, проф., Мішкольц, Угорщина

Лазуренко О. П. канд. техн. наук, проф., Харків, Україна

Мамаліс Анастасіє д-р техн. наук, проф., Афіни, Греція

Мацевитий Ю. М. д-р техн. наук, проф., Харків, Україна

Мінакова С. М. д-р екон. наук, проф., Харків, Україна

Перєрєва П. Г. д-р екон. наук, проф., Харків, Україна

Прокопенко О. В. д-р екон. наук, проф., Одеса, Україна

Таранюк Л. М. д-р екон. наук, проф., Суми, Україна

Томашевський Р. С. д-р техн. наук, доц., Харків, Україна

Шевченко С. Ю. д-р техн. наук, проф., Харків, Україна

Шутенко О. В. канд. техн. наук, доц., Харків, Україна

Відповідальний секретар:

Меньшикова С. І. канд. фіз.-мат. наук, Харків, Україна

Editorial board

Editor-in-Chief:

Lazurenko O. P. Ph. D. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine

First associate editor:

Mekhovych S. A. Dr. Sc. (Econ.), Prof. Kharkiv, Ukraine

Associate editors:

Klepikov V. B. Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine

Iershova N. U. Dr. Sc. (Econ.), Prof., Kharkiv, Ukraine

Drugova O. S. Ph. D. (Econ.), As. Prof., Kharkiv, Ukraine

Mischenko V. A. Dr. Sc. (Econ.), Prof., Kharkiv, Ukraine

Editorial board members:

Bezprozvannyh G. V. Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine

Bekbayev A. B. Dr. Sc. (Tech.), Prof., Alma-Ata, Kazakhstan

Bolyukh V. F. Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine

Illiashenko S. M. Dr. Sc. (Econ.), Prof., Sumy, Ukraine

Klepikov V. B. Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine

Kocziszy G. Dr. Sc. (Econ.), Prof., Miskolts, Hungary

Lazurenko O. P. Ph. D. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine

Mamalis A. Dr. Sc. (Tech.), Prof., Athens, Greece

Matsevityi Y. M. Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine

Minakova S. M. Dr. Sc. (Econ.), Prof., Kharkiv, Ukraine

Pererva P. G. Dr. Sc. (Econ.), Prof., Kharkiv, Ukraine

Prokopenko O. V. Dr. Sc. (Econ.), Prof., Odesa, Ukraine

Taraniuk L. M. Dr. Sc. (Econ.), Prof., Sumy, Ukraine

Tomashevskiy R. S. Dr. Sc. (Tech.), As. Prof., Kharkiv, Ukraine

Shevchenko S. Y. Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine

Shutenko O. V. Ph. D. (Tech.), As. Prof., Kharkiv, Ukraine

Responsible secretary:

Menshikova S. I. Ph.D. (phys. and math.), Kharkiv, Ukraine

Журнал включено до категорії Б «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора наук, кандидата наук та ступеня доктора філософії» (накази МОН України № 886 від 02.07.2020 та № 1188 від 24.09.2020).

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації Серія KB № 16921-5691ПП від 15.07.2010 р.

Журнал засновано: постанова Кабінету Міністрів України від 17.11.1997 р. №1287

Засновники:

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,

Північно-східна енергетична компанія «СВЕКО»

Реєстраційне свідоцтво АОО № 171256 від 06.08.2004 р.

© Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 2022
ISSN 2313-8890 (Online), ISSN 2218-1849 (Print)

ЗМІСТ

ЕКОНОМІКА

Мехович С.А., Попов О.В., Клепікова С.В.

Застосування штучних нейронних мереж та технологій форсайту у здійсненні технологічного реінжинірингу сучасного промислового виробництва.....3

ЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

Безпрозваних Г.В., Москвітін Є.С.

Стратегія управління старінням кабелів атомних електричних станцій21

**Зачепа Ю.В., Зачепа Н.В., Ганзевич І.П.,
Шокарьов Д.А., Черкашина Г.І.**

Принципи створення та застосування комп'ютерних тренажерів-імітаторів в задачах електроенергетики.....34

Коваленко Ю.Л., Тарасенко М.О., Тарасенко О.М.
Дослідження еколого-економічних показників систем комунального теплопостачання.....42

Кундіус К.Д.

Аналіз ефективності активного екранування зовнішнього магнітного поля вбудованих трансформаторних підстанцій потужністю до 1260 кВА.....50

Іванько О.О.

Інститут системного аналізу і прикладних регіональних проєктів.....63

ДО ВІДОМА АВТОРІВ.....66

CONTENTS

ECONOMY

Mekhovich S., Popov A., Klepikova S.

Application of artificial neural networks and achievements of technological re-engineering of modern industrial production.....3

ENERGY, ELECTRONICS AND ELECTROMECHANICS

Bezprozvannyh G., Moskvitin Y.

Aging management of cables of nuclear power plants.....21

**Zachepa I., Zachepa N., Ganzevich I.,
Shokarov D., Cherkashyna H.**

The principles of creation and application of computer simulators in the tasks of electric power industry.....34

Kovalenko Y., Tarasenko M., Tarasenko O.

Study ecological and economic indicators of municipal heat supply systems..... 42

Kundius K.

Analysis of the efficiency of active shielding of the external magnetic field of built-in transformer substations with a power up to 1260 kVA.....50

Ivanko A.

Institute of System Analysis and Applied Regional Projects.....63

NOTICE TO THE AUTHORS.....66

Розцінки на рекламу у журналі

Рекламний блок	Размір блоку	Розцінки, грн
Обкладинка, перша сторінка (колір)	1 смуга	5000
Обкладинка, друга, третя, четверта сторінка (колір)	1 смуга	5000
Обкладинка, друга, третя, четверта сторінка (колір)	1/2 смуги	2500
Рекламні блоки (чорно-білі) у текстовій частині журналу	1 смуга	1500
Рекламні блоки (чорно-білі) у текстовій частині журналу	1/2 смуги	750
Рекламні блоки (чорно-білі) у текстовій частині журналу	1/4 смуги	350
Рекламні блоки (чорно-білі) у текстовій частині журналу	1/8 смуги	200

Редакція не несе відповідальності за достовірність інформації, що публікується у рекламних об'явах

Рекламу надсилати поштою або надавати електронну версію, адреса електронної пошти:
E-mail: sm261245@gmail.com

25 РОКІВ НА ЕНЕРГЕТИЧНОМУ РИНКУ УКРАЇНИ
1997-2022 р.р.

Журнал видається за підтримки:



Навчально-наукового інституту енергетики, електроніки та електромеханіки;

Науково-навчального інституту механічної інженерії і транспорту;

Науково-навчального інституту Економіки, менеджменту та міжнародного бізнесу; Інституту іоносфери НАН України та МОН України;

Державного агентства енергоефективності та енергозбереження України (Держенергоефективності);

Національної комісії, що здійснює регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП);

Харківської обласної державної адміністрації; Української асоціації інженерів-електриків; Науково-технічного Союзу енергетиків і електротехніків України;

Академії наук Вищої освіти України (секція енергетики та ресурсозбереження); Всеукраїнської громадянської організації «Асоціація вчених за іновачійний розвиток України».

Журнал є електронним та розповсюджується публічно.

Передрук матеріалів з журналу здійснюється за погодженням з редакцією журналу.

Адреса редколегії та видавця:

вул. Кирпичова, 2, Електроенергетичний корпус, офіс 310, кафедра електричних станцій, м. Харків, Україна. 61002.

Головний редактор

О. П. Лазуренко, канд. техн. наук, професор

Перший заступник головного редактора

С. А. Мехович, докт. екон. наук, професор

Заступник головного редактора з технічних спеціальностей

В. Б. Клепиков, докт. техн. наук, професор

Заступник головного редактора з економічних спеціальностей

Н. Ю. Єршова, докт. екон. наук, професор

О. С. Другова, канд. екон. наук, доц.

Заступник головного редактора з міжнародної діяльності

В. А. Міщенко, докт. екон. наук, професор

Відповідальний секретар

С. І. Меньшикова, канд. фіз.-мат. наук

Розробка дизайну та верстка:

С. І. Меньшикова, канд. фіз.-мат. наук

Періодичність - 1 раз на місяць

Тираж 300 екземплярів.

Контакти редколегії та видавця:

Тел. +3 8050 4026212

+3 8066 0978696

E-mail: sm261245@gmail.com

Сайт: <http://eee.khpi.edu.ua>

Надруковано в друкарні

ФОП Шейніна О.В.

Свідцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 2779 від 28.02.2007 вул. Слов'янська, 3, м. Харків, Україна, 61052.

Рекомендовано до друку

Вченою радою НТУ «ХПІ».

Протокол № 10 від 20.12.2022 р.

Підписано до друку 26.12.2022 р.

Формат 60 × 84¹/₄. Друк цифровий.

Ум. друк. арк. 4,7 Навч.-вид. арк. 4,0

Вид. № 7-41. Зак. № 4175

© ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ·

ЕНЕРГЕТИКА · ЕНЕРГОАУДИТ

Загальнодержавний науково-виробничий і інформаційний журнал

Мова видання:

Українська, англійська, російська

Відповідальний секретар

Тел.+38 (066) 357 7626

E-mail : olhovskaya.sveta@gmail.com

Департамент технічних спеціальностей.

Тел.+38 (050) 9 38 03 48

E-mail : klepikovasv75@gmail.com

Департамент економічних спеціальностей.

Тел.+38 (050) 6 31 03 23

E-mail : iershova.ny@gmail.com

Департамент зовнішньоекономічних зв'язків.

Тел.+38 (050) 5 34 68 38

E-mail: vladmish30@gmail.com

Аварії на АЕС

За даними світової статистики, що фіксуються в Головній службі даних небезпечних інцидентів (The Major Hazard Incident Data Service – MHIDAS), великі аварії на підприємствах та об'єктах різних типів, де лінійні розміри зон дії вражаючих факторів досягають кількох сотень або навіть тисяч метрів, на щастя, події досить рідкісні. Проте у світі в середньому на рік відбуваються близько 2–3 таких аварій. Аварії із загибеллю понад 25 осіб та числом поранених понад 100 реєструються MHIDAS в середньому раз на 2,5 роки.

Найбільші радіаційні аварії

Дата	Опис	Опис інциденту	Країна	Рівень INES
12 грудня 1952	Аварія в Чок-Риверській лабораторії	перехід реактора в надкритичний режим, часткове розплавлення активної зони	Канада	5
29 вересня 1957	Киштимська аварія	перегрів та тепловий вибух ємності з високоактивними радіоактивними відходами, великий викид радіоактивних речовин	СРСР	6
10 жовтня 1957	Аварія в Уиндскейле	перегрів та займання реактора, великий викид радіоактивних речовин	Великобританія	5
3 січня 1961	На експериментальному реакторі SL-1	з невідомих причин був витучений керуючий стрижень, почалася некерована ланцюгова реакція, що викликала тепловий вибух, розплавлення реактора і викид в атмосферу 3 Тбк радіоактивного йоду	США	5
24 липня 1964	Аварія на заводі Wood River Junction	досягнення критичності поза реактором через помилкове використання працівником концентрованого розчину нітрату урану замість розведеного	США	4
5 жовтня 1966	Перегрів активної зони та часткове розплавлення палива на експериментальному реакторі Fermi I університету Мічигану	(Реактор на швидких нейтронах компанії Вестінгауз Електрик) Через відмову системи охолодження реактора розплавився два зі 105 ТВЕЛів. Радіоактивний розплав залишився всередині оточуючого реактора захисного контейнеру	США	4
30 листопада 1975	Аварія на Ленінградській АЕС	перегрів реактора, руйнування технологічних каналів, викид радіоактивних речовин	СРСР	4
22 лютого 1977	Аварія на реакторі KC-150 (АЕС Богуніце)	втрата герметичності ТВЕЛ в активній зоні реактора, викид радіоактивного вмісту	Чехословаччина	4
28 березня 1979	Аварія на АЕС Три-Майл-Айленд	перегрів зупиненого реактора, розплавлення активної зони, викид продуктів поділу	США	5
10 серпня 1985	Радіаційна аварія в бухті Чажма Японського моря	При перезарядці активної зони реактора на АПЛ К-431 реактор перейшов у пусковий режим, викликавши тепловий вибух та радіаційне зараження місцевості, перехід реактора в надкритичний режим, тепловий вибух активної зони, викид радіоактивного вмісту активної зони	СРСР	5
26 квітня 1986	Помилка експлуатації при проведенні запланованого експерименту призвела до аварії на Чорнобильській АЕС	перехід реактора в надкритичний режим, тепловий вибух і подальше розплавлення активної зони, найбільший викид радіоактивного вмісту активної зони	СРСР	7
13 березня 1980	Аварія на АЕС Сен-Лоран-дез-О	часткове розплавлення активної зони реактора, викид продуктів розпаду	Франція	4
4 травня 1986	В результаті помилки оператора при роботі з системою завантаження шарових ТВЕЛів	стався незначний витік радіоактивного газу — АЕС ТНТ-300 руйнування ТВЕЛ поза активною зоною, незначний викид радіоактивного вмісту	Німеччина	4
13 вересня 1987	Радіоактивне зараження в Гоянії	пошкодження радіологічного джерела випромінювання	Бразилія	5
30 вересня 1999	Аварія на ядерному об'єкті Токаймура	досягнення критичності поза реактором, невеликий викид радіоактивних продуктів поділу	Японія	4
2006	Аварія в інституті радіоелементів у Фльорюсе	опромінення співробітника джерелом радіоактивного випромінювання внаслідок порушення роботи механіки систем захисту	Бельгія	4
11 березня 2011	Землетрус та наступне цунамі викликали на АЕС Фукусіма 1 відключення енергоспоживання та систем охолодження, що призвело до розплавлення активної зони реакторів на енергоблоках 1, 2 і 3	перегрів трьох реакторів, розплавлення активної зони, найбільший викид радіоактивного вмісту активної зони	Японія	7



VOLUNTEER BROTHERHOOD

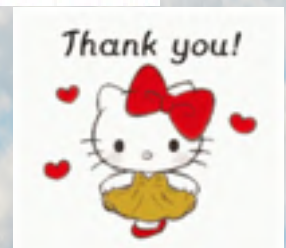
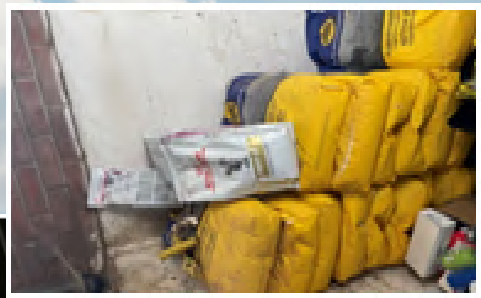
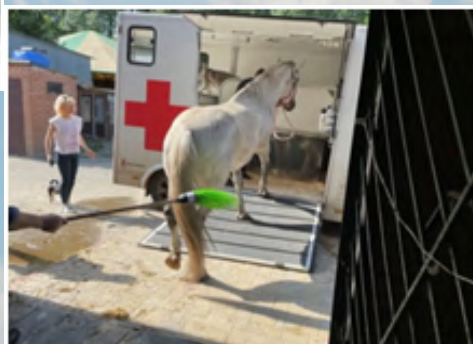


Over the past six months, volunteers from Sweden have made a dozen trips to Ukraine, driving a total of more than 50,000 kilometers. Humanitarian aid was transported in the form of medicines and equestrian equipment worth about 1.5 million euros. The lives of dozens of horses from equestrian schools in Ukraine were saved. In the photo, an X-ray machine, food and medicines delivered by Swedish volunteers to one of the stables in Kharkov. The head of the action is the founder of a charity fund for helping Ukrainian horses, a student

of the Stockholm National University Josephine Robeus. and a well-known TV journalist Stefan Borg.

Stockholm University is the capital university of the Kingdom of Sweden and the main one in the country.

It originated in 1878 as the Stockholm Higher School, since 1960 it has the status of a public educational institution and is consistently ranked among the top hundred universities in the world. The university is proud of its multicultural atmosphere and openness to foreigners. Of the 70,000 students here, about 8% are students from abroad. There are no age restrictions for applicants, and education is free. It is in the order of things to see first-year students aged 27-30 years.



Мехович Сергій Анатолійович, доктор економічних наук, професор кафедри економіки бізнесу і міжнародних економічних відносин Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Тел. (050)4026212; E-mail: sm261245@gmail.com

Попов Олександр Вікторович, кандидат економічних наук, Перший заступник голови правління Акціонерного товариства «ФЕД», м. Харків, Україна, Тел. (057) 7 66 52 33, E-mail: a.popov@fed.com.ua

Клепікова Світлана Володимирівна, кандидат економічних наук, доцент кафедри менеджменту. Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Тел. (050)3025328; E-mail: klepikovasv75@gmail.com

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61000

ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ТА ТЕХНОЛОГІЙ ФОРСАЙТУ У ЗДІЙСНЕННІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО РЕІНЖИНІРІНГУ СУЧАСНОГО ПРОМИСЛОВОГО ВИРОБНИЦТВА

Анотація. У статті розглянуто питання щодо механізму обґрунтування вибору напрямів технологічного реінжинірингу. Визначено, що ефективність перетворень у першу чергу залежить від методів, інструментів вибору напрямів радикального перетворення технологічної основи виробничого підприємства та взагалі від технологічної політики. Обґрунтування напрямів технологічного реінжинірингу пов'язано із великим обсягом взаємозалежних змінних інноваційних перетворень і потребує фундаментального аналізу їх поведінки і впливу на виробничий процес. На сьогодні нейронні мережі є одним з найвідоміших і ефективних інструментів інтелектуального аналізу даних, який розвивається завдяки досягненням в області теорії штучного інтелекту та інформатики. Інтелектуальні системи на основі штучних нейронних мереж, нечіткої логіки дозволяють вирішувати завдання виконання прогнозів, оптимізації, розпізнавання образів і управління. Для навчання мережі необхідно мати набір значень вхідних величин (чинників) і відповідних кожному окремому набору значень потрібної вихідної величини. Такий підхід цілком збігається із задачами вибору напрямів технологічного реінжинірингу на підприємствах інноваційного кластеру. З цією метою визначено суттєві зовнішні та внутрішні фактори, що здійснюють вплив на ефективність кластерної політики. На відміну від внутрішніх, зовнішні у найбільшій мірі дозволяють вирішувати завдання виконання прогнозів, оптимізації, розпізнавання образів і управління. В умовах недосконалої регіональної інноваційної системи та враховуючи цей фактор, для ефективності вирішення задач здійснення технологічного реінжинірингу промислового виробництва запропоновано методіку, яка поєднує форсайт-прогнозування перспектив технологічного реінжинірингу підприємств з теорією штучних нейронних мереж. Запропоновано механізм взаємодії штучних нейронних мереж і форсайт методу у визначенні напрямів технологічного реінжинірингу на основі регіональної кластерної політики.

Ключові слова: штучні нейронні мережі, форсайт, технологічний реінжиніринг, інноваційна система, кластерна політика, прогнозування.

Mekhovych Serhii Anatoliyovych, Doctor of Economics, Professor of the Department of Business Economics and International Economic Relations, National Technical University, Kharkiv Polytechnic Institute. Tel. (050) 4026212; E-mail: sm261245@gmail.com

Popov Alexander Viktorovich, Candidate of Economic Sciences, First Deputy Chairman of the Board of Joint Stock Company "FED", Kharkiv, Ukraine, Tel. (057) 7 66 52 33, E-mail: a.popov@fed.com.ua

Klepikova Svitlana Volodymyrivna, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of the Department of Management, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Tel. 80503025328, E-mail: klepikovasv75@gmail.com

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kyrpychova Str., 2, Kharkiv, Ukraine, 61000

APPLICATION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS AND ACHIEVEMENTS OF TECHNOLOGICAL RE-ENGINEERING OF MODERN INDUSTRIAL PRODUCTION

Abstract. The article deals with the issue of the justification mechanism for the choice of directions of technological reengineering. It was determined that the effectiveness of the transformations primarily depends on the methods, tools for choosing directions for the radical transformation of the technological basis of the production enterprise and, in general, on the technological policy. The justification of the directions of technological training engineering is connected with a large volume of interdependent variables of innovative transformations and requires a

fundamental analysis of their behaviour and impact on production process. Today, neural networks are one of the most famous and effective tools for intelligent data analysis, which is developed thanks to achievements in the field of artificial intelligence theory and computer science. Intelligent systems based on artificial neural networks and fuzzy logic allow solving the tasks of forecasting, optimization, pattern recognition and management. To train the network, it is necessary to have a set of values of input values (factors) and corresponding to each separate set of values of the desired output value. Such an approach completely coincides with the tasks of choosing the directions of technological reengineering at the enterprises of the innovation cluster. For this purpose, significant external and internal factors influencing the effectiveness of the cluster policy have been determined. In contrast to internal, external to the greatest extent allow solving the tasks of forecasting, optimization, pattern recognition and management. In the conditions of an imperfect regional innovation system and taking into account this factor, for the efficiency of solving the tasks of technological reengineering of industrial production, a methodology is proposed that combines foresight forecasting of the prospects of technological reengineering of enterprises with the theory of artificial neural networks. The mechanism of interaction of artificial neural networks and the foresight method in determining directions of technological reengineering based on regional cluster policy are proposed.

Keywords: artificial neural networks, foresight, technological engineering, innovation system, cluster policy, forecasting.

Мехович Сергей Анатольевич, доктор экономических наук, профессор кафедры экономики бизнеса и международных экономических отношений Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», Тел. (050) 4026212; E-mail: sm261245@gmail.com

Попов Александр Викторович, кандидат экономических наук, Первый заместитель председателя правления Акционерного общества «ФЭД», г. Харьков, Украина, Тел. (057)7665233; E-mail: a.popov@fed.com.ua

Клепикова Светлана Владимировна, кандидат экономических наук, доцент кафедры менеджмента. Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Тел. (050)3025328; E-mail: klepikovasv75@gmail.com

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ул. Курпичева, 2, Харьков, 61000, Украина

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ И ТЕХНОЛОГИЙ ФОРСАЙТА В ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕИНЖИНИРИНГА СОВРЕМЕННОГО ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Аннотация. В статье рассмотрен вопрос о механизме обоснования выбора направлений технологического реинжиниринга. Определено, что эффективность преобразований в первую очередь зависит от методов инструментов выбора направлений радикального преобразования технологической основы производственного предприятия и вообще от технологической политики. Обоснование направлений технологического реинжиниринга связано с большим объемом взаимосвязанных переменных инновационных преобразований и требует фундаментального анализа их поведения и влияния на производственный процесс. Сегодня нейронные сети являются одним из самых известных и эффективных инструментов интеллектуального анализа данных, который развивается благодаря достижениям в области теории искусственного интеллекта и информатики. Интеллектуальные системы на основе искусственных нейронных сетей, нечеткой логики позволяют решать задачи выполнения прогнозов, оптимизации, распознавания образов и управления. Для обучения сети необходимо иметь набор значений входных величин (факторов) и соответствующих каждому отдельному набору значений требуемой исходной величины. Такой подход полностью совпадает с задачами выбора направлений технологического реинжиниринга на предприятиях инновационного кластера. С этой целью определены существенные внешние и внутренние факторы, оказывающие влияние на эффективность кластерной политики. В отличие от внутренних, внешние в наибольшей степени позволяют решать задачи выполнения прогнозов, оптимизации, распознавания образов и управления. В условиях несовершенной региональной инновационной системы и учитывая этот фактор, для эффективности решения задач осуществления технологического реинжиниринга промышленного производства предложена методика, сочетающая форсайт-прогнозирование перспектив технологического реинжиниринга предприятий с теорией искусственных нейронных сетей. Предложен механизм взаимодействия искусственных нейронных сетей и форсайт метода в определении направлений технологического реинжиниринга на основе региональной кластерной политики.

Ключевые слова: искусственные нейронные сети, форсайт, технологический реинжиниринг, инновационная система, кластерная политика, прогнозирование.

Постановка проблеми. Генеральною стратегією України є всебічна підтримка процесів створення, впровадження та використання інновацій, як

основи соціально-економічної політики, спрямованої на відродження підприємств, що постраждали внаслідок вірусної пандемії та під час воєнного конфлікту. Реальний стан виробничих підприємств потребує не поверхніх, санаційних заходів, а реінжинірингового підходу, тобто, корінних перетворень. Успіх у вирішенні таких масштабних задач залежить від обґрунтованості вибору вектору і напрямів розвитку галузей народного господарства, виробничих комплексів і підприємств країни в цілому. Як свідчить світовий досвід масштабних перетворень, основні параметри соціально-економічного розвитку повинні базуватись на комплексно розроблених економічних прогнозах. Штучні нейронні мережі (НМ) відомі як ефективний інструмент прогнозування на основі ретроспективних даних, але в умовах корінних перетворень для ефективного моделювання потрібно володіти інформацією щодо можливих наслідків інноваційних перетворень. Це характерно для форсайт методу. Робота присвячена вивченню принципів поєднання переваг обох методів з метою розробки на цій основі методологічних підходів у визначенні стратегічних напрямів технологічного реінжинірингу з метою підвищення інноваційної активності і конкурентоспроможності вітчизняних виробничих підприємств.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Серед досліджень нейронних мереж для використання прогнозування фінансових ринків слід виділити роботи вітчизняних дослідників: Л. В. Рожков, Бакулевський В. Л., Клепиков В. Б., Т. К. Кваша, Лічко К. П., Матвійчук А. В., Паладченко О. Ф., Писаренко Т. В., Терехов В. И., Жуков Р. В. [1-6] та інші, а також іноземних дослідників, таких як Аллан Даль Андерсен, Пер Даннеманд Андерсен, Франс Беркхат, Стиан Вестлейк, Лайош Нийри, Ашис Нэнди, Леон С. Фуэрт, Джулия Хертин, Саймон Хайкин та інші [7-16]. Вчені довели ефективність НМ в аналізі часових рядів, обґрунтували корисність нейронних мереж для аналізу трендів на фондовому ринку та зазначили, що порівняно з іншими підходами перевагою застосування НМ є вирішення нелінійних проблем, з чим не справляються класичні методи, які не можуть надати необхідної точності в результатах.

Матеріали та методологія дослідження. Методологія дослідження ґрунтувалася на теорії економічного аналізу, стратегічного аналізу, загальній теорії управління, маркетингу. Основними методами, які склали концептуальну основу дослідження є: аналіз, синтез, емпіричного узагальнення.

Результати дослідження. На сьогодні нейронні мережі є одним з найвідоміших і ефективних інструментів інтелектуального аналізу даних, який розвивається завдяки досягненням в області теорії штучного інтелекту та інформатики. Інтелектуальні системи на основі штучних нейронних мереж, нечіткої логіки дозволяють вирішувати завдання виконання прогнозів, оптимізації, розпізнавання образів і управління. В науковій літературі показано, що нейронні мережі набувають особливого значення при

вивченні закономірностей масових процесів, які недоступні прямому спостереженню і не піддаються експериментуванню [80]. Ефективний інструментарій пошуку закономірностей надає технологія побудови ШНМ, яка може бути синтезована (навчена) за статистичними даними відібраних показників, наданих підприємствами.

В основі нейромережових методів лежить спроба комп'ютерного моделювання процесів навчання, що використовуються в живих організмах. Нейронна мережа моделює роботу людської нервової системи, особливістю якої є здатність до самонавчання з урахуванням попереднього досвіду. Когнітивні здібності живих істот пов'язані з функціонуванням мереж, пов'язаних між собою біологічних нейронів - клітин нервової системи. Для моделювання біологічних нейромереж використовуються мережі, вузлами яких є штучні нейрони (тобто математичні моделі нейронів). Тобто, штучна нейронна мережа являє собою математичну модель та її технічну реалізацію, що функціонує подібно функціонування мереж нервових клітин – нейронів, мозку людини. Комп'ютерна (нейропроцесорна) реалізація ШНМ надає їй у порівнянні з біологічною ряд суттєвих переваг: швидкодію при переході штучного нейрону з одного стану в інший, яка в мільйони разів вище біологічного нейрону; можливість вирішення вищевказаних складних задач прогнозування, управління, апроксимації, кластеризації, оптимізації, узагальнення властивостей та інше. Це обумовило їх широке використання в технічних системах. В економіці штучні нейронні мережі широко використовуються в області фінансового менеджменту: прогнозування ринку цінних паперів і валютних котирувань, оцінці фінансових, валютних і кредитних ризиків, категоризації компаній і ін. [1,6,7,9]. В роботі [1] вперше було запропоновано використання методу нейронних мереж в управлінні енергоефективністю промислового підприємства за допомогою розробки на базі статистичних даних попередніх років методичного підходу прогнозування показника енергоефективності – питомої енергоемності. Особливістю НМ є те, що вона не програмується, а навчається. Для навчання мережі необхідно мати набір значень вхідних величин (чинників) і відповідних кожному окремому набору значень потрібної вихідної величини.

В основі Форсайту лежить довгострокове прогнозування стратегічних напрямів інноваційного розвитку з урахуванням експертної оцінки найбільш досвідчених фахівців. Сутність методології полягає у використанні експертами бачення найбільш значущих факторів у розвитку технологій. На цій основі у прогнозах формуються тенденції та визначаються очікувані результати у виробничій сфері. Зона охоплення – десятки років. За результатами Форсайтів, наприклад, Нідерланди виявили, що найкраще зможуть сприймати впровадження передових біотехнологій не великі аграрні корпорації, а фермерські господарства. В результаті, малий сільськогосподарський бізнес отримав держпідтримку [7].

Технологічне прогнозування на 20-30 років вважалося основною метою Форсайтів [8].

Історія таких прогнозів бере свій початок у 50-х роках минулого століття (фірма RAND Corporation). Через 20 років довгостроковим прогнозуванням науково-технологічного розвитку зайнялася Японія. З того часу в цій країні кожен п'ятирічний складання довгострокових прогнозів на 30 років. На підставі цих прогнозів приймаються рішення про майбутню державну політику. Це є одним з найсуттєвих факторів японського лідерства у розвитку промислового виробництва, карти виробничих кластерів та вибір інноваційних технологій. Таким чином, форсайт слід розглядати як один з інструментів корінних перетворень технологій сучасного виробництва за участю всіх зацікавлених сторін.

Як видно, і штучні нейронні мережі і форсайт застосовуються для розробки прогнозу. Різниця в тому, що нейронні мережі формують прогнози на основі ретроспективної інформації, а форсайт, використовуючи ті ж самі методи, ніби то продовжує пізнання процесів у середній і віддаленій перспективі. Саме ця інформація дуже важлива для вибору напрямків перетворень з позиції очікуємих наслідків. Такий підхід цілком збігається із задачами вибору напрямів здійснення технологічного реінжинірингу на підприємствах інноваційного кластеру.

Для вирішення цієї задачі необхідно встановити входні величини нейронної мережі, якими є чинники (фактори), що впливають на енергоефективність окремих підприємств кластеру і, як слідство, на показники, наприклад, енергоемності кластеру у перспективі в цілому. Загальна кількість чинників, які характеризують виробництво окремих підприємств відповідно поточним та стратегічним задачам кластеру достатньо значна і кожний з них утворює свій особистий фактор впливу на результативний показник. Згідно теорії економічного аналізу відомо, що в числі всіх факторів є суттєві і несуттєві. Практика довела, що в кінцевому результаті з всього масиву факторів 95-97 процентів впливу на результативний показник здійснюють від трьох до п'яти факторів. Іншими можна знехтувати.

Аналізуючи основні проблеми, що виникають перед підприємствами при формуванні технологічної політики, експерти виділяють дві групи чинників впливу: зовнішні і внутрішні. Серед тих, які суттєво впливають на вищевказаний показник, є такі, що обумовлені зовнішніми чинниками, на які підприємство не може впливати. До зовнішніх відносяться чинники слабо контрольовані з боку підприємства, наприклад, соціально-економічний розвиток країни, демографічна ситуація, ресурсна база, науково-технічний прогрес, кон'юнктура національного і світового ринку енергоносіїв та інші. Для нейронної мережі необхідно визначити впливові чинники, які входять в сферу управління промисловим підприємством. До числа внутрішніх відносяться контрольовані і керовані чинники, такі як інвестування в

енергозберігаючі проекти, ефективне використання енергоресурсів, впровадження найкращих доступних технологій в області енергоефективності, підвищення обізнаності персоналу та інш.

Розглядаючи інноваційний кластер як відкриту систему з зовнішніми (на світовому, державному та регіональному рівнях) та внутрішніми (на рівні підприємства) зв'язками, систематизуємо основні чинники, тобто особливо важливі елементи або істотні обставини, що впливають на результати реінжинірингових перетворень в умовах кластерної політики. Схематично це зображено на рис. 1. Розглянемо детальніше, яким чином кожен з виділених факторів впливає на енергоефективність промислового підприємства. Їх визначення важливе тому, що вони для підприємства є об'єктивно існуючими, але за рахунок зворотного зв'язку підприємства мають можливість їх вдосконалення, використовуючи право постановчої ініціативи, звернень до владних і регіональних органів, виступів у пресі та інше.

З іншого боку, володіння упереджувальною інформацією щодо самого факту їх існування дає можливість сконцентрувати зусилля та скорегувати свою політику аби уникнути можливих збитків та втрат позицій на ринках.

Міжнародні і політичні фактори обумовлені зовнішнім конкурентним середовищем. В умовах глобалізації провідні ігроки створюють будь-які пастки для того, щоб позбутися конкурентів та утримати найбільш прибуткові ринкові ніші. При цьому використовуються усі можливі засоби, включаючи ліквідацію конкурентів військовими засобами. Така агресивна політика примушує слабші або залежні країни не втручатись в конфлікти, а у певних обставинах підтримувати агресивну ринкову політику. У залежності від її масштабів та спрямованості виникають зовнішні ринкові фактори, які суттєво впливають на інноваційні перетворення конкуруючих суб'єктів. У свою чергу вони впливають на ринкові відношення, цінову та корпоративну політику. Зазначені фактори, безумовно, суттєві, але випереджаючими, власно тими, що ждійснюють опір зовнішнім агресіям та визначають позицію підприємств у ринковому середовищі є науково-технологічні фактори. Справа у тому, що не всі країни здатні до науково-технічної діяльності, а тим більше не всі країни готові до сприйняття інноваційних рішень. Це обумовлено станом інноваційно-інвестиційного середовища, рівнем науково-технологічного і технічного розвитку та технологіями, які переважають у тій чи іншій країні. Але, у першу чергу, інноваційною спроможністю та готовністю до сприйняття передових технологій. Поведінка конкурентів у цих умовах залежить від оцінювання спроможності країн до освоєння передових (проривних) технологій та впровадження пов'язаних з ними як технологічних, так і нетехнологічних інновацій.

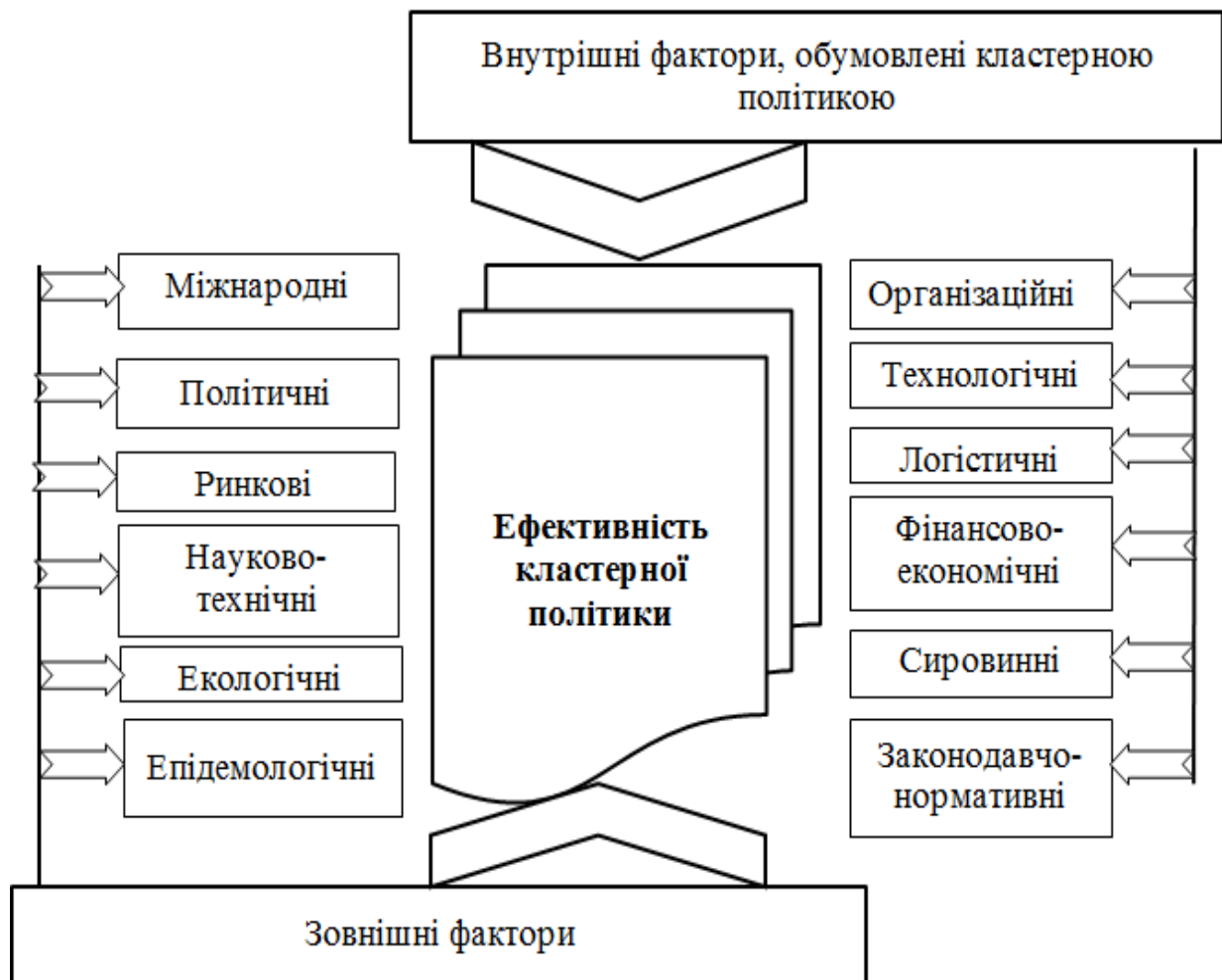


Рис. 1. Суттєві фактори, що здійснюють вплив на ефективність кластерної політики.

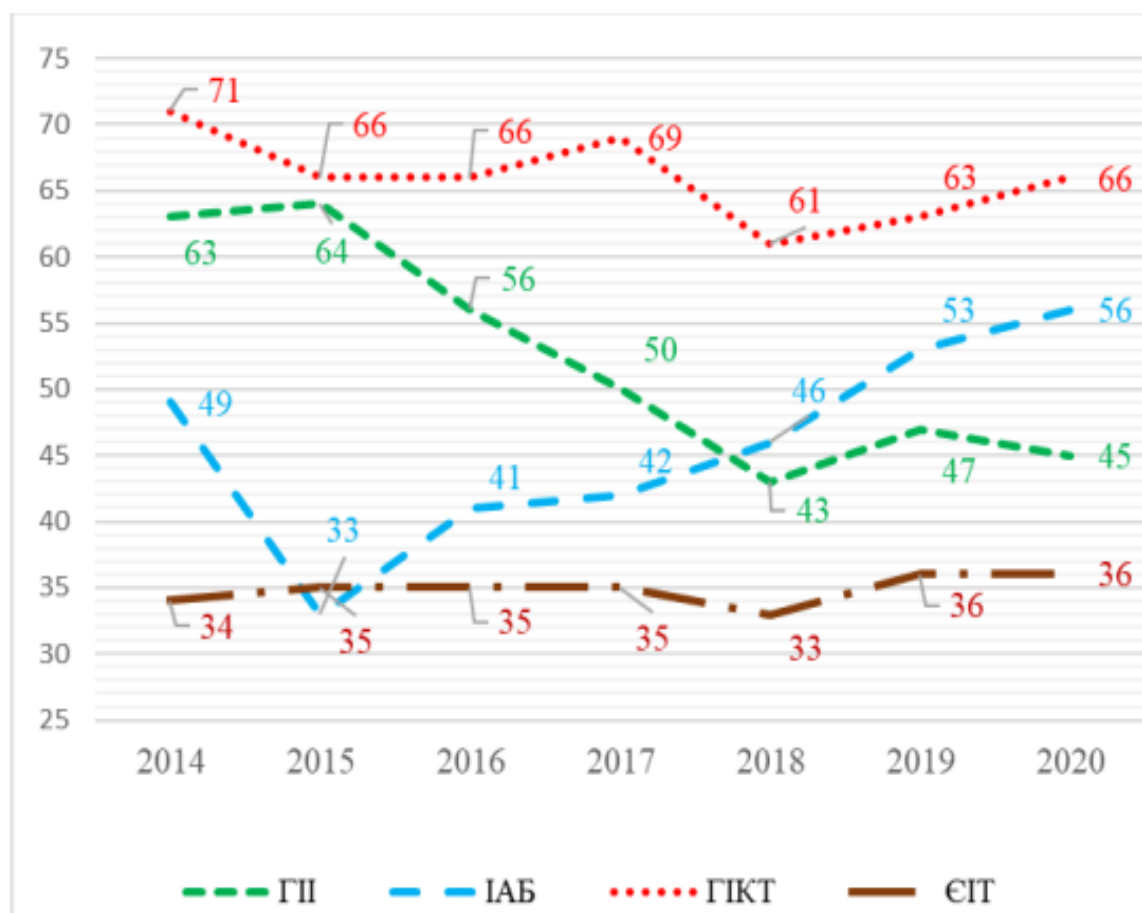
У XXI сторіччі Україна увійшла в епоху четвертої промислової революції. Цей період характеризується широким впровадженням ІКТ технологій. Країна переходить до освоєння технологій на основі цифровізації та взаємодії, таких як штучний інтелект (ШІ), інтернет речей, великі дані, блокчейн, п'яте покоління мобільного зв'язку (5G), 3D друк, гена інженерія, нанотехнології, тощо. Цей процес супроводжується зрощенням технологій, продуктів, галузей, інфраструктури, зміною економічної структури і має суттєві наслідки для збільшення нерівності порівняно з високотехнологічними країнами, які характеризуються науково-технічними факторами. Ці фактори характеризують технологічність економіки, тобто, її здатність виробляти готову продукцію з високою часткою доданої вартості та експортувати таку продукцію в результаті впровадження нових технологій. Успішні структурні зміни спричиняють перехід від низькотехнологічних, трудомістких видів діяльності до більш високотехнологічних і навпаки, неспроможність економіки до таких змін позбавляє країну шансів на успіх на десятиріччя. Висока частка середньовисоко- та високотехнологічної продукції у доданій

вартості характеризує інтенсивність технологічності з високим рівнем продуктивності, інновацій та технічного прогресу. Галузі і країни, які не здатні інтегруватися у глобальні ланцюги створення доданої вартості, не матимуть високої конкурентоспроможності.

Наукоємні види економічної діяльності, що витрачають значну частку своїх доходів на наукові дослідження, охоплюють як виробничий сектор, так і сферу послуг і включають два технологічних сектори – високо- і середньовисокотехнологічний. Аналіз середньої за 2017–2019 рр. наукоємності видів економічної діяльності свідчить, що в Україні критеріям високотехнологічності відповідає тільки діяльність з наукових досліджень і розробок. Ще шість відповідають критеріям низькосередньотехнологічності, всі інші ВЕД відносяться до низькотехнологічного сектору з максимальною наукоємністю у 0,3 – 0,4 %.

За даними Державної наукової установи "Український інститут науково- технічної експертизи та інформації" практично, всі види економічної діяльності світового середньовисокотехнологічного сектору в Україні є середньо- низькотехнологічними. У той же час, саме науково-технічні фактори визначають інноваційну спроможність України до освоєння передових технологій. Динаміка рейтингів України за чотирма підходами до оцінки спроможності до інновацій за 2014-2020 рр. свідчить про відсутність активної політики та проривів у підтримці інноваційної діяльності як державою, так і бізнесом (рис. 2) [9].

Як видно з рис.2, основою української інноваційної конкурентоспроможності є людський капітал, вища освіта, а також знання й результати наукових досліджень. Однак несприятливе середовище для ведення інноваційного бізнесу та неефективна фінансова система, недосконалі державні інституції заважають розкриттю підприємницького потенціалу та створюють перешкоди для комерціалізації інновацій. За групуванням країн Світовим банком Україна залишається протягом останнього десятиліття у групі країн з доходом нижче середнього [9]. Основними факторами, що сприяли цим процесам в Україні у третьому десятиріччі стали, насамперед, політичні фактори та криза, викликана пандемією COVID 2019. Епідеміологічний фактор спричинив суттєве уповільнення ділової активності та зменшення обсягів реалізації промисловими підприємствами високотехнологічного сектору, а також та частки валової доданої вартості в обсязі випуску продукції цього сектору. Негативний вплив спричинив спадний характер фінансування наукової діяльності – з 0,55% ВВП у 2015 р. до 0,41% ВВП у 2020 р. та значна частка передачі результатів наукових досліджень і технологій без оформлення прав інтелектуальної власності, що значно здешевлює результати наукової діяльності [9].



ГП- Глобальний інноваційний індекс; ІАБ-Інноваційний індекс Bloomberg, ГІКТ -Глобальний індекс конкурентоспроможності талантів; ЄІТ -Індекс Європейського інноваційного табло.

Рис. 2. Динаміка рейтингів України за чотирма підходами до оцінки спроможності до інновацій за 2014-2020 рр.

Технологічність економіки – це її здатність виробляти готову продукцію з високою часткою доданої вартості та експортувати таку продукцію в результаті впровадження нових технологій, організаційних, маркетингових, продуктових інновацій. Успішні структурні зміни спричиняють перехід від низькотехнологічних, трудомістких видів діяльності до більш високотехнологічних. Висока частка середньовисоко- та високотехнологічної продукції у доданій вартості характеризує інтенсивність технологічності з високим рівнем продуктивності, інновацій та технічного прогресу. Галузі і країни, які не здатні інтегруватися у глобальні ланцюги створення доданої вартості, не матимуть високої конкурентоспроможності і вимушені будуть піти з ринку. Що стосується внутрішніх факторів, то вони у значній мірі є наслідок впливу зовнішніх, від яких залежить сутність кластерної політики.

На відміну від внутрішніх факторів, зовнішні у найбільшій мірі дозволяють вирішувати завдання виконання прогнозів, оптимізації, розпізнавання образів і управління. В умовах недосконалої регіональної інноваційної системи та враховуючи цей фактор, для ефективності вирішення задач здійснення технологічного реінжинірингу промислового виробництва пропонуємо методику, яка поєднує Форсайт-прогнозування перспектив технологічного реінжинірингу підприємств з теорією штучних нейронних мереж. Використанням Форсайту у значній кількості країн світу визначаються пріоритети науки, техніки та інновацій. Цей метод зарекомендував себе, як найбільш ефективний метод для прогнозування напрямів подальшого розвитку країни у сфері науки та технологій. Дослідження майбутнього розвитку не є практикою, пов'язаною з його правильним чи неправильним розумінням. Остаточна мета досліджень майбутнього розвитку полягає в тому, щоб надати інформацію при прийнятті рішень шляхом дослідження майбутніх тенденцій та потенційних різких змін [10]. Методи, що використовуються в дослідженнях майбутнього розвитку, мають широкий діапазон, від уяви та відтворення до технічно складних досліджень тенденції та статистичним прогнозуванням [11]. Відмінність між дослідженнями майбутнього розвитку та форсайтом полягає в тому, що не всі методи аналізу майбутнього представлені в набір інструментів форсайту. Крім того, відмінності можуть бути знайдені серед різних інструментів. Бачення та форсайт, наприклад, є невзаємозамінними ідеями, які не є продуктами тієї ж розумової діяльності [12]. Бачення, в основному, є нерухомим чином майбутнього. Форсайт, заснований на припущеннях, які завжди розглядаються як ті, що є рухливими, має свої переваги як інструмент довгострокового планування. Він не здатний прогнозувати широту можливих сил, що можуть взяти участь у будь-якому моменті майбутнього, щоб допомогти у досягненні бажаного результату. Стратегічний форсайт не слід плутати з прогнозуванням, який може створювати вузьке уявлення про майбутнє. Замість створення прогнозів, що ґрунтуються на екстраполяції поточних тенденцій або частоті аналогічних подій у минулому (штучні нейронні мережі) форсайт швидше розвиває здатність передбачати альтернативне майбутнє та здатність візуалізувати різні можливі результати та їх наслідки. Форсайт часто розуміється як «здатність бачити те, що буде чи могло б статися в майбутньому» [13]. Форсайт є областю практики, а нещодавно він став новою академічною областю [14]. Ми бачимо форсайт як ефективний інструмент для вироблення кластерної політики, спрямованим на розробку платформи спільного навчання із постійною комунікацією між представниками бізнесу, науки та влади [13-14]. Форсайт, як відносно нова управлінська технологія, яка використовується на макро- та мікрорівні для активного конструювання майбутнього стану малих, середніх та великих соціально-економічних систем, є, на нашу думку, найбільш оптимальним інструментом якісного планування реінжинірингових перетворень. Як

всебічний і об'єктивний погляд в майбутнє, разом із штучними нейронними мережами він дозволяє виявити непомітні, або незначні тренди, які надалі визначатимуть стан та зміну середовищ. Для інноваційного кластеру форсайт та штучні нейронні мережі можна розглядати як інструмент управління стратегічною конкурентоспроможністю, який засновується на оцінці ретроспективи та передбаченні майбутніх змін на основі формування таких якісних характеристик функціонування кластеру, які дозволяють його підприємствам бути здатною до продукування нововведень на основі регіональної кластерної політики (рис. 2).

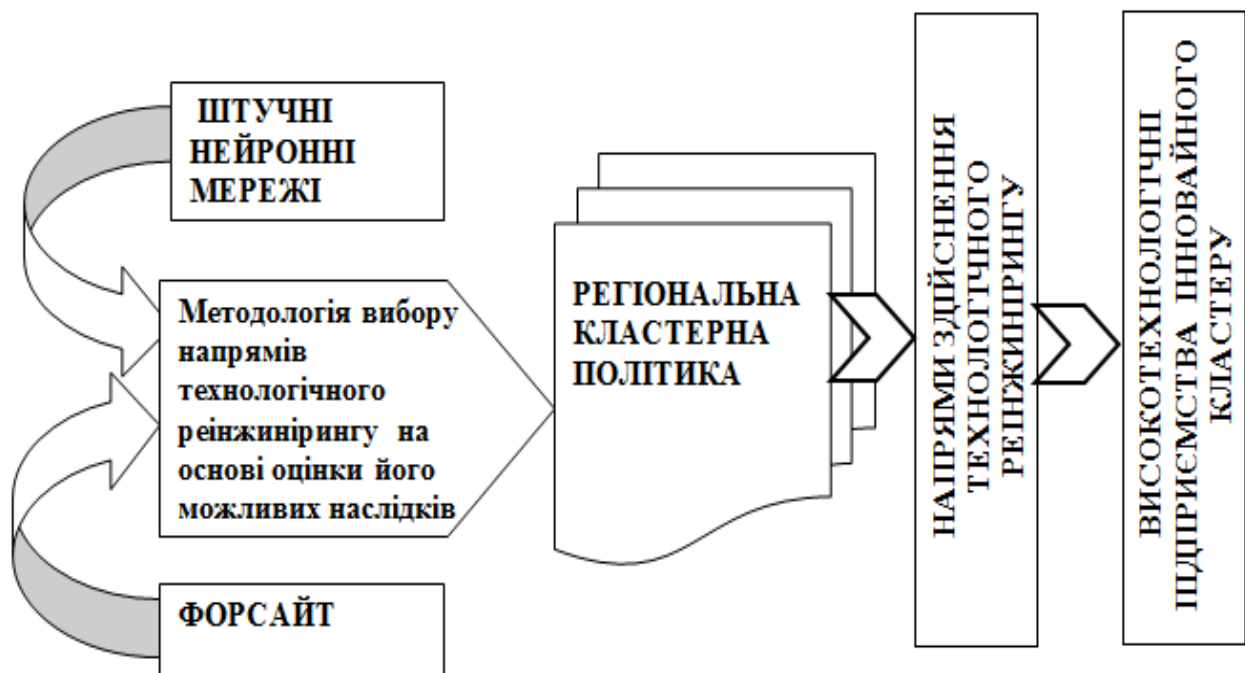


Рис.3. Механізм взаємодії штучних нейронних мереж і форсайт технологій.

Головною перевагою представленого на рис. 3 механізму взаємодії штучних нейронних мереж і форсайт методу у формуванні регіональної кластерної політики є економія часу для розробки та комерціалізації альтернативної технології. Слід мати на увазі, що самостійна розробка підприємством альтернативної технології має ряд проблем, які на етапі підготовки до технологічних перетворень не настільки очевидні. Це, насамперед, відсутність упевненості в тому, що розробка і впровадження нової альтернативної технології буде для підприємства комерційно успішним проектом. Значні витрати часу на організацію такої розробки та її комерціалізацію за експертними оцінками становить близько 4 – 6 років. Цей фактор часу не виключає можливість появи за цей час нових більш ефективних і більш конкурентоспроможних технологій та їх продуктів, тобто, існує істотна ймовірність того, що майбутня технологія, яка розробляється, виявиться морально застарілою ще до її реалізації.

Ці проблеми потребують перевірки щодо передбачення майбутніх змін та отримання впевненості у здатності альтернативних технологій до продукування нововведень. Саме ці міркування змушують безліч підприємств і навіть великі корпорації купувати ліцензії на використання нових технологій. Вони чітко розуміють, що життєвий цикл ринкової продукції може виявитись досить коротким і не потрібно втрачати час, тобто, слід швидше організувати виробництво й реалізацію цієї, поки ще необхідної споживачеві продукції. Об'єднання теорії форсайту із теорією штучних нейронних мереж в одній методології управління вибором напрямів технологічного реінжинірингу відкриває нові переваги у здійсненні інноваційних перетворень.

На початковому етапі технічної підготовки до проведення технологічного реінжинірингу деякі прогнози можна зробити зовсім не звертаючись до статистичних моделей і методів. Вони (якісні прогнози) можуть бути і так прозорі. Таким чином, якщо ситуація через зовнішні або внутрішні події на ринку кардинально не змінилась, то лише в цьому випадку має сенс звертатись до статистичних прогнозів, що ґрунтуються на досвіді діяльності даного підприємства або подібних підприємств-аналогів на даному ринку в попередній період часу.

При значних змінах на ринку багато методів прогнозу стають неприйнятними, але це не означає, що взагалі слід відмовитись від проведення прогнозу. Нехай це буде опитування експертів або аналіз подібних ситуацій у досить далекий період у діяльності підприємства, не суть важливо. Важливо те, що попередній прогноз кінцевих результатів інноваційних реінжинірингових перетворень виробничої бази підприємства завжди слід проводити кількома незалежними способами, спираючись на різні показники, згруповані в окремі масиви даних. Якщо виявиться значна невідповідність досить коректно проведених різнопланових прогнозів, то це слід розглядати як серйозний сигнал про виниклі дисбаланси, внутрішні напруги й уважно придивитись до наборів вихідних даних, що використані у прогнозі, і методів їх збору.

З іншого боку, інформація про результати прогнозу формує певну психологічну позицію співробітників і служб підприємства, а якщо про прогноз дізнається ринок, то реакція обізнаних людей і суб'єктів ринку здатна змінити ситуацію на ринку в той чи інший бік. Тому всі проведені прогнози повинні враховувати суб'єктивну складову внутрішнього і зовнішнього середовища підприємства (особливо це стосується великих підприємств) і можливий витік інформації.

В роботі [3,4] обґрунтовано, що чотири групи внутрішніх чинників містять близько двадцяти чинників, що могли б виступати в якості вхідних величин нейронної мережі. Очевидно, для синтезу нейронної мережі доцільно визначити на науковій основі ті з них, що суттєво впливають на показник енергоефективності. Такою науковою основою є широко

використовувані статистичні методи експертних оцінок, метод апріорного ранжування та кореляційного аналізу. З урахуванням вищенаведеного, пропонується наступний методичний підхід використання штучних нейронних мереж з використанням форсайт методу для визначення показника ефективності кластерної політики передбачає наступні кроки:

1. Формується експертна група з числа компетентних осіб, в склад якої залучаються працівники підприємств, науки і влади, що займаються формуванням проекту реінжинірингових перетворень на основі кластерної політики. Експертом має бути компетентна для вироблення оцінки особа, яка має спеціальний досвід в окреслених вище напрямках і яка бере участь в дослідженні. В якості експертів необхідно використовувати тих людей, чий судження допоможуть прийняттю адекватного рішення. Фахівець з розробки програми корінних технологічних перетворень – це високопрофесійний спеціаліст, який повинен володіти інженерними знаннями, станом науково-технологічних досягнень у певному сегменті ринку, методами аналізу та ефективного управління виробничими процесами, мати навички проведення інноваційних перетворень, виявляти і оцінювати суттєві і несуттєві фактори впливу, управляти інноваційно-інвестиційними проектами. При підборі експертів слід враховувати небезпеку особистої зацікавленості в тому чи іншому рішенні, який може стати суттєвою перешкодою для отримання об'єктивного рішення.

2. Виконується вибір системи показників та інтегрального показника ефективності проекту реінжинірингових перетворень на основі кластерної політики, як вихідного параметра нейронної мережі, побудованого з урахуванням форсайт індикаторів. Таким інтегральним показником, наприклад, можуть бути енергоємність, або матеріалоємність окремих підприємств кластеру та кластеру в цілому.

3. Експертною групою встановлюється раціональний набір чинників з відомими параметрами, що впливають на енергоємність (матеріаловіддача) кластерного утворення. Обрані чинники включаються в модель реінжинірингу. Для того щоб провести факторний аналіз показників необхідно створити багатофакторну модель. Сутність побудови моделі полягає у визначенні математичної залежності між чинниками.

4. Після ознайомлення із зазначеними чинниками експерти ранжують запропоновані чинники, за ступенем впливу на показник енергоємності (матеріаловіддачі), присвоюючи номер, згідно розташування взятих до розгляду чинників в порядку зростання впливу (пряме ранжування) або його зменшення (зворотне ранжування). Місце розташування чинника кожним експертом являє собою ранг у вигляді натурального числа.

5. Здійснюється за допомогою коефіцієнта конкордації Кенделла W [15] оцінка ступеня узгодженості думок експертів,

Для навчання нейронної мережі вибрано метод генетичних алгоритмів. Розглянемо більш детально цей метод. Їх особливістю є те, що до функції,

максимум або мінімум, яка шукається, не пред'являється абсолютно ніяких вимог. Вона може бути переривчастою, недиференційованою або складатися з часток, описуваних різними рівняннями. У будь-якому випадку, алгоритм дозволить знайти для неї оптимальне (або близьке до нього) значення. Генетичні алгоритми можуть бути використані для вирішення будь-яких завдань, які можна звести до задачі оптимізації проектних завдань. Сутність даного методу стосовно розв'язуваної в цій роботі задачі описана в [16-19]. Даний метод копіює закони селекції, які спостерігаються в природі. Кожна хромосома (рішення, послідовність, індивідуальність, "батько", "нащадок", "дитина") являє собою вектор з вагових коефіцієнтів, що подаються в бінарному коді та розташоване в строго визначеній послідовності (ваги зчитуються з нейронної мережі в установленому порядку - зліва направо і зверху вниз). Кожен ваговий коефіцієнт є «геном» хромосоми (Рис. 3). Набір «хромосом», що підлягають «попарному схрещуванню», представляє «популяцію». Еволюція популяцій - це чергування поколінь, в яких хромосоми змінюють свої ознаки, щоб кожна нова популяція найкращим способом пристосовувалася до зовнішнього середовища [20].

w_{11}				$\dots$		w_{ikn}				β_1				$\dots$		β_n				φ_1				$\dots$		φ_n						
0	1	..	1	0	..	0	1	0	..	1	0	0	..	1	.	.	.	1	1	.	0	1	0	.	1	.	.	.	1	0	.	1

Рис. 3. Хромосома нейронної мережі

Сукупність «хромосом» в популяції з стохастически певними значеннями «генів» є «батьками», кожен з яких має свій номер. Як і в природі, стохастично визначаються номери батьків, що схрещуються і номери позиції, за якими відбувається «схрещування». Початкова популяція вибирається випадково, значення ваг лежать в проміжку $[0, 1]$. При «схрещуванні» утворюється нова хромосома, що складається з частин хромосом батьків. Спосіб утворення нової хромосоми - «нащадку» різний: кросовер, інверсія, мутація, що реалізуються з імовірністю, близькою до тих, які спостерігаються в природі. Оператор мутації, подібно до мутацій в Природі, інтерпретується як заміна існуючого стану окремого гена в хромосомі на протилежне (одиниці – на нуль і навпаки). Залежно від того, в якому розряді фрагмента, що кодує змінну, відбудеться мутація, залежить величина відстані, що відокремлює потомка від батьків. Інверсія призводить до порушення порядку проходження фрагментів хромосом у потомка в порівнянні з батьківською хромосомою. Кросовер призводить до того, що хромосома потомка включає два фрагмента, один з яких належав раніше, умовно кажучи, батьківській хромосомі, а інший - материнській. Саме завдяки наявності кросоверних обмінів особини популяції обмінюються між

собою генетичною інформацією, тобто пошук набуває дійсно колективний характер.

Для кожної з «хромосом» розраховується вихідне значення нейронної мережі (в нашому випадку - значення інтегрального показника енергоємності кластерного утворення) і визначається за обраним критерієм близькість збігу результату зі статистичними значеннями. З отриманої після серії схрещувань пар «хромосом» (після епохи навчання) виключається деяке число хромосом, що забезпечують найгірше значення критерію наближення розрахункового значення Y до статистичного, так, щоб зберіглося встановлене для популяції кількість хромосом.

Стохастичний процес схрещування багаторазово повторюється до тих пір, поки для аналізованих підприємств не буде підбрано таке поєднання значень вагових коефіцієнтів і коефіцієнтів зсуву, яке при розрахунку на статистичних даних вхідних чинників буде забезпечувати прийнятий збіг відповідних їм статистичних значень енергоємності.

Встановимо, за якими вимогами виконується вибір даних для синтезу та перевірки. Нейронна мережа навчається за допомогою заздалегідь відомих вихідних даних і результатів форсайту. Для керованого навчання мережі користувач повинен підготувати набір навчальних даних. Ці дані представляють собою приклади вхідних даних і відповідних їм виходів. Мережа навчається встановлювати зв'язок між першими і другими. Вхідні чинники визначаються на перших етапах розробленої методики методами статистичного аналізу. Зазвичай навчальні дані беруться з історичних відомостей, тобто з статистичних даних підприємств, які зібрані за декілька років та горизонту форсайт дослідження. Від якості вибірки залежить точність оцінок параметрів моделі і відповідно її результат. До вибірки пред'являється ряд вимог, які обумовлюють отримання адекватної моделі:

- розмір вибірки повинен бути достатнім для виявлення закономірностей (чим більше даних, тим менше буде похибка);
- однорідність вибірки, тобто дані у вибірці повинні підкорятися одним і тим же закономірностям;
- різноманітність даних, тобто повинна показувати результаті діяльності при всіх часах (інфляція, зріст, коливання курсу валют та інші змінення в зовнішньому та внутрішньому середовищі підприємства з урахуванням горизонту форсайту).

Вся числова інформація для нейромережевої обробки масштабується, тобто вирівнюються діапазони зміни величин, обмеживши їх інтервалом $[-1, 1]$, це досягається нормуванням, яке описано у даному підрозділі раніше.

При формуванні виборок для навчання та тестування пропонується взяти їх кількість в пропорції 70% для навчання нейронної мережі та на 30% для її тестування.

Навчання (синтез) нейронної мережі виконується за вибраним методом генетичного алгоритму. Процес навчання нейронної мережі являє собою уточнення і корекцію значень вагових коефіцієнтів. На вхід нейронної мережі подають вхідні значення, а на виході порівнюють значення мережі з реальним результатом, і в залежності від ступеня їх згідно генетичного алгоритму видаляють найгірші хромосоми, виконують схрещення, розраховують критерії помилки і порівнюють його із заданим. Ця операція повторюється багатократно десятки, іноді і сотні тисяч разів. Навчання нейронної мережі припиняється, коли мережа працює задовільно і помилка досягла певного рівня малості. Перевірка адекватності нейронної мережі здійснюється розрахунком показників енергоємності промислових підприємств, які не увійшли до навчальної вибірки.

Висновки з проведеного дослідження. Сучасні тенденції Форсайт-досліджень у сфері науки та технологій, що виявляються у багатьох країнах, чітко свідчать про поступове «вбудовування» Форсайту в систему науково-технічної політики. Водночас – насамперед завдяки стрімкому прогресу інтернету – прогностичні дослідження все ширше спираються на найрізноманітніші інформаційні ресурси та засоби їх аналізу, що створює основу для конвергенції кількісних та якісних методів Форсайту. Такі дослідження можна як інструментарій інноваційних проєктів, т.я. вони дають змогу спроектувати технології управління інноваціями у виробничій сфері підприємства. Це пов'язано насамперед з тим, що у проведенні Форсайт-дослідження особливу роль відіграють комунікації як у процесі проведення самого дослідження, і у процесі представлення отриманої інформації. Розвиток інструментарію, що дозволяє ефективно взаємодіяти учасникам інноваційного процесу, є найважливішим завданням проєктів, а Форсайт дозволяє вирішувати це завдання з точки зору стратегічного прогнозування. Все це допомагає створити сприятливі умови для практичного перетворення Форсайту на інструмент науково-технічної та інноваційної політики, орієнтованої на довгострокову перспективу.

Список використаної літератури:

1. Хайкин С. Нейронные сети, полный курс. 2-е изд. М.: Вильямс, 2008. 1103 с.
2. Бакулевський В. Л. Застосування нейронних мереж для розрахунків технічних втрат електроенергії в повітряних лініях електропередач напругою 6-35 кВ. Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. 2015. Вип. 30. Т. 2. С. 152–160.
3. Клепикова С. В. Применение нейронных сетей в управлении энергоэффективностью предприятия. Нейро-нечётки технологии моделирования в экономике. К.: КНЕУ. 2018. № 7. С. 127-147.
4. Клепикова С. В., Клепиков В. Б. К использованию метода нейронных сетей для решения экономических задач. Вісник НТУ «ХПІ». Х.: НТУ «ХПІ». 2005. Вип. 31. С. 59–66.
5. Матвійчук А. В. Штучний інтелект в економіці: нейронні мережі, нечітка логіка: монографія. Київ: КНЕУ, 2011. 439 с.

6. Терехов В. И., Жуков Р. В. Методика подготовки данных для обработки импульсными нейронными сетями. Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2017. № 2. С. 31–36.
7. Лічко К. П. Прогнозування та планування розвитку агропромислового комплексу. 3-е вид. М.: Економіка, 2013. 412 с.
8. Кеннет Ли, Антилл Ник. Оценка компаний: Анализ и прогнозирование с использованием отчетности по МСФО. Москва, Альпина Паблишер, 2017. 440 с.
9. Стан науково-інноваційної діяльності в Україні у 2020 році: науково-аналітична записка Т. В. Писаренко, Т. К. Куранда, Т. К. Кваша та ін. К.: УкрІНТЕІ, 2021. 39 с.
10. Сергеев Н. Н. Методологические аспекты энергосбережения и повышения энергетической эффективности промышленных предприятий : монография. Ижевск: Удмуртский университет, 2013. 116 с.
11. ДСТУ ISO/IEC 13273-1:2017 (ISO/IEC 13273-1:2015) Енергоефективність і поновлювані джерела енергії. Загальна міжнародна термінологія. Частина 1. Енергоефективність. [Чинний від 2018-06-01]. Київ, 2017. 17 с.
12. Зарицька О. Л. Економічне оцінювання інноваційної енергозберігаючої продукції підприємств машинобудування : автореф. дис. кандидата економічних наук : 08.00.04. Львів, 2010. 24 с.
13. Форсайт в Україні у 2019-2020 рр.: бачення експертів щодо пріоритетних напрямів науки і технологій в Україні для реалізації Цілей сталого розвитку: монографія. Т. В. Писаренко, Т. К. Кваша, О. Ф. Паладченко, Л. В. Рожкова та ін. – К.: УкрІНТЕІ, 2020. 214 с.
14. Європейська Комісія, «Сприяння загальноєвропейському форсайту підходить», сайт досліджень та інновацій Європейської комісії. URL: http://ec.europa.eu/research/social-sciences/fwl-platform3_en.html.
15. Бешелев С. Д., Гурвич Ф. Г. Математико-статистические методы экспертных оценок. М.: Статистика, 1980. 263 с.
16. Соломка Ю. И. Применение генетических алгоритмов для обучения нейронных сетей. Четверта міжнародна студентська науково-практична конференція "Світ молоді - молодь світу". 15-17 2004 рік: матеріали конференції. Вінниця : ВІ МАУП, 2004. С. 85–90.
17. Wu W., Guozhi W., Yuanmin Z., Hongling W. Genetic Algorithm Optimizing Neural Network for Short-Term Load Forecasting. International Forum on Information Technology and Applications. 2009. P. 583–585.
18. Jinru L., Yibing L., Keguo Y. Fault Diagnosis of Piston Compressor based on Wavelet Neural Network and Genetic Algorithm. Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation. 2008. P. 606–610.
19. Tang C., He Y., Yuan L. A Fault Diagnosis Method of Switch Current Based on Genetic Algorithm to Optimize the BP Neural Network. International Conference on Electric and Electronics. 2011. Vol. 99. P. 943–950.
20. Махотило К. В. Диплоидный генетический алгоритм со смертностью. Проблемы управления и информатики. 2011. № 3. С. 138–150.
21. Аллан Даль Андерсен и Пер Даннеманд Андерсен. Инновационные системы форсайта: Толкование и Систематизирование Фондов инновационных систем форсайта и исследования его значения. Дания: Технический университет Дании, 2012г. С. 3.
22. Лайош Нийри. Форсайт как инструмент выработки политики. В Технологическом форсайте для организаторов. Бразилия: Центр стратегических исследований и управления, 2003. А10.
23. Форсайт как инструмент стратегического долгосрочного планирования для развивающихся стран. 2014 UNDP Global Centre for Public Service Excellence #08-01, Block A, 29 Heng Mui Keng Terrace, 119620 Singapore. URL: www.undp.org/publicservice twitter.com/UNDPpublicserv [www.fb.com/GCPSEunteamworks.org/node/421576](https://www.facebook.com/GCPSEunteamworks.org/node/421576) (дата доступу 20.07.2022)
24. Ашис Нэнди. Являясь свидетелем будущего. Анализ будущего. 1996. 28, № 6-7. 636-7.
25. Франс Беркхаут и Джулия Хертин. Сценарии анализа будущего форсайта: Разработка и применение интерактивного инструмента стратегического планирования. Greener Management International 37. 2002. 39 с.

References:

1. Hajkin S. Neironnye seti, polnyj kurs. 2-e izd. M. Vilyams, 2008. 1103 s.
2. Bakulevskij V. L. Zastosuvannya neironnih merezh dlya rozrahunkiv tehnicnih vtrat elektroenergiyi v povityrianih liniyah elektroperedach naprugoyu 6-35 kV. Visnik Priazovskogo derzhavnogo tehnicnogo universitetu. Seriya: Tehnicni nauki. 2015. Vip. 30. T. 2. S. 152–160.
3. Klepikova S. V. Primenenie neironnyh setej v upravlenii energoefektivnostyu predpriyatiya. Neiro-nechitki tehnologiyi modelyuvannya v ekonomici. K. KNEU. 2018. № 7. S.127-147.

4. Klepikova S. V., Klepikov V. B. K ispolzovaniyu metoda nejronnyh setej dlya resheniya ekonomicheskikh zadach. Visnik NTU «HPI». H. NTU «HPI». 2005. Vip. 31. S. 59–66.
5. Matvijchuk A. V. Shtuchnij intelekt v ekonomici: nejronni merezhi, nechitka logika: monografiya. Kiyiv. KNEU, 2011. 439 s.
6. Terehov V. I., Zhukov R. V. Metodika podgotovki dannyh dlya obrabotki impulsnymi nejronnymi setyami. Nejrokompyutery: razrabotka, primenenie. 2017. № 2. S. 31–36.
7. Lichko K. P. Prognozuвання та планування розвитку агропромислового комплексу. 3-е вид. М. Економіка, 2013. 412 s.
8. Kennet Li. Antill Nik. Ocenka kompanij: Analiz i prognozirovaniye s ispolzovaniem otchetnosti po MSFO. Moskva, Alpina Publisher, 2017. 440 s.
9. Stan naukovo-innovacijnoyi diyalnosti v Ukrayini u 2020 roci: naukovo-analitichna zapiska T.V. Pisarenko, T.K. Kuranda, T.K. Kvasha ta in. K. UkrINTEI, 2021. 39 s.
10. Sergeev N. N. Metodologicheskie aspekty energosberezheniya i povysheniya energeticheskoy effektivnosti promyshlennyyh predpriyatij: monografiya. Izhevsk. Udmurtskiy universitet, 2013. 116 s.
11. DSTU ISO/IEC 13273-1:2017 (ISO/IEC 13273-1:2015) Energoefektivnist i ponovlyuvani dzhherela energiyi. Zagalna mizhnarodna terminologiya. Chastina 1. Energoefektivnist. [Chinnij vid 2018-06-01]. Kiyiv, 2017. 17 s.
12. Zaricka O. L. Ekonomichne ocinyuvannya innovacijnoyi energozberigayuchoyi produkciji pidpriyemstv mashinobuduvannya: avtoref. dis. kandidata ekonomichnih nauk: 08.00.04. Lviv, 2010. 24 s.
13. Forsajt v Ukrayini u 2019-2020 rr.: bachennya ekspertiv shodo prioritetnih napryamiv nauki i tehnologij v Ukrayini dlya realizaciyi Cilej stalogo rozvitku: monografiya. T. V. Pisarenko, T. K. Kvasha, O. F. Paladchenko, L. V. Rozhkova ta in. K. UkrINTEI, 2020. 214 s.
14. Yevropejska Komisiya, «Spriyannya zagalnoyevropejskomu forsajtu pidhodi», sajт doslidzhen ta innovacij Yevropejskoyi komisiyi. Available at: http://ec.europa.eu/research/social-sciences/fwl-platform3_en.html.
15. Beshelev S. D., Gurvich F. G. Matematiko-statisticheskie metody ekspertnyh ocenok. M. Statistika, 1980. 263 s.
16. Solomka Yu. I. Primenenie geneticheskikh algoritmov dlya obuche-niya nejronnyh setej. Chetverta mizhnarodna studentska naukovo-prak-tichna konferenciya "Svit molodi - molod svitu". 15-17 2004 rik: materialy konferenciyi. Vinnicya. VI MAUP, 2004. S. 85–90.
17. Wu W., Guozhi W., Yuanmin Z., Hongling W. Genetic Algorithm Optimizing Neural Network for Short-Term Load Forecasting. International Forum on Information Technology and Applications. 2009. P. 583–585.
18. Jinru L., Yibing L., Keguo Y. Fault Diagnosis of Piston Compressor based on Wavelet Neural Network and Genetic Algorithm. Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation. 2008. P. 606–610.
19. Tang C., He Y., Yuan L. A Fault Diagnosis Method of Switch Current Based on Genetic Algorithm to Optimize the BP Neural Network. International Conference on Electric and Electronics. 2011. Vol. 99. P. 943–950.
20. Mahotilo K. V. Diploidnyj geneticheskij algoritм so smertnostyu. Problemy upravleniya i informatiki. 2011. № 3. S. 138–150.
21. Allan Dal Andersen i Per Dannemand Andersen, Innovacionnye sistemy forsajta: Tolkovanie i Sistematizirovanie Fondov innovacionnyh sistem forsajta i issledovaniya ego znacheniya. Daniya. Tehnicheskij universitet Danii, 2012g. P. 3.
22. Lajosh Nijri. Forsajt kak instrument vyrabotki politiki. V Tehnologicheskome forsajte dlya organizatorov. Braziliya. Centr strategicheskikh issledovanij i upravleniya, 2003g. A10.
23. Forsajt kak instrument strategicheskogo dolgosrochnogo planirovaniya dlya razvivayushihnya stran. 2014 UNDP Global Centre for Public Service Excellence #08-01, Block A, 29 Heng Mui Keng Terrace, 119620 Singapore. Available at: www.undp.org/publicservice twitter.com/UNDPpublicserv www.fb.com/GCPSEunteamworks.org/node/421576 (data dostupu 20.07.2022)
24. Ashis Nendi. Yavlyayas svidetelem budushego. Analiz budushego. 1996. 28, № 6-7. 636-7.
25. Frans Berkhaut i Dzhuiliya Hertin. Scenarii analiza budushego forsajta: Razrabotka i primenenie interaktivnogo instrumenta strategicheskogo planirovaniya. Greener Management International 37. 2002. 39 s.

Стаття надійшла до редакції 21.08.2022 р.

Безпрозваних Ганна Вікторівна, доктор технічних наук, професор; тел. (+38) 050-343-55-59; E-mail: Hanna.Bezprozvannukh@khpi.edu.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9584-3611>

Москвітін Євгеній Сергійович, кандидат технічних наук, старший викладач; тел. (+38) 095-346-84-19; E-mail: yevhen.moskvitin@khpi.edu.ua

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", вул. Кирпичова, 2, Харків, 61002, Україна

СТРАТЕГІЯ УПРАВЛІННЯ СТАРІННЯМ КАБЕЛІВ АТОМНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ

Анотація. Управління старінням кабелів є невід'ємною та обов'язковою вимогою для безперервної безпеки та надійної роботи атомних електричних станцій у зв'язку з пролонгацією їх терміну експлуатації. Дослідження наукової спільноти зосереджено на адаптації електричних неруйнівних методів моніторингу зразків кабелів у лабораторних умовах для визначення стану їх електричної ізоляції. Виконаний аналіз програм управління старінням кабелів АЕС доводить за необхідне нових репрезентативних результатів дослідження кабелів для визначення характеристик із застосуванням спеціальних методів контролю та відповідного обладнання. Акцентовано на стратегії управління старінням кабелів із залученням науковців з фаховим досвідом щодо проведення комплексних діагностичних обстежень з кваліфікованим аналізом отриманих результатів на основі найсучасніших технологій. Представлено ефективні методи, методики та сучасна техніка з результати оцінки технічного стану кабелів АЕС.

Ключові слова: атомна електрична станція, кабель, термін експлуатації, управління старінням, методи контролю, технічний стан.

Ganna Bezprozvannykh, Dr. techn. sciences, Professor; Tel. (+38) 050-343-55-59; E-mail: Hanna.Bezprozvannukh@khpi.edu.ua

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kyrpychova Str., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002

Yevhen Moskvitin, Cand. techn. Sciences, Tel. (+38) 095-346-84-19; E-mail: yevhen.moskvitin@khpi.edu.ua

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kyrpychova Str., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002

AGING MANAGEMENT OF CABLES OF NUCLEAR POWER PLANTS

Abstract. Cable aging management is an integral and mandatory requirement for continuous safety and reliable operation of nuclear power plants due to the extension of their service life. The research of the scientific community is focused on the adaptation of electrical non-destructive methods of monitoring cable samples in laboratory conditions to determine the state of their electrical insulation. The performed analysis of NPP cable aging management programs proves the need for new representative results of cable research to determine characteristics using special control methods and appropriate equipment. Emphasis is placed on the strategy of cable aging management with the involvement of scientists with professional experience in conducting complex diagnostic examinations with qualified analysis of the obtained results based on the most modern technologies. Effective methods, techniques, and modern techniques for the assessment of the technical condition of NPP cables are presented.

Keywords: nuclear power plant, cable, service life, aging management, control methods, technical condition.

Безпрозванных Анна Викторовна, доктор технических наук, профессор; тел. (+38) 050-343-55-59; E-mail: Hanna.Bezprozvannukh@khpi.edu.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9584-3611>

Москвитин Евгений Сергеевич, кандидат технических наук, старший преподаватель; тел. (+38) 095-346-84-19; E-mail: yevhen.moskvitin@khpi.edu.ua

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ул. Кирпичева, 2, Харьков, 61000, Украина

СТРАТЕГИЯ УПРАВЛЕНИЯ СТАРЕНИЕМ КАБЕЛЕЙ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

Аннотация. Управление старением кабелей является неотъемлемым и обязательным требованием непрерывной безопасности и надежной работы атомных электрических станций в связи с пролонгацией их срока эксплуатации. Исследование научного сообщества сосредоточено на адаптации неразрушающих электрических методов мониторинга образцов кабелей в лабораторных условиях для определения

состояния их электрической изоляции. Выполненный анализ программ управления старением кабелей АЭС доказывает необходимые новые репрезентативные результаты исследования кабелей для определения характеристик с применением специальных методов контроля и соответствующего оборудования. Акцентируется на стратегии управления старением кабелей с привлечением ученых со профессиональным опытом проведения комплексных диагностических обследований с квалифицированным анализом полученных результатов на основе самых современных технологий. Представлены эффективные методы, методики и современная техника с результатами оценки технического состояния кабелей АЭС.

Ключевые слова: атомная электростанция, кабель, срок эксплуатации, управление старением, методы контроля, техническое состояние.

Постановка проблеми. Завдання технічного обслуговування кабелів атомних електричних станцій (АЕС) з кожним роком стає все більш складним та відповідальним. Багато типів кабелів вичерпали встановлений ресурс, інші наближаються до завершення планових термінів експлуатації [1-4].

З огляду на те, що на одному блоці АЕС зазвичай знаходиться близько 1500 км силових, контрольних, контрольно-вимірювальних та інших кабелів у більш ніж 25 000 ланцюгах (рис. 1), заміна всіх кабелів є серйозним економічним навантаженням та технічно, практично, неможлива за причини складності кабельної інфраструктури (рис. 1).



а



б [3]

Рис. 1. Траса кабелів на АЕС України (а) та АЕС «Джентілі-2» Канада (б).

В той же час, також технічно неможливо провести обстеження всіх кабелів, адже спектр типів кабелів різних виробників достатньо значний: кабелі відрізняються за призначенням, конструкцією, застосованими матеріалами та умовами експлуатації навіть на одному й тому ж блоці станції.

Системні профілактичні обстеження перевіряють роботу кабелів АЕС за нормальних навантажень. Такі випробування, зазвичай, не виявляють ознак старіння кабелів та її ізоляції. Кабелі вибрані з великими запасами за напругою, струмом, робочою температурою та мають високий опір ізоляції, електричну міцність, незначний дрейф всіх параметрів до моменту виходу з ладу (пробою у випадку силових кабелів).

Занепокоєння викликає продуктивність кабелів під винятковими навантаженнями, пов'язаними з проєктними (DBE) або навіть аварійними (LOCA) ситуаціями.

Найбільш оптимальним підходом є вибірка найбільш критичних кабелів, що експлуатуються у несприятливих умовах та середовищах. Для пошуку потенційно несприятливих середовищ («гарячих» точок - «плям»), як-от: висока температура, вологість або навіть занурення у воду, дія хімічних речовин або механічного навантаження, застосовується візуальний огляд кабельних ділянок. Наступним етапом є проведення діагностичних перевірок вибраних кабелів у конкретних несприятливих умовах експлуатації (рис. 1). Цей процес є безперервним, який завершується після перевірки кабелів в жорстких умовах експлуатації та встановлення відповідності їх технічного стану критеріям прийнятності, що підтверджує можливість функціонування до наступного періоду перевірки.

В наступний час світова практика експлуатації АЕС зосереджена на продовженні терміну служби до 40 і 60 років, навіть ставиться задача до 80 років, та вимагає програми управління старінням кабелів для визначення характеристик кабелю як за нормальної експлуатації, що ґрунтується на результатах профілактичних та діагностичних обстежень безпосередньо на АЕС, так і за умови аварії, що потребує спеціальних методів та відповідного обладнання для обстеження зразків кабелів у спеціалізованих лабораторних умовах. Управління старінням кабелів є невід'ємною та обов'язковою вимогою для безперервної безпеки та надійної експлуатації станцій. Наслідки старіння, особливо деградація матеріалів, поступово відчуються в усьому світі з початку експлуатації АЕС. Деградація матеріалів продовжуватиметься у міру старіння АЕС і продовження ліцензій на експлуатацію пов'язано з працездатністю кабелів у тому числі. Непередбачена та неконтрольована структурна деградація може призвести до значної втрати резервів безпеки, підриваючи довіру суспільства та напружуючи ресурси регуляторних органів та операторів. Для контролюючих органів важливо перевірити адекватність старіння методами управління, що застосовуються ліцензіатами, заснованими на надійних науково-технічних доказах, отриманих на репрезентативних даних діагностичних обстежень.

Аналіз літературних джерел. Деградація оболонки кабелю, електричної ізоляції та інших компонентів кабелів, встановлених на АЕС, відбувається в залежності від строку експлуатації, температури, радіації та інших факторів навколишнього середовища [5-8].

Експериментально доведено [9], що електричні та механічні властивості опромінених зразків силових кабелів зі зшитою поліетиленовою ізоляцією значно змінюються через роки зберігання в неконтрольованих умовах навколишнього середовища через пострадіаційні ефекти, що може призвести до значної похибки у оцінці технічного стану кабелів АЕС. Діагностичні дослідження необхідно повторювати з часом, навіть через роки, після впливу радіації.

Контроль стану силових кабелів низької напруги АЕС історично покладався на дослідження матеріалів ізоляції зі зразків кабелів, зокрема на руйнівні механічні випробування щодо визначення подовження. Проведені авторами дослідження, спонсоровані американським науково-дослідним інститутом електроенергетики (EPRI), доводять здатність діелектричної спектроскопії у низькочастотній області в діапазоні 10^{-3} до 10^6 Гц для моніторингу старіння кабелів АЕС [10].

Лабораторними дослідженнями, представленими у [11], продемонстровано вплив часу радіаційного старіння за умови однакової поглиненої дози на діелектричні втрати у зразках: більш тривалий період старіння меншою дозою за одиницю часу призводить до зростання діелектричних втрат за рахунок кумулятивного процесу старіння.

В [12-14] представлено методи контролю та результати досліджень зістарених зразків кабелів АЕС. Методи включають проведення контролю на макро-рівні, тобто зразків кабелів, за електричними характеристиками: тангенсом кута діелектричних втрат, рефлектометрією [15] у часовій та частотній областях, частковими розрядами, а також на мікрорівні (локальних) за механічними та фізико-хімічними характеристиками: індентором, динамічним механічним аналізом твердості, інфрачервоною спектроскопією відповідно.

Авторами наголошується [16], що ключовим елементом в управлінні старінням кабелів є розробка нових методів і засобів контролю для оцінки технічного стану, що базуються на знанні механізмів старіння ізоляційних матеріалів, які перебувають під впливом кількох факторів (температура, вологість, радіаційне опромінення).

На підставі дослідження загальної деградації зразків силових низьковольтних кабелів АЕС з етилен-пропіленовою гумою в залежності від дози опромінення встановлено значний кореляційний зв'язок між відносним подовженням при розриві та значенням тангенсу кута діелектричних втрат на частоті 100 кГц та запропоновано адаптувати електричний метод як неруйнівний метод для низьковольтних кабелів [17].

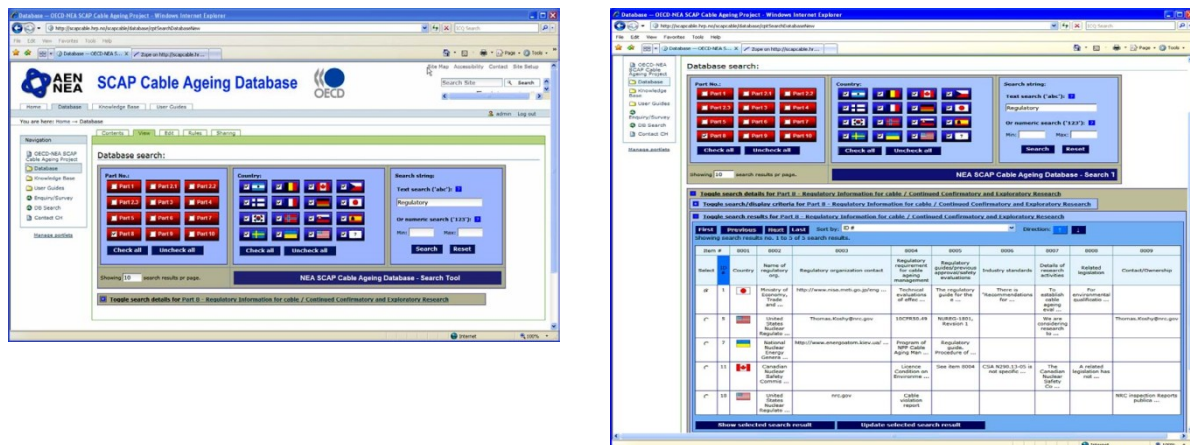
Метою даної роботи є визначення стратегії управління старінням кабелів на підставі діагностичних обстежень у лабораторних умовах зразків кабелів АЕС із застосуванням ефективних методів, методик та сучасної техніки.

Програми управління старінням кабелів АЕС. Для підтвердження функціональності кабелів для запланованої тривалої експлуатації понад 40 років необхідно мати критерії параметрів, за якими оцінюється технічний стан кабелів та визначається залишковий ресурс для продовження терміну експлуатації.

У програмі управління старінням кабелю атомних електростанцій в Україні – ПМ-Т.0.08.121-07 «Програма управління старінням кабелю АЕС (Атомної електростанції)» визначені вимоги для розробки, реалізації та змісту методичної, організаційно-технічної діяльності, пов'язаної з управлінням старінням кабелів АЕС [18]. Ця програма розроблена з урахуванням рекомендацій експертів МАГАТЕ. Метою управління старінням є забезпечення безпеки експлуатації, надійності кабелів за нормальних умов експлуатації протягом указанного терміну служби та меншого терміну за проектною аварійною умови. Програма застосовується до кабелів контролю (вимірювальних, сигнальних, блокуючих) з полімерною та гумовою ізоляцією, силових кабелів низької та середньої напруги з полімерною та паперово-просоченою ізоляцією. Проведення робіт щодо управління старінням кабелів здійснюється персоналом АЕС із залученням, за необхідності, спеціалізованих організацій, які займаються питаннями управління старінням кабелів [18]. Перевипуск програми "Програми управління старіння кабелів АЕС" («NPP cable aging management programs») повинен був завершитися 03 листопада 2022.

Деградація ізоляції кабелів була обрана як одна з основних тем проєкту SCAP [4] через її наслідки для ядерної безпеки станцій. SCAP було створено завдяки добровільному внеску Японії. Офіційно проєкт запущено у червні 2006 року та офіційно закрито міжнародним семінаром, що відбувся у Токіо в травні 2010 року. Учасниками проєкту були 17 країн, серед них - Україна представлена безпосередньо у розділі програми «Старіння кабелів» (рис.2). МАГАТЕ та ЄС також брали участь у цій програмі як спостерігачі [4].

База даних кабелів охоплювала такі функціональні області: кабелі безпеки, які підтримують аварійне охолодження реактора; кабелі, важливі для безпеки, тобто інші кабелі, для яких бажано запобігти або пом'якшити події базових проєктів; кабелі, важливі для роботи реактору, тобто кабелі, які можуть вийти з ладу і призвести до зупинки реактору або зниження його потужності. Серед них за призначенням: силові та контрольні кабелі на напругу до 15 кВ змінного струму та 500 В постійного струму відповідно, включаючи кабелі приладів і управління. Типи кабелів: коаксіальні, триаксіальні, волоконно-оптичні та гібридні. Типи ізоляції: зшитий поліетилен, полівінілхлоридний пластикат, етилен-пропіленова гума, етилен-вінілацетат, тощо. Матеріал провідників: мідь, мідь-олово, алюміній, скло, поліметилметаакрилат (останні два - матеріал осердя полімерних оптичних) та інші.



а

б

Рис. 2. Точка входу для інструменту пошуку бази даних, що показує панелі для вибору основних критеріїв пошуку, країн і рядків пошуку (а) та результати пошуку (б) [4].

База даних кабелів (рис.2) — реляційна база, що працює на основі програмного забезпечення MySQL. Введення даних до бази здійснюється за допомогою таблиць і спадних меню. Пошук у базі даних і додатків можна виконувати за запитом клієнтів. База даних складається з 10 частин. Частина 1 - Технічні характеристики кабелю. Частина 2 - Дані про технічне обслуговування кабелю (моніторинг стану). Частина 3 - Дані про події відмови кабелю. Частина 4 - Дані екологічної кваліфікації кабелю. Частина 5 - Екологічний стан станції та кабелю. Частина 6 - Пом'якшення навколишнього середовища встановленого кабелю. Частина 7 - Заміна кабелю. Частина 8 - Нормативна інформація щодо кабелю. Частина 9 - *Опис методів моніторингу стану*. Частина 10 - *Публікації та література з дослідженнями щодо старіння кабелів*.

У грудні 2010 року Комітет з безпеки ядерних установок (CSNI) Міжурядової Агенції з ядерної енергії (NEA), яка підтримує розвиток науково-технічної бази знань щодо безпеки ядерних установок, погодився підтримати дві наступні заходи у рамках проекту SCAP: 1. скликання наради експертів для створення бази даних щодо старіння кабелів - проєкт CADAК; 2. скликання наради експертів та створення Програми погіршення експлуатаційного досвіду та старіння компонентів (CODAP) (2011-2014). Проєкт CADAК є продовженням результатів роботи NEA щодо старіння кабелів за проєктом SCAP [1-3]. У 2012 році вісім країн-членів NEA приєдналися до проєкту CADAК, щоб об'єднати свої знання в загальну базу даних. Проєкт фінансувався за рахунок державних внесків кожної країни-учасниці NEA (Бельгія, Канада, Франція, Японія, Словаччина, Іспанія, Швейцарія та США). Україна не приймала участі у цьому проєкті.

Проект CADAК мав на меті створити технічну основу для оцінки кваліфікованого життя електричних кабелів у світлі невизначеностей, виявлених після початкового (раннього) кваліфікаційного тестування. Реалізація проекту складалась з двох етапів. Робота першого (2012-2014 р.р.) була зосереджена на продовженні побудови бази даних для збору інформації і визначення методів для національних координаторів, які надають дані та документи, що представляють результати поточної діяльності дослідницьких та тестових програм. База даних дозволяє збирати, обмінюватися, передавати, зберігати та використовувати технічну інформацію про механізми погіршення технічного стану кабелів, відповідні результати досліджень і розробок, а також національні норми та стандарти для проектно-будівельного та експлуатаційного контролю. База даних CADAК включає понад 1300 записів, розділених десятьма частинами, що утворюють структуру бази, та майже 275 окремих збірок документів з десяти країн.

На другому етапі (2015-2017 р.р.) - аналіз даних щодо кабелів був однією з цілей проекту CADAК. Значна частина даних отримана з проекту SCAP, а інша - надана з країн, у тому числі й тих, котрі не брали участі у проекті CADAК протягом другого етапу. На другому етапі залишилося 5 країн-учасників: Канада, Німеччина, Словацька Республіка, Швейцарія та Сполучені Штати Америки. Значні варіації типів кабелів та ізоляційних матеріалів, відмінності умов експлуатації кабелів з тим же типом конструкції та застосованих матеріалів, процедура постачання, технологія виготовлення кабелів на кабельних підприємствах, терміни та умови зберігання, невизначеність існуючих кабельних даних *унеможливило завершення збору даних з інших країн проекту*. Було визнано, що обсяг роботи та ресурси, необхідні для комплексного аналізу, настільки значні, що такий аналіз для кабельних даних в базі CADAК неможливий. Іншими словами, *загальне завершення проекту з демонстрацією відповідного зістареного кабелю з визначеною залишковою продуктивністю за нормального режиму експлуатації та обслуговуванням після аварії для продовження терміну експлуатації 60 років або навіть більше є проблематичним*. Для обґрунтування терміну служби 60 років або більше необхідні нові репрезентативні результати тестування та матеріали дослідження кабелів, а також більш детальний аналіз експлуатаційного досвіду для визнання критичного стану, додаткові перевірки з оцінкою технічного стану та профілактичного обслуговування [3].

Ефективні методи, методики та сучасна техніка для оцінки технічного стану кабелів АЕС. Кафедра «Електроізоляційна та кабельна техніка» на протязі більше 20 років займається проблемою оцінки технічного стану кабелів АЕС. Започатковані проф. Набокою Б.Г. науково-дослідні роботи з Сертифікаційним центром АСУ Держцентру якості Державного комітету ядерного регулювання України (м. Харків) продовжуються з

апробацією нових методів неруйнівного моніторингу зразків кабелів АЕС у лабораторних умовах [19-25].

Виконані на кафедрі тривалі ресурсні дослідження зразків кабелів АЕС із застосуванням ефективних методів, методик та сучасної техніки дозволили встановити відмінності у механізмах терморадіаційного старіння різних видів ізоляції з урахуванням особливостей конструкції кабелів та отримати параметри для оцінки технічного стану кабелів (рис. 3) [19]. Тільки частина отриманих даних у період 2000-2007 р.р. включено у відповідні Робочі програмі обстежень кабелів, розроблених у СертЦентрі АСУ за участю НТУ «ХП», враховано у програмі управління старінням кабелів АЕС в Україні (ПМ-Т.0.08.121-07) та внесено у базу даних SCAP [4]. Інша (рис. 4 - рис. 9) - у стадії «очікування».

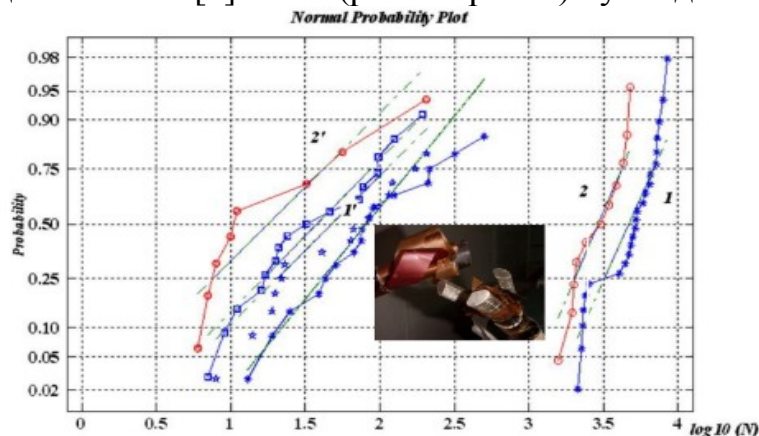
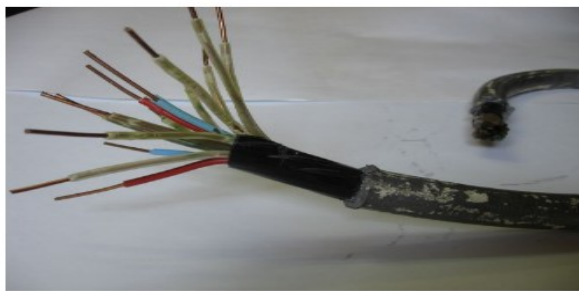
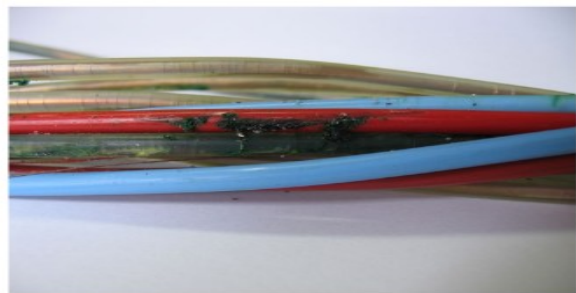


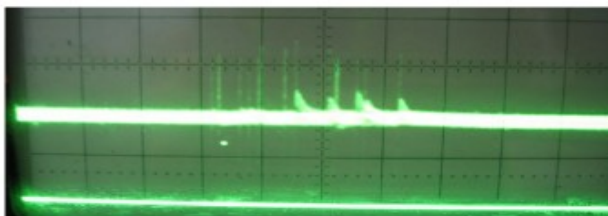
Рис. 3. Інтегральні функції розподілення числа подвійних згинів фазної (криві 1, 1') та поясної (криві 2, 2') паперової ізоляції силового кабелю ААШВ - 3х150-6 кВ в початковому стані після 25 років експлуатації (криві 1, 2) та після додаткового терморадіаційного старіння (криві 1', 2') [19].



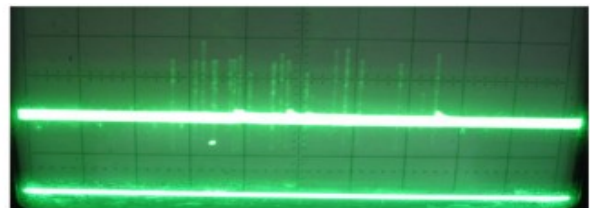
а



б



в

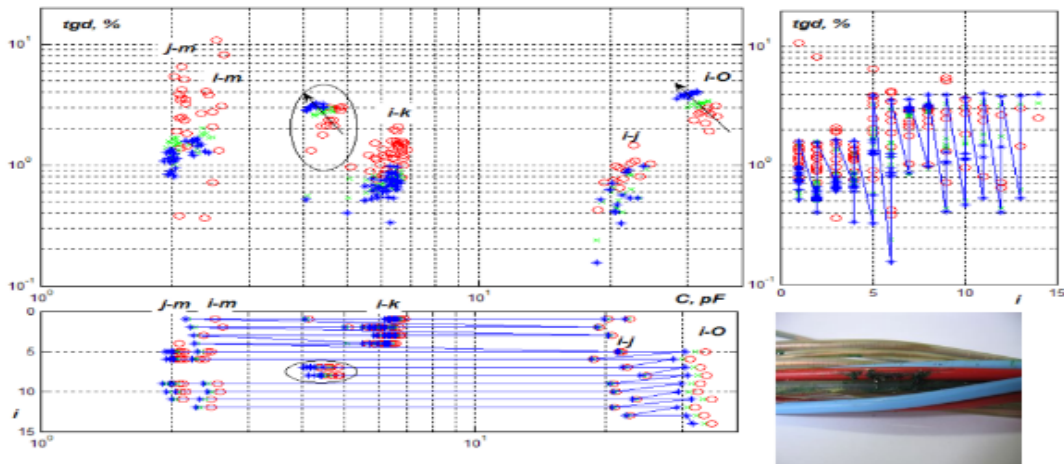


г

Рис. 4. Часткові розряди у зразках контрольного кабелю КпоСГ 2,5х14 після 25 років експлуатації до (а, в) та додаткового прискореного терморадіаційного старіння (б, г) [20].

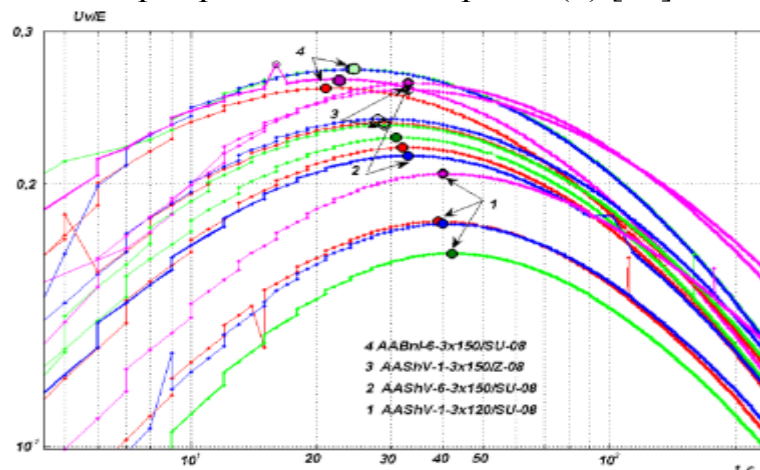


а



б

Рис. 5. Реалізація методу сукупних вимірювань ємності та тангенсу кута діелектричних втрат (а) та C - $tg\delta$ - f діаграма зразка контрольного кабелю КпоСГ 2,5х14 після 25 років експлуатації та додаткового прискореного терморадіаційного старіння (б) [21].



1- ААШВ-1кВ-3х120; 2- ААШВ-6кВ-3х150; 3- ААШВ-1кВ-3х150; 4- ААБнГ-6кВ-3х150

Рис. 6. Криві відновлюваної напруги зразків силових кабелів АЕС з паперово-просоченою ізоляцією у початковому стані після 25 років експлуатації (найближче до критичної області - кабель 4, подалі - 1).

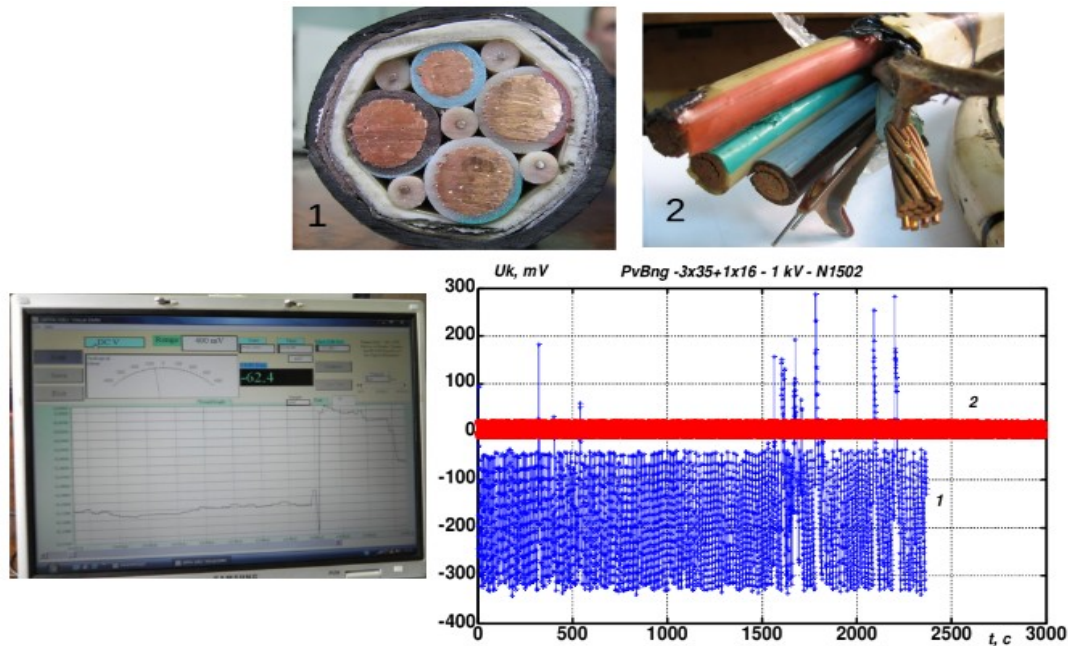


Рис. 7. Динаміка змінення трибопотенціалу у зразку силового кабелю ПвБнг 3х35+1- 1 кВ в початковому стані після 25 років експлуатації (крива 1) та після додаткового терморадіаційного старіння (крива 2) [24].

У цілому, сукупність експериментальних та теоретичних досліджень дозволяє встановити критерії досягнення граничного стану ізоляції зразків кабелів АЕС, які можуть бути використані при аналізі результатів обстежень кабелів в умовах експлуатації та обґрунтуванні необхідності завчасної заміни тих з них, технічний стан яких став критичним.

Досвід діагностичних обстежень кабелів АЕС різних типів, конструктивного виконання, застосованих матеріалів та умов експлуатації доводить необхідність всебічного аналізу отриманих результатів з урахуванням синергетичного ефекту впливу на електричну ізоляцію матеріалів конструкції, що ґрунтується на сучасних спеціальних знаннях в області електроізоляційної, кабельної та оптоволоконної техніки. Розуміння механізмів старіння різних видів ізоляції полегшує інтерпретацію даних та визначення критичних значень параметрів. Важливо, що у лабораторних умовах реалізується комплексний науковий підхід до оцінки технічного стану кабелів АЕС із застосуванням сучасних неруйнівних ефективних методів, методик, відповідної техніки та методів обробки експериментальних даних [19-25]. В умовах експлуатації неможливо у повній мірі реалізувати таку діагностику для повної оцінки технічного стану старіючої ізоляції. У лабораторних умовах на спеціально відібраних представницьких зразках кабелів вірогідність виявлення прихованих дефектів зістарених кабелів (див. рис. 5 та рис. 7) – змінення поверхні ізоляції з наростаючою сегрегацією поверхневих зарядів з подальшою їх дифузією у товщу високоякісної полімерної ізоляції, значна менше. В той же час, проведення обстежень зразків кабелів у різних лабораторіях на обладнанні різних виробників

унеможливиює, відповідно до концепції невизначеності вимірювань, проведення порівняння результатів обстеження, що є небезпечним фактором у стратегії оцінки технічного стану для визначення залишкового ресурсу з метою пролонгації терміну експлуатації.

Висновки. 1. Світовий досвід управління старінням кабелів АЕС доводить, що проведення досліджень та прогнозування терміну експлуатації ґрунтується на раціональному використанні і розвитку науково-технічного потенціалу спеціалізованих наукових та навчальних лабораторій. На державному рівні країни з ядерними установками всебічно підтримують та заохочують наукову спільноту до виконання проєктів, надають гранти у частині управління старінням, розробці нових ефективних методів моніторингу та в прове-денні досліджень щодо отримання критеріїв для визначення технічного стану кабелів АЕС.

2. Різноманітність методів контролю для оцінки електричних і механічних характеристик кабелів АЕС не забезпечує повну діагностику всіх типів кабелів та жодний окремий метод не підтверджує всі характеристики одного типу кабелів. Необхідно застосування комплексу методів для визначення механічних та електричних характеристик, що найбільш доцільно робити на «представницьких» зразках кабелів, відібраних з АЕС для досліджень у лабораторних умовах.

3. Обмеження в існуючих методах оцінки терміну служби кабелів АЕС пов'язано з недостатньою репрезентативністю прискореного старіння та неврахуванням полімерного складу ізоляції та оболонки (наприклад, наповнювачів, добавок, антиоксидантів) у моделях старіння кабелів. Необхідно багатопараметричний підхід при створенні моделей старіння ізоляції для більш точної оцінки терміну служби кабелів.

4. Існує нагальна потреба у комплексній стратегії управління старінням як безпосередньо в експлуатації, на АЕС, так і в спеціальних лабораторіях з залученням фахових досвідчених науковців-спеціалістів щодо проведення комплексних діагностичних обстежень з фізично обґрунтованим аналізом отриманих результатів на основі сучасніших технологій проведення досліджень та обробки отриманих результатів.

5. Науково-практичні дослідження та розробки кафедри щодо методів, методик та техніки можуть бути корисними при проведенні оцінки технічного стану кабелів ТЕС, при впровадженні та експлуатації модульних ядерних реакторів, тощо.

Список використаної літератури:

1. International Atomic Energy Agency. Ageing Management for Nuclear Power Plants: International Generic Ageing Lessons Learned (IGALL). Safety Reports Series. No. 82 (Rev. 1). Vienna: IAEA, 2020. 120 p.
2. Assessing and Managing Cable Ageing in Nuclear Power Plants. IAEA Nuclear Energy Series. No. NP-T-3.6. Vienna: IAEA, 2012. 111 p.
3. Cable Ageing in Nuclear Power Plants Report on the first and second terms (2012-2017) of the NEA Cable Ageing Data and Knowledge (CADAK) Project. Vienna: IAEA, 2018. 60 p.
4. Technical basis for commendable practices on ageing management. SCC and Cable Ageing Project (SCAP). Final Report. NEA/CSNI/R(2010)15, 2011. 132 p.

5. Benchmark Analysis for Condition Monitoring Test Techniques of Aged Low Voltage Cables in Nuclear Power Plants. Final Results of a Coordinated Research Project. Vienna: IAEA, 2017. 192 p.
6. Šimić Z., Peinador M. V., Banov R. Correlation between events with different safety significance in nuclear power plants. *Nuclear Engineering and Technology*. 2022. v. 54, issue 7. P. 2510-2518. <https://doi.org/10.1016/j.net.2022.01.034>
7. Alshaketheep T., Murakami K., Sekimura N., Itoi T. In search of extendable conditions for cable environmental qualification in nuclear power plants. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2016. no 53(11). P.1735–1741. <https://doi.org/10.1080/00223131.2016.1152922>
8. Santhosh T. V., Gopika V., Ghosh A. K., Fernandes B. G. An approach for reliability prediction of instrumentation & control cables by artificial neural networks and Weibull theory for probabilistic safety assessment of NPPs. *Reliability Engineering & System Safety*. 2018. vol. 170, no. 2. P. 31–44. <https://doi.org/10.1016/j.res.2017.10.010>
9. Fabiani D., Suraci S.V., Bulzaga S. Aging Investigation of Low-Voltage Cable Insulation Used in Nuclear Power Plants. *IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*. 2018. P. 516–519. <https://doi.org/10.1109/EIC.2018.8481139>
10. Banerjee S., Rouison D., Mantey A. Low frequency dielectric spectroscopy as a condition monitoring technique for low voltage cable in nuclear plants. *International Conference on Insulated Power Cables Jicable'19*. 2019.
11. Suraci S. V., Fabiani D. Aging modelling of low-voltage cables subjected to radio-chemical aging. *IEEE Access*. 2021. vol. 9. P. 83569-83578. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3086987>
12. Crosby C., Ferree C., Ellis P. Effects of Accelerated Aging Phenomena on Cable Condition Monitoring Data. *Proceedings of the 2021 ANS Winter Meeting*. 2021.
13. Ferree C. R., Ward P. R., Toll T. A. Survivability of Low-Voltage Cable Insulations in Small Modular Reactor Environments. *Proceedings of the American Nuclear Society 12th Nuclear Plant Instrumentation, Control and Human–Machine Interface Technologies (NPIC&HMIT)*. 2021.
14. Hashemian H. M., Shumaker B. D., Ledlow J. B., O'Hagan R. D., McCarter D. E. Remaining Useful Life Estimation of Electric Cables in Nuclear Power Plants. *Annual Meeting American Nuclear Society*. 2013.
15. Glass S. W., Jones A. M., Fifield L. S., Hartman T. S. Frequency domain reflectometry NDE for aging cables in nuclear power plants. *Conference: 43rd Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*. 2017. vol. 36. Art. no. 080015. <https://doi.org/10.1063/1.4974640>.
16. Шугайло О. П., Плачков Г. І., Гребенюк Ю. П., Шевченко І. А., Дибач О. М., Зелений О. В., Москалішин Р. І. Основні результати аналізу стану управління старінням атомних електростанцій в Україні. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2018. 3(79). С. 3-9.
17. Ehtasham M., Ramy S. A. Afia, Oummaima N., Zoltan A. T. Implementation of Non-Destructive Electrical Condition Monitoring Techniques on Low-Voltage Nuclear Cables: I. Irradiation Aging of EPR/CSPE Cables. *Energies*. 2021. no14(16). P. 5139. <https://doi.org/10.3390/en14165139>
18. ПМ-Д.0.03.222-14. Типовая программа по управлению старением элементов и конструкций энергоблока АЭС.
19. Беспрозванных А. В., Москвитин Е. С. Число двойных перегибов как индикатор старения кабельных бумаг. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2011. № 3. С. 62-66.
20. Беспрозванных А.В. Сильное электрическое поле и частичные разряды в многожильных кабелях. *Технічна електродинаміка*. 2010. №1. С. 23-29.
21. Беспрозванных А. В. Диэлектрическое сканирование поперечной структуры многожильных кабелей методом совокупных измерений. *Технічна електродинаміка*. 2008. № 3. С. 30 – 36.
22. Беспрозванных А. В., Рудаков С. В., Москвитин Е. С. Предотвращение чрезвычайных ситуаций путем контроля состояния изоляции многожильных кабелей по параметрам частичных емкостей и тангенсу угла диэлектрических потерь. *Монографія. Харків*. 2013. 165 с.
23. Беспрозванных Г. В., Костюков І. О., Москвітін Є. С. Розділення абсорбційних процесів в неоднорідній ізоляції за кривими відновлювальної напруги силових високовольтних кабелів. *Технічна електродинаміка*. 2021. №6, С. 13–19. <https://doi.org/10.15407/techned2021.06.013>
24. Беспрозванных А. В., Бойко А. Н. Контактная разность потенциалов – как показатель степени старения полимерной изоляции силовых кабелей. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2014. № 5. С. 62 – 67.
25. Беспрозванных А. В., Бойко А. М. Обоснование и обеспечение технологических показателей трибоэлектрического метода контроля кабелей с полимерной изоляцией. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2014. №6. С. 56 – 60.

References:

1. International Atomic Energy Agency. Ageing Management for Nuclear Power Plants: International Generic Ageing Lessons Learned (IGALL). *Safety Reports Series*. No. 82 (Rev. 1). Vienna. IAEA, 2020. 120 p.
2. Assessing and Managing Cable Ageing in Nuclear Power Plants. *IAEA Nuclear Energy Series*. No. NP-T-3.6. Vienna. IAEA, 2012. 111 p.

3. Cable Ageing in Nuclear Power Plants Report on the first and second terms (2012-2017) of the NEA Cable Ageing Data and Knowledge (CADAK) Project. Vienna. IAEA, 2018. 60 p.
4. Technical basis for commendable practices on ageing management. SCC and Cable Ageing Project (SCAP). Final Report. NEA/CSNI/R(2010)15, 2011. 132 p.
5. Benchmark Analysis for Condition Monitoring Test Techniques of Aged Low Voltage Cables in Nuclear Power Plants. Final Results of a Coordinated Research Project. Vienna. IAEA, 2017. 192 p.
6. Šimić Z., Peinador M. V., Banov R. Correlation between events with different safety significance in nuclear power plants. *Nuclear Engineering and Technology*. 2022. v. 54, issue 7. pp. 2510-2518. <https://doi.org/10.1016/j.net.2022.01.034>
7. Alshaketheep T., Murakami K., Sekimura N., Itoi T. In search of extendable conditions for cable environmental qualification in nuclear power plants. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2016. no 53(11). pp. 1735–1741. <https://doi.org/10.1080/00223131.2016.1152922>
8. Santhosh T. V., Gopika V., Ghosh A. K., Fernandes B. G. An approach for reliability prediction of instrumentation & control cables by artificial neural networks and Weibull theory for probabilistic safety assessment of NPPs. *Reliability Engineering & System Safety*. 2018. vol. 170, no. 2. pp. 31–44. <https://doi.org/10.1016/j.res.2017.10.010>
9. Fabiani D., Suraci S.V., Bulzaga S. Aging Investigation of Low-Voltage Cable Insulation Used in Nuclear Power Plants. *IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*. 2018. pp. 516–519. <https://doi.org/10.1109/EIC.2018.8481139>
10. Banerjee S., Rouison D., Mantey A. Low frequency dielectric spectroscopy as a condition monitoring technique for low voltage cable in nuclear plants. *International Conference on Insulated Power Cables Jicable'19*. 2019.
11. Suraci S. V., Fabiani D. Aging modelling of low-voltage cables subjected to radio-chemical aging. *IEEE Access*. 2021. vol. 9. pp. 83569-83578. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3086987>
12. Crosby C., Ferree C., Ellis P. Effects of Accelerated Aging Phenomena on Cable Condition Monitoring Data. *Proceedings of the 2021 ANS Winter Meeting*. 2021.
13. Ferree C. R., Ward P. R., Toll T. A. Survivability of Low-Voltage Cable Insulations in Small Modular Reactor Environments. *Proceedings of the American Nuclear Society 12th Nuclear Plant Instrumentation, Control and Human–Machine Interface Technologies (NPIC&HMIT)*. 2021.
14. Hashemian H. M., Shumaker B. D., Ledlow J. B., O'Hagan R. D., McCarter D. E. Remaining Useful Life Estimation of Electric Cables in Nuclear Power Plants. *Annual Meeting American Nuclear Society*. 2013.
15. Glass S. W., Jones A. M., Fifield L. S., Hartman T. S. Frequency domain reflectometry NDE for aging cables in nuclear power plants. *Conference: 43rd Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*. 2017. vol. 36. Art. no. 080015. <https://doi.org/10.1063/1.4974640>.
16. Shugailo A., Plachkov G., Grebenyuk Yu., Shevchenko I., Dybach O., Zeleny O., Moskalysyn R. The Main Results of Ageing Management State Analysis of Ukrainian NPPs. *Nuclear and radiation safety*. 2018. no 3(79). pp. 3-9.
17. Ehtasham M., Ramy S. A. Afia, Oummaima N., Zoltan A. T. Implementation of Non-Destructive Electrical Condition Monitoring Techniques on Low-Voltage Nuclear Cables: I. Irradiation Aging of EPR/CSPE Cables. *Energies*. 2021. no14(16). pp. 5139. <https://doi.org/10.3390/en14165139>
18. Standard Program for Ageing Management of NPP Components and Structures. *Tipovaya programma po upravleniyu stareniyem elementov i konstruktsiy energobloka AES. PM-Д.0.03.222-14*.
19. Bezprozvannykh G. V., Moskvitin E. S. Double-kink number as an indicator of degree of cable paper ageing. *Electrical engineering & electromechanics*. 2011. no 3. pp. 62-66.
20. Bezprozvannykh G. V. Strong electric field and partial discharges in multicore cables. *Technical electrodynamics*. 2010. no. 1. pp. 23-29.
21. Bezprozvannykh G. V. Dielectric scanning of the transverse structure of stranded cables by the method of cumulative measurements. *Technical electrodynamics*. 2008. no. 3. pp. 30-36.
22. Bezprozvannykh G. V., Rudakov S. V., Moskvitin E. S. Prevention of emergency situations by monitoring the state of insulation of multi-core cables according to the parameters of partial capacitances and tangent of the angle of dielectric losses. *Monograph*. Kharkiv 2013. 165 p.
23. Bezprozvannykh G. V., Kostukov I. A., Moskvitin E. S. Differentiation of absorption processes in inhomogeneous insulation by curve of recovering voltage of power high voltage cables. *Technical electrodynamics*. 2021. no. 6. pp. 13–19. <https://doi.org/10.15407/techned2021.06.013>
24. Bezprozvannykh G. V., Boyko A. N. Contact potential difference as a measure of power cable polymer insulation aging. *Electrical engineering & electromechanics*. 2014. no. 5. pp. 62 – 67.
25. Bezprozvannykh G. V., Boyko A. N. Substantiation and guaranteeing of technological parameters of triboelectrical method of monitoring of cables with polymer insulation. *Electrical engineering & electromechanics*. 2014. no. 6. pp. 56 – 60.

Надійшла до редакції 28.10.2022 р.

Zachepa Iurii, Ph.D., Associate Professor, Department of Automatic Control Systems and Electric Drive, Tel. (050)4026212; E-mail: sm261245@gmail.com

Zachepa Nataliia, Ph.D., Associate Professor, Department of Automatic Control Systems and Electric Drive, Tel. (050)4026212; E-mail: sm261245@gmail.com

Ganzevich Ivan, doctoral student PhD, Tel. (050)4026212; E-mail: sm261245@gmail.com

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, 39600, Kremenchuk, st. Pervomayskaya, 20

Shokarov Dmytro, Ph.D., Associate Professor, Department of Power Plants, Tel. (050)4026212; E-mail: sm261245@gmail.com

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" 61002, Kharkiv, st. Kyrpychova, 2

Cherkashyna Halina, Ph.D., Associate Professor, Department of Power Supply, Tel. (050)4026212; E-mail: sm261245@gmail.com

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" 03056 Kyiv Peremohy Av., 37

THE PRINCIPLES OF CREATION AND APPLICATION OF COMPUTER SIMULATORS IN THE TASKS OF ELECTRIC POWER INDUSTRY

Abstract. The work presents the structure and the necessary complex of elements that ensure the functioning of computer simulators-simulators in the tasks of electric power engineering. The organization of the system for ensuring work in the given computer simulator-simulator is proposed. On the basis of the formulated general technical requirements for simulator software, their tasks and functions, a computer simulator-simulator of an autonomous power-generating installation was developed to practice the skills of technical operation of electrical installations of consumers. Mathematical support for the formation of subprograms as independent elements capable of interacting with each other is proposed. On the basis of the formulated general technical requirements for the software of the simulator, its tasks and functions, a computer simulator of an autonomous power plant was created to form the skills of technical operation of the consumer of electrical equipment. An algorithm for software and hardware implementation of a computer simulator-simulator, identical to a real physical autonomous mini-power plant based on a diesel-generator unit, has been developed.

Keywords: virtual laboratory complexes, computer simulator, distance learning, automated learning systems.

Зачепа Юрій Володимирович, к.т.н., доцент, кафедра систем автоматичного управління і електроприводу, Тел. (050)4026212; E-mail: sm261245@gmail.com

Зачепа Наталія Василівна, к.т.н., доцент, кафедра систем автоматичного управління і електроприводу, Тел. (050)4026212; E-mail: sm261245@gmail.com

Ганзевич Іван Павлович, докторант PhD, Тел. (050)4026212; E-mail: sm261245@gmail.com, Інститут електричної інженерії та інформаційних технологій

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, 39600, м. Кременчук, вул. Першотравнева, 20

Шокарьов Дмитро Анатолійович, к.т.н., доцент, кафедра електричних станцій, Тел. (050)4026212; E-mail: sm261245@gmail.com

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2

Черкашина Галина Ігорівна, к.т.н., доцент, кафедра електропостачання, Тел. (050)4026212; E-mail: sm261245@gmail.com

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» 03056 м. Київ, проспект Перемоги, 37

ПРИНЦИПИ СТВОРЕННЯ ТА ЗАСТОСУВАННЯ КОМП'ЮТЕРНИХ ТРЕНАЖЕРІВ-ІМІТАТОРІВ В ЗАДАЧАХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ

Анотація. В роботі представлено структуру та необхідний комплекс елементів, що забезпечують функціонування комп'ютерних тренажерів-імітаторів в задачах електроенергетики. Запропоновано організацію системи забезпечення роботи в наведеному комп'ютерному тренажер-імітаторі. На основі сформульованих загальнотехнічних вимог, що висуваються до тренажерних програмних засобів, їх задач і функцій, для відпрацювання навичок технічної експлуатації електроустановок споживачів розроблено комп'ютерний тренажер-імітатор автономної енергогенеруючої установки. Запропоновано математичне

забезпечення формуванні підпрограм як самостійних елементів, здатних взаємодіяти між собою. На основі сформульованих загальних технічних вимог до програмного забезпечення тренажера, його завдань і функцій створено комп'ютерний тренажер автономної електростанції для формування навичок технічної експлуатації споживача електроустаткування. Розроблено алгоритм програмно-апаратної реалізації комп'ютерного тренажера-імітатора, тотожного реальній фізичній автономній мініелектростанції на базі дизель-генераторної установки.

Ключові слова: віртуальні лабораторні комплекси, комп'ютерний тренажер-імітатор, дистанційне навчання, автоматизовані навчальні системи.

Зачепа Юрій Владимирович, к.т.н., доцент, кафедра систем автоматического управления и электропривода, Тел. (050) 4026212; E-mail: sm261245@gmail.com

Зачепа Наталья Васильевна, к.т.н., доцент, кафедра систем автоматического управления и электропривода, Тел. (050) 4026212; E-mail: sm261245@gmail.com

Ганзевич Иван Павлович, докторант PhD, Тел. (050) 4026212; E-mail: sm261245@gmail.com, Институт электрической инженерии и информационных технологий

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, 39600, г. Кременчуг, ул. Первомайская, 20

Шокарев Дмитрий Анатольевич, к.т.н., доцент, кафедра электрических станций, Тел. (050) 4026212; E-mail: sm261245@gmail.com

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт" 61002, г. Харьков, ул. Кирпичева, 2

Черкашина Галина Игоревна, к.т.н., доцент, кафедра электроснабжения, Тел. (050) 4026212; E-mail: sm261245@gmail.com

Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского" 03056 г. Киев, проспект Победы, 37

ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТРЕНАЖЕРЕЙ-ИМИТАТОРОВ В ЗАДАЧАХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

Аннотация. В работе представлена структура и необходимый комплекс элементов, обеспечивающих функционирование компьютерных тренажеров-имитаторов в задачах электроэнергетики. Предложена организация системы обеспечения работы в приведенном компьютерном тренажер-имитаторе. На основе сформулированных общетехнических требований, предъявляемых к тренажерным программным средствам, их задачам и функциям, для отработки навыков технической эксплуатации электроустановок потребителей разработан компьютерный тренажер-имитатор автономной энергогенерирующей установки. Предложено математическое обеспечение в формировании подпрограмм как самостоятельных элементов, способных взаимодействовать между собой. На основе сформулированных общих технических требований к программному обеспечению тренажера, его задачам и функциям создан компьютерный тренажер автономной электростанции для формирования навыков технической эксплуатации потребителя электрооборудования. Разработан алгоритм программно-аппаратной реализации компьютерного тренажера-имитатора, тождественного реальной физической автономной миниэлектростанции на базе дизель-генераторной установки.

Ключевые слова: виртуальные лабораторные комплексы, компьютерный тренажер-имитатор, дистанционное обучение, автоматизированные обучающие системы.

Introduction. Electric power industry is among the sectors of the national economy, in which the need for highly qualified specialists with practical experience is especially acute. The modern realities, the pandemic and the war imposed certain restrictions on the practical training of highly qualified specialists in the electricity industry of Ukraine. Moreover, it can be added that when performing a number of technological operations, the workers are forced to be in constant contact with working electrical equipment, which determines the high level of injuries

Results and Discussions. Currently, one of the effective directions for improving the efficiency of the process of offline training of specialists in the specialty 141 «Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics» are automated training systems (ATS) [1]. The most effective technical means of working out the safe and remote labor techniques is a computer simulator based on multimedia computer programs, which simulates real working conditions (specific operations of the technological process) [2] and implements a physical and functional model of the human-machine-production environment system, its interaction with the subject of work and the technological process.

Research materials. The general requirements for a computer simulator software [3]. The computer simulator should include the necessary set of elements in its structure that ensure its functioning. The composition of the simulator is shown in fig. 1.

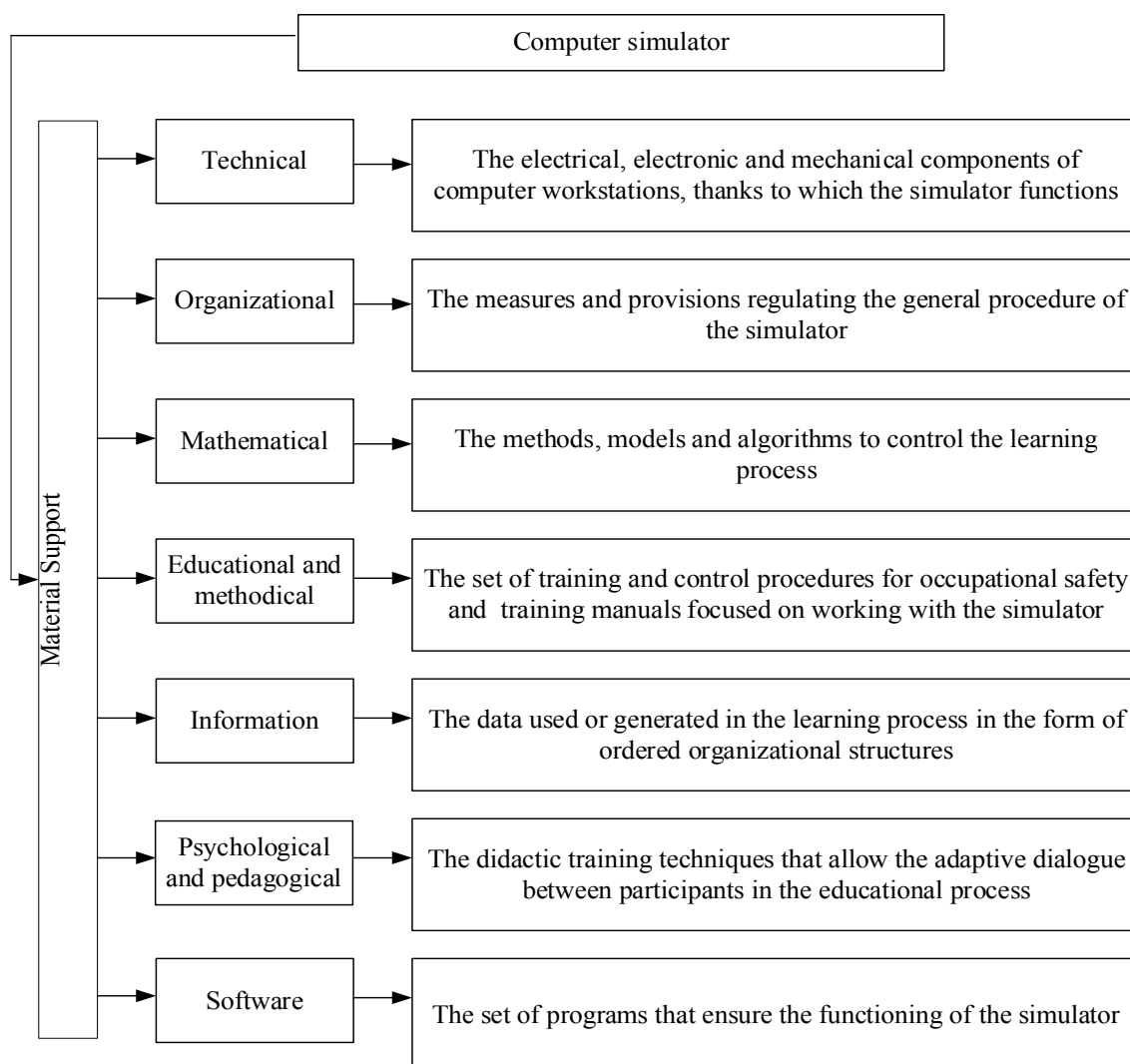


Fig. 1. Composition of computer simulator

The basis of the organization of the system for ensuring work in the given CS (Computer Simulator) is the block principle of building a mathematical support [4, 5], which consists in the formation of subroutines as independent elements capable of interacting with each other under the control of the organizing program. Such an aggregate principle of construction allows us to propose a systematic approach to ensure the proper level of healthy and safe working conditions for workers of different professions, to increase mathematical support, to create libraries of ready-made elements of the technological process [6], to configure CS on the development of various kinds of skills (speed of decision-making in a particular situation, working out a clear sequence of actions or operations in both regular and abnormal modes, etc.).

The following construction principles were used when creating the CS:

- the principle of conformity of the structure of skills formed with the help of a computer simulator with the structure of real labor skills in the execution of technological process operations, which means the simulation of the professional activity of the worker is fully carried out;
- the principle of target training, for which the main purpose of using the simulator is not to acquire knowledge, but to master the skills of safe performance of work;
- the principle of the active approach, which means that the computer simulator is necessary for the training of workers who need the skills of real production work.

The use of CS for the training of specialists in both the electric power industry and specialists in other industries allows: to improve the quality of training of employees from the electric power industry, to reduce the cost of professional training by reducing its terms, to conduct training in safe conditions, to increase the degree of objectivity of assessment of qualification of employees undergoing training (their knowledge and skills) due to the maximum realism of the task [7].

Therefore, based on the peculiarities of the activity, when preparing employees from the electric power industry, it is advisable to use CS as an addition to the adopted training system and form the basis of a systematic approach of training for ensuring the safe working conditions during technological operations [8, 9]. The ATS software for ensuring safe labor methods includes the corresponding software modules (Fig. 2.)

These software modules ensure compliance with all the requirements for CS and functions, as well as provide a full (network) version of the software. To implement this option, you need to have a local network. In this case, all data are stored on the central (server) PC. There should also be Module_2 and Module_3. There are interactive training modules - Module_1 on the workstations.

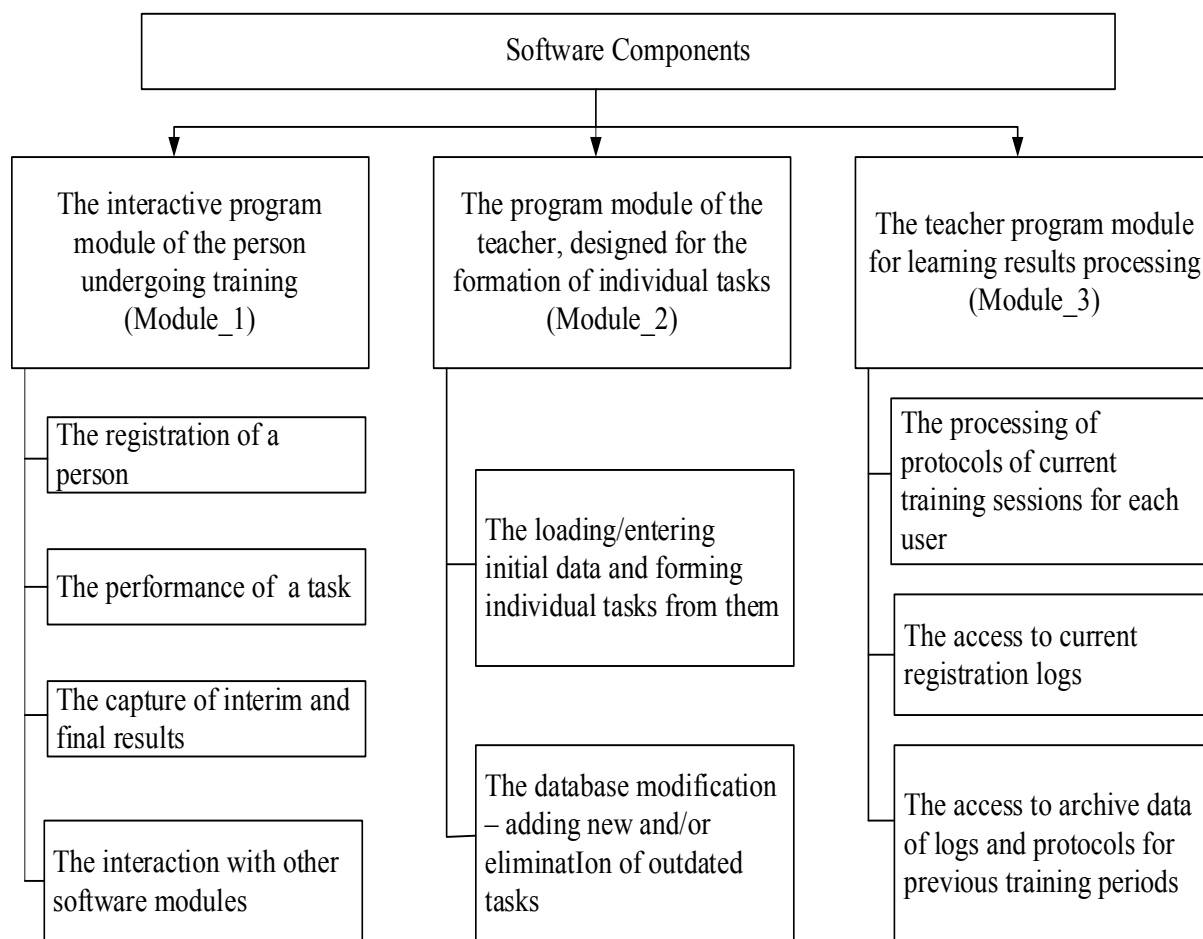


Fig. 2. Composition of CS software

The implementation of software and hardware part of computer simulator on the example of an autonomous power generating unit.

A real power generating plant compared to CS has a higher cost, more complex internal structure and voluminous technical documentation. This kind of equipment is difficult to upgrade and change the technical characteristics and purpose. Therefore, in order to train specialists in the development of safe work performance during production, increase labor productivity, prevent injuries, study of energy processes in autonomous power generating units (APG) based on diesel generator units (DGU) with an asynchronous generator (AG), CS was developed [10, 11]. In addition, the created simulator allows you to simulate different operating modes, change and test different characteristics of the equipment, analyze the factors of emergencies, etc.

The front panel of CS is shown in Figures 3 (a , b).

The basis of the organization of the labor support system in the given CS is a block principle of building mathematical support, lies in the formation of subroutines as the independent elements capable of interacting with each other under the control of the organizing program.

Such an aggregate principle of construction allows to provide an integrated approach to the professional training of workers from the electric power industry, to increase mathematical support, to create libraries of ready-made elements of the technological process, to set up CS for practicing various kinds of skills (speed of decision-making in a particular situation, working out a clear sequence of actions or operations, etc.).

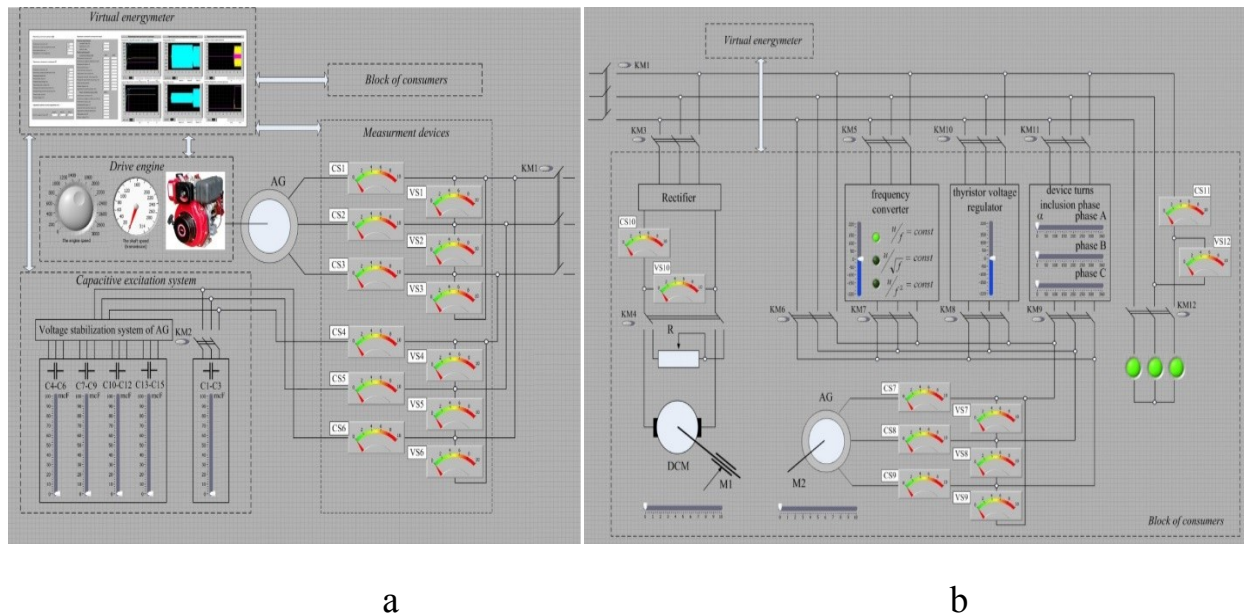


Fig. 3. CS front panel: typical power consumers

CS consists of the following main units:

- the "drive engine" unit - diesel internal combustion engine;
- the "electric energy converter" unit - asynchronous generator with capacitive excitation and stabilization systems of output voltage AG;
- the "consumers of electric energy" unit - includes AC consumers, both single-phase and three-phase. Thanks to the rectifier, the ability to connect DC consumers is realized;
- the "instrumentation" unit- contains current and voltage sensors, speed, torque, etc. These blocks form the basis of the interactive program module of the person undergoing training (Fig. 2, Module_1);
- the "virtual meter" unit - power signals are generated, then energy processes running in the system are determined with corresponding real-time implementation of all processes. The unit is also supplemented with an operator action retainer, which allows implementing various programs (Fig. 2, Module_2) for practicing the skills of safe execution of technological operations.

In addition to using the proposed virtual complexes in the educational process for the independent work of students and remote laboratory work, it is also possible to implement them in industry and in the field of scientific research. The

creation of mobile virtual complexes is especially interesting since it allows you to conduct the necessary research directly in the conditions of production, quickly receive and process the results of modeling and form the recommendations for improving the quality of management and the efficiency of using real equipment. The introduction of the developed systems in industrial enterprises is preceded by extensive research work. In this case, the developed CSs allow you to study the static and dynamic modes of operation of technological equipment visually, the study of its effective modes of operation.

Conclusion. The use of computer simulators is proposed to develop the skills for the training of specialists of the electrical profile and the implementation of technological operations.

On the basis of the formulated general technical requirements for the simulator software, their tasks and functions, a computer simulator of an autonomous power generating plant has been created to develop the skills of technical operation of the consumer of electrical equipment.

The algorithm for software and hardware implementation of a computer simulator, identical to a real physical autonomous mini-power plant based on a diesel-generator plant, has been developed.

The developed CS allows to solve a number of research problems: the analysis of technological capabilities and energy indicators of various methods of regulating technological parameters; the study of dynamic processes in the generator-motor system; the determination of regulatory and energy characteristics of systems, etc.

Список літератури:

1. Chorny A. P., Zagirnyak M. V., Gurzhiy A. M., Sergienko S. A., Rodkin D. Y. Improving the quality of training of specialists based on virtual laboratory complexes. Tutorial. Kremenichug: Mykhailo Ostrohradskyi KrNU, 2017. 198 p.
2. Chorny O. P., Artemenko A. M., Rodkin D. Y., Zazha Yu. V., Sergienko S. A., Tityuk V. K., Kravets O. M. Electric drive theory. Laboratory workshop with virtual laboratory stands. Tutorial. Kremenichug: PE Shcherbatikh O. V., 2020. 104 p.
3. Shahri A.M. Advanced control e-laboratory (ACeL) based on virtual instrumentation. CCECE 2003 - Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Toward a Caring and Humane Technology (Cat. No.03CH37436), 2003, vol.1, P. 1-4, doi: 10.1109/CCECE.2003.1226330.
4. Alexeychik L. V., Zhokhova M. P., Mikheev D. V. and Karpunina M. V. Electrotechnical Laboratory: From Physical Experiment to Virtual Scenario. 2018 IV International Conference on Information Technologies in Engineering Education (Inforino), 2018, P. 1-4, doi: 10.1109/INFORINO.2018.8581853.
5. Broisin J., Venant R. and Vidal P. A remote laboratory to leverage motivation of learners to practice: An exploratory study about system administration. Proceedings of 2015 12th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV), 2015, P. 140-142, doi: 10.1109/REV.2015.7087280.
6. Gillet D., De Jong T., Sotiropoulos S. and Salzmann C. Personalised Learning Spaces and Federated Online Labs for STEM Education at School: Supporting Teacher Communities and Inquiry Learning. In Proceedings of 2013 IEEE Global Engineering Education Conference, 2013. P. 769-773.
7. San Cristobal E., Castro M., Harward J., Baley P., DeLong K. and Hardison J. Integration view of Web Labs and Learning Management Systems. In Proceedings of 2010 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON), 2010. P. 1409-1417.

8. Harward V. J., del Alamo J. A., Lerman S. R., Bailey P. H., Carpenter J., DeLong K., et al. The iLab Shared Architecture: A Web Services Infrastructure to Build Communities of Internet Accessible Laboratories. *Proceedings of the IEEE*, 2008. vol. 96, no. 6, P. 931-950.
9. Zhokhova M. P., Krayushkin V. V. and Lesnikov G. I. Virtualization of the educational electrotechnical laboratory. *International Scientific and Methodical Conference INFORINO 2012*, P. 291-293.
10. Zacheпа N. Susik D., Zacheпа Iu. Measuring indicators of energy processes in the asynchronous generator on the basis of the virtual model in the LABVIEW software. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи: щоквартальний науково-виробничий журнал. Кременчук, 2017. Вип. 2 (38). С. 26–32.*
11. Zacheпа Yu. V., Zacheпа N. V., Sergienko S. A. Software and logic complex for the study of diesel generator units with asynchronous generators. *Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute."* Kharkiv: NTU "KhPI," 2015. No. 12 (1121). P. 330–333.

References:

1. Chorny A. P., Zagirnyak M. V., Gurzhiy A. M., Sergienko S. A., Rodkin D. Y. Improving the quality of training of specialists based on virtual laboratory complexes. *Tutorial. Kremenichug. Mykhailo Ostrohradskyi KrNU*, 2017. 198 p.
2. Chorny O. P., Artemenko A. M., Rodkin D. Y., Zazha Yu. V., Sergienko S. A., Tityuk V. K., Kravets O. M. Electric drive theory. Laboratory workshop with virtual laboratory stands. *Tutorial. Kremenichug. PE Shcherbatikh O. V*, 2020. 104 p.
3. Shahri A.M. Advanced control e-laboratory (ACeL) based on virtual instrumentation. *CCECE 2003 - Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Toward a Caring and Humane Technology (Cat. No.03CH37436)*, 2003, vol.1, pp. 1-4, doi: 10.1109/CCECE.2003.1226330.
4. Alexeychik L. V., Zhokhova M. P., Mikhhev D. V. and Karpunina M. V. Electrotechnical Laboratory: From Physical Experiment to Virtual Scenario. *2018 IV International Conference on Information Technologies in Engineering Education (Inforino)*, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/INFORINO.2018.8581853.
5. Broisin J., Venant R. and Vidal P. A remote laboratory to leverage motivation of learners to practice: An exploratory study about system administration. *Proceedings of 2015 12th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV)*, 2015, pp. 140-142, doi: 10.1109/REV.2015.7087280.
6. Gillet D., De Jong T., Sotirou S. and Salzmann C. Personalised Learning Spaces and Federated Online Labs for STEM Education at School: Supporting Teacher Communities and Inquiry Learning. In *Proceedings of 2013 IEEE Global Engineering Education Conference*, 2013. pp. 769-773.
7. Sancristobal E., Castro M., Harward J., Baley P., DeLong K. and Hardison J. Integration view of Web Labs and Learning Management Systems. In *Proceedings of 2010 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*, 2010. pp. 1409-1417.
8. Harward V. J., del Alamo J. A., Lerman S. R., Bailey P. H., Carpenter J., DeLong K., et al. The iLab Shared Architecture: A Web Services Infrastructure to Build Communities of Internet Accessible Laboratories. *Proceedings of the IEEE*, 2008. vol. 96, no. 6, pp. 931-950.
9. Zhokhova M. P., Krayushkin V. V. and Lesnikov G. I. Virtualization of the educational electrotechnical laboratory. *International Scientific and Methodical Conference INFORINO 2012*, pp. 291-293.
10. Zacheпа N. Susik D., Zacheпа Iu. Measuring indicators of energy processes in the asynchronous generator on the basis of the virtual model in the LABVIEW software. *Electromechanical and energy-saving systems: a quarterly scientific and industrial journal. Kremenichuk. 2017. Vyp. 2 (38). pp. 26–32.*
11. Zacheпа Yu. V., Zacheпа N. V., Sergienko S. A. Software and logic complex for the study of diesel generator units with asynchronous generators. *Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute."* Kharkiv: NTU "KhPI," 2015. No. 12 (1121). pp. 330–333.

Стаття надійшла до редакції 25.06.2022р.

Коваленко Юрій Леонідович, к.т.н, доцент, E-mail: kovalenkoy55@gmail.com.

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, вул. Маршала Бажанова 17, Харків, Україна, 61002.

Тарасенко Микола Олексійович, к.т.н, професор, E-mail: tarasenkoni52@gmail.com.

Тарасенко Олександр Миколайович, к.т.н, доцент, E-mail: Oleksandr.Tarasenko@khpi.edu.ua

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ СИСТЕМ КОМУНАЛЬНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

Анотація. В статті показано, що для вибору раціональних схем теплопостачання необхідно враховувати не лише економічні фактори, а проводити багатопараметричний аналіз. Актуальність проблеми особливо зросла у зв'язку з високою вартістю та дефіцитом традиційних видів палива (вугілля, газу), що привело до застосування альтернативних джерел енергії в системах теплопостачання. В роботі розглянуто варіанти енергоносіїв та відповідні конструктивні схеми опалювальних систем, що найчастіше застосовуються для житлових будинків. Виконана їхня порівняльна оцінка та зіставлення наведених значень вартості одиниці теплової енергії. Досліджено особливості впливу на довкілля джерел теплопостачання, що використовують різні види палива. Визначено вартість одиниці одержаної енергії та питомі викиди забруднюючих речовин, які наведені до викидів монооксиду вуглецю. Виконано порівняльну оцінку питомих викидів, для теплогенеруючих пристроїв, що працюють на природному газі, кам'яному вугіллі, дровах та пелетах. Оцінку проведено за їх середніми показниками. На підставі еколого - економічної оцінки запропоновано рекомендації щодо вибору джерела теплопостачання.

Ключові слова: енергоефективність, теплопостачання, вартість енергоносіїв, альтернативне паливо, тарифи, шкідливі викиди, екологія.

Kovalenko Yuriy, Ph.D., associate professor, E-mail: kovalenkoy55@gmail.com.

O.M.Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Marshal Bazhanov st. 17, Kharkiv, Ukraine, 61002.

Tarasenko Mykola, Ph. D., Professor, E-mail: tarasenkoni52@gmail.com.

Tarasenko Oleksandr, Ph.D., associate professor, E-mail: Oleksandr.Tarasenko@khpi.edu.ua

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute, Kirpichova st. 2, Kharkiv, Ukraine, 61002.

STUDY ECOLOGICAL AND ECONOMIC INDICATORS OF MUNICIPAL HEAT SUPPLY SYSTEMS

Abstract. The article shows that for the selection of rational heat supply schemes, it is necessary to take into account not only economic factors, but also conduct a multiparametric analysis. The urgency of the problem has especially increased due to the high cost and shortage of traditional fuels (coal, gas), which has led to the use of alternative energy sources in heat supply systems. In the paper, options for energy carriers and corresponding design schemes of heating systems, most often used for residential buildings, are considered. Their comparative evaluation and comparison of the given values of the cost of a unit of thermal energy was made. The peculiarities of the environmental impact of heat supply sources using different types of fuel are investigated. The cost of a unit of energy and the specific emissions of pollutants related to carbon monoxide emissions are determined. A comparative assessment of specific emissions for heat-generating devices operating on natural gas, coal, firewood, and pellets has been performed. The evaluation is based on their average indicators. Recommendations for choosing a heat supply source are offered on the basis of an ecological and economic assessment.

Keywords: energy efficiency, heat supply, cost of energy carriers, alternative fuel, tariffs, harmful emissions, ecology.

Коваленко Юрій Леонідович, к.т.н, доцент, e-mail: kovalenkoy55@gmail.com.

Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А. Н. Бекетова, ул. Маршала Бажанова 17, Харьков, Украина, 61002.

Тарасенко Микола Олексійович, к.т.н, професор, e-mail: tarasenkoni52@gmail.com.

Тарасенко Олександр Миколайович, к.т.н, доцент, e-mail: Oleksandr.Tarasenko@khpri.edu.ua.

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт», ул. Кирпичова, 2, Харьков, Украина, 61002.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СИСТЕМ КОММУНАЛЬНОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Аннотация. В статье показано, что для выбора рациональных схем теплоснабжения необходимо учитывать не только экономические факторы, но и проводить многопараметрический анализ. Актуальность проблемы особенно возросла из-за высокой стоимости и дефицита традиционных видов топлива (угля, газа), что привело к применению альтернативных источников энергии в системах теплоснабжения. В работе рассмотрены варианты энергоносителей и соответствующие конструктивные схемы отопительных систем, наиболее часто применяемые для жилых домов. Произведена их сравнительная оценка и сопоставление приведенных значений стоимости единицы тепловой энергии. Исследованы особенности воздействия на окружающую среду источников теплоснабжения, использующих различные виды топлива. Определены стоимость единицы энергии и удельные выбросы загрязняющих веществ, приведенные к выбросам монооксида углерода. Выполнена сравнительная оценка удельных выбросов, для теплогенерирующих устройств, работающих на природном газе, каменном угле, дровах и пеллетах. Оценка проведена по их средним показателям. На основании эколого - экономической оценки предложены рекомендации по выбору источника теплоснабжения.

Ключевые слова: энергоэффективность, теплоснабжение, стоимость энергоносителей, альтернативное топливо, тарифы, вредные выбросы, экология.

Актуальність теми дослідження. Сучасний стан теплоенергетики України, характеризується високою вартістю теплоносіїв та дефіцитом традиційних видів палива, таких як природний газ та вугілля. Тому питання раціонального використання паливно-енергетичних ресурсів в системах теплопостачання є особливо актуальним [1–4]. Також велика увага приділяється зменшенню шкідливих викидів в навколишнє середовище [5–7]. Особливо це стосується підприємств комунального теплопостачання, які розташовані в межах населених пунктів.

В процесі проектування та будівництва будівель важливим є питання вибору схеми його теплопостачання. Насамперед береться до уваги вартість прокладання інженерних мереж для подачі відповідного енергоносія, придбання та монтажу теплогенеруючого обладнання, витрати на його експлуатацію. Для вибору більш раціональних схем теплопостачання необхідно брати до уваги результати порівняльної економічної та екологічної оцінки енергоносіїв, що застосовуються для теплопостачання житлових будинків.

Постановка задачі. Розглянемо системи теплопостачання, які використовують різні види палива. Теплотворна здатність багатокomпонентних горючих речовин залежить від їх складу, вологості та багатьох інших факторів. До таких речовин належить природний газ, кам'яне

вугілля, дрова, пелети, нафтопродукти. Кожен із цих джерел теплової енергії має як переваги, так і недоліки.

Для кожного палива теплотворна здатність може бути визначена за формулами з використанням вихідних даних хімічного складу речовини.

Крім того, теплотворна здатність більшості видів палива залежить від його вологості, умов зберігання, технології підготовки до спалювання та інших факторів [2,3].

Вартість енергоносіїв у ході досліджень приймалася станом на 1 лютого 2023 р., виходячи з тарифів енергопостачальних підприємств, роздрібних цін торгових організацій, що працюють на території України і у Харківській області.

Вартість електроенергії для населення за її місячного споживання до 250 кВт·год становить 1,44 грн/кВт·год, за весь обсяг спожитої електроенергії понад 250 кВт·год – 1,68 грн/1 кВт·год.

Для абонентів житлових будинків із будинковими та квартирними приладами обліку теплової енергії тариф на послуги з централізованого опалення становить 1748,47 грн/Гкал.

Роздрібні ціни на природний газ для населення приватних домоволодінь у Харківській області становлять у середньому з урахуванням доставки 10,5 грн/м³. Середня теплотворна здатність газу становить 31,8 МДж/м³. Значення коефіцієнта корисної дії популярних моделей котлів становить близько 90 %.

Для вугілля марки ДГ 13-100 (сортний) теплотворна здатність становить 25,5 МДж/кг або 6100 ккал/кг. Середня вартість вугілля (з урахуванням доставки) – 11000 грн/т.

Для пелет із лушпиння соняшника теплотворна здатність складає 17,5 МДж/кг або 4200 ккал/кг. Середня вартість таких пелет становить – 6500 грн/т. Ціна пелетів з деревини складає від 5500 до 10900 грн/т.

Для дубових дров, при атмосферному сушінні та вологості 20 %, теплотворна здатність складає 15,2 МДж/кг. Середня вартість складометра дров (з урахуванням доставки) 1500 грн/м³ (методом складування "один на один"). Середня щільність складованих дубових дров приймалася 514 кг/м³. Значення коефіцієнта корисної дії найкращих зразків твердопаливних котлів досягає 85 % [2,3].

Вплив на довкілля у місці дислокації опалювального пристрою під час використання різних типів палива можна оцінити наступним чином. Застосування теплоносія із мереж централізованого теплопостачання та електроенергії практично не призводить до впливу на навколишнє середовище в місці дислокації опалювального приміщення. Викиди від електростанцій та пікових котелень здійснюються, як правило, за межами житлових територій, на об'єктах, що застосовують технології мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище та

відгороджених від житлової забудови відповідними санітарно-захисними зонами [7,8].

Емісія забруднюючих атмосферу речовин залежить від технологічних та конструктивних особливостей теплогенеруючого пристрою, виду та якості палива, особливостей організації процесу спалювання та відведення димових газів.

Специфічний показник емісії визначається шляхом проведення інструментальних досліджень для кожної конкретної теплогенеруючої установки з урахуванням індивідуальних характеристик палива, конкретних характеристик процесу спалювання та заходів щодо зниження викиду забруднюючих речовин.

Враховуючи різноманітність конструктивних та технологічних особливостей обладнання, індивідуальних характеристик палива, для порівняльної оцінки доцільно використовувати значення узагальнених показників (питомих викидів).

Узагальнені показники емісії (питомі викиди) основних речовин, що забруднюють атмосферу від тепло генеруючих пристроїв, що працюють на природному газі, кам'яному вугіллі, дровах, пелетах можна визначити, використовуючи відкриті джерела інформації [7–11].

Результати досліджень. Розглянемо варіанти енергоносіїв та відповідні конструктивні схеми опалювальних систем, що найчастіше застосовуються для житлових будинків.

1. Будинок підключений до мереж центрального тепlopостачання (наприклад розглянемо варіант КП «Харківські теплові мережі») та обладнаний системою водяного опалення.

2. Будинок підключений до мереж електропостачання, що забезпечує можливість підключення різних електронагрівальних приладів: електрорадіаторів, електроконвекторів, інфрачервоних нагрівачів і електрокотлів із системою водяного опалення.

3. Будинок підключений до мереж природного газу (для прикладу розглянемо варіант: газорозподільна компанія – ПАТ «Харківміськгаз», газопостачальна компанія: ТОВ «Харківгаз збут»). Будинок обладнаний газовим котлом з системою водяного опалення або газовим конвектором.

4. Будинок обладнаний твердопаливним котлом та системою водяного опалення. Як паливо можливе використання кам'яного вугілля, пелет або дров.

В якості критерія оцінювання будемо використовувати вартість 1 МДж тепла, що надходить до будівлі. Також, у ході проведення порівняльної оцінки, будемо зіставляти питому емісію забруднюючих речовин у навколишнє середовище у місці дислокації об'єкта тепlopостачання, наведену до 1 МДж тепла.

Вихідні дані та результати розрахунку наведених значень вартості одиниці теплової енергії, отриманої для обігріву будівлі представлені в таблиці 1.

На практиці, як впливає з аналізу наведених джерел інформації, вартість основних видів енергоносіїв не прив'язана до одиниці тепла, яке вони містять, а виражається у вартості одиниці, що легко піддається виміру – кубічного метра, тонни, кВт·год.

Нас же цікавить вартість одиниці тепла, яке енергоносієм постачає до будинку, з урахуванням втрат та непродуктивних витрат у теплогенеруючому обладнанні.

У ході роботи виконані розрахунки вартості одиниці (якою обрано 1 МДж) тепла, що надходить безпосередньо в опалювальне приміщення.

У роботі використано середні значення теплотворної здатності палива, коефіцієнтів корисної дії теплогенеруючого обладнання.

Зіставлення наведених значень вартості одиниці теплової енергії дозволив встановити, що мінімальна вартість одиниці тепла досягається при спалюванні дров.

З іншого боку, використання твердого палива з мінімальною вартістю одиниці тепла призводить до додаткових, значних трудовитрат, пов'язаних з доставкою палива, організацією його зберігання, необхідністю регулярного завантаження топки котла і видалення твердих залишків продуктів згоряння.

Найкомфортніше і найменш трудомістке користування послугами центрального тепlopостачання, а у разі локального опалення використовувати електричний або газовий обігрів.

Найдорожче коштує тепло, одержане при використанні електроенергії та вугілля.

Одиниця тепла, отримана від використання електроенергії при двозонному тарифі, обходиться в 1,26 рази дорожче, ніж одиниця тепла, отримана при спалюванні природного газу. Найбільш дешевим паливом залишаються дрова, проте слід врахувати, що за останній рік вартість дров зросла майже вдвічі.

Зіставимо емісію забруднюючих речовин у навколишнє середовище в місці дислокації об'єкта тепlopостачання, наведену до 1 МДж тепла.

Обладнання, що застосовується для тепlopостачання, технології спалювання, якість палива може істотно відрізнятися, і, відповідно, відрізняються значення питомих шкідливих викидів, наведених в [7–11].

Тому для порівняльної оцінки застосуємо узагальнений показник емісії забруднюючої речовини, який є середньою питомою величиною викиду та не враховує особливостей хімічного складу палива.

Порівняльна оцінка питомих викидів, за середніми показниками питомих викидів, для котлів, що працюють на природному газі, кам'яному вугіллі, дровах, пелетах наведено в таблиці 2.

Таблиця 1

Вихідні дані та результати розрахунку наведених значень вартості одиниці теплової енергії, що надійшла для обігріву будівлі

№ п/п	Найменування, одиниця виміру енергоносія	Вартість	Теплотворна здатність	Вартість одиниці виробленої енергії	Тепловий ККД, %	Вартість одиниці одержаної енергії
1	Електроенергія, кВт·год (якщо є тільки електрообігрів)	1,68 грн / кВт·год	3,6 МДж/кВт·год	0,467 грн/МДж	100	0,467 грн/МДж
2	Електроенергія за двозонними тарифами, диференційованими за періодами години	1,4 грн / кВт·год	3,6 МДж/кВт·год	0,389 грн/МДж	100	0,389 грн/МДж
3	Теплоносій міських теплових мереж, Гкал	1748,47 грн./Гкал	4 190 МДж/гкал	0,417 грн/МДж	100	0,417 грн/МДж
4	Природний газ, м ³	10,50 грн/м ³	31,5 МДж/м ³	0,333 грн/МДж	90	0,37 грн/МДж
5	Вугілля кам'яне, т	11000 грн/т	25,5 МДж/кг	0,431 грн/МДж	85	0,507 грн/МДж
6	Пелети, т	6500 грн/т	17,5 МДж/кг	0,371 грн/МДж	85	0,437 грн/МДж
7	Дрова, м ³	2918 грн/т	15,2 МДж/кг	0,192 грн/МДж	85	0,226 грн/МДж

Таблиця 2

Питомі викиди котлів

№ п/п	Найменування палива	Питомі викиди, г/ГДж			
		Зважені тверді частки	CO	NO _x	SO ₂
1	Природний газ	-	249	64	-
2	Вугілля кам'яне	2310	1870	101	251
3	Дрова	152	4000	43	80
4	Пелети	145	1930	64	76

Виходячи з результатів аналізу виконаних розрахунків, з точки зору несприятливого впливу на навколишнє середовище в місці дислокації об'єкта, що опалюється, найбільший інтерес для опалення індивідуального

житлового будинку представляє центральне тепlopостачання, електроопалення і газове опалення.

Для проведення порівняльної оцінки негативного впливу продуктів згоряння використано відносний показник питомих викидів, наведених до викидів монооксиду вуглецю, прийнятого як «еталон» [7,8].

З урахуванням значень середньодобових гранично-допустимих концентрацій в атмосферному повітрі населених пунктів визначено відносні показники питомих викидів, наведених до викидів монооксиду вуглецю (таблиця 3).

Таблиця 3

Відносні питомі викиди котлів, наведені до викидів
монооксиду вуглецю

№ п/п	Найменування палива	Відносні питомі викиди, г/ГДж
1	Природний газ	3 350
2	Вугілля	370 000
3	Дрова	33 800
4	Пелети	31 400

Загалом, за результатами комплексної порівняльної оцінки найбільший інтерес становлять схеми тепlopостачання, коли будинок підключений до мереж електропостачання, що забезпечує можливість підключення електроопалювальних установок та коли будинок підключений до мереж природного газу, та обладнаний газовим теплогенеруючим обладнанням.

Одиниця тепла, отриманого в результаті використання електроенергії, коштує трохи дорожче, ніж при спалюванні природного газу. З іншого боку, при використанні електроенергії емісія забруднюючих речовин у навколишнє середовище в місці дислокації об'єкта тепlopостачання відсутня, а при використанні природного газу мають місце деякі викиди забруднюючих речовин, хоча за кількісною оцінкою значно менші, ніж при застосуванні твердих видів палива.

Висновки. Визначено та проаналізовано вартість одиниці отриманої енергії та питомі викиди, при застосуванні різних схем опалення та видів палива, які можуть бути додатковими критеріями для вибору схеми тепlopостачання будівель в осінньо-зимовий опалювальний сезон. Аналіз виконаних розрахунків показав, що для опалення індивідуального житлового будинку найбільш ефективним є використання газового опалення та електроопалення при використанні двозонного тарифу, з підвищенням споживання електроенергії вночі.

Запропоновано критерій оцінки оптимального, з погляду мінімальної вартості одиниці одержаної енергії та кількості, теплоносія, що дозволяє для

кожного населеного пункту з урахуванням особливостей місцевої тарифної політики ринку енергоносіїв, кліматичних особливостей, наявності інженерних мереж проводити обґрунтований вибір схеми теплопостачання житлових та промислових приміщень.

Список використаної літератури:

1. Енергетична стратегія України на період до 2030 року. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 року N 1071.
2. Плачкова С. Г. Энергетика. История, настоящее и будущее. Книга 3. Развитие теплоэнергетики и гидроэнергетик]. URL: <http://energetika.in.ua/ru/books/book-3>.
3. Альтернативні палива та інші нетрадиційні джерела енергії / О. Адаменко, В. Височанський, В. Лютко, М. Михайлов. Під ред. докт. техн. наук, проф. В. Лютко. Підручник для енергетичних і екологічних спеціальностей вищих навчальних закладів. Івано-Франківськ, "Полум'я", 2000. 225 с.
4. Ратушняк Г. С., Попова Г. С. Энергозбереження та експлуатація систем теплопостачання. Навчальний посібник. Вінниця: ВДТУ, 2002. 120 с.
5. Енергетика, довкілля, енергозбереження. Під заг. ред. проф. В.А. Маляренко. Х.: Рубікон, 2004. 368 с.
6. Boyle R., Greenwood Ch., Hohler A. etc. Global Trends in Sustainable Energy Investment 2008. Analysis of Trends and Issues in the Financing of Renewable Energy and Energy Efficiency. United Nations Environment Programme and New Energy Finance Ltd, 2008. 295 p.
7. Викиди забруднюючих речовин в атмосферу від енергетичних установок. Методика визначення. ГКД 34.02.305-2002. Київ, 2002. 41 с.
8. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. Будівельна кліматологія. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. 123 с.
9. Інформаційний сайт «Coefficient of perfomence». URL: <https://learnmetrics.com/coefficient-of-performance/>.
10. Інформаційний сайт «Coefficient of perfomence». URL: <https://www.nuclear-power.net/nuclear-engineering/thermodynamics/thermodynamic-cycles/heating-and-air-conditioning/coefficient-of-performance-cop-refrigerator-air-conditioner/>.
11. Інформаційний сайт «Coefficient of perfomence». URL: <https://www.adams-air.com/houston/what-is-COP.php>.

References:

1. Enerhetychna stratehiya Ukrayiny na period do 2030 roku [The Energy Strategy of Ukraine for the Period till 2030]. Rozporyadzhennya Kabinetu Ministriv Ukrayiny vid 24 lypnya 2013 roku N 1071.
2. Plachkova, S. H. Enerhetyka. Ystoryia, nastoiashchee y budushchee. Knyha 3. Razvytye teploenerhetyky y hydroenerhetyky. Available at: <http://energetika.in.ua/ru/books/book-3>.
3. Alternatyvni palyva ta inshi netradytsiini dzherela enerhii / O.Adamenko, V. Vysochanskyi, V. Lotko, M. Mykhailov. Pid red. dokt. tekhn. nauk, prof. V. Lotko. Pidruchnyk dlia enerhetychnykh i ekolohichnykh spetsialnostei vyshchykh navchalnykh zakladiv. Ivano-Frankivsk, "Polumia", 2000. 225 p.
4. Ratushniak H. S., Popova H. S. Enerhozberezhennia ta ekspluatatsiia system teplopostachannia. Navchalnyi posibnyk. Vinnytsia. VDTU, 2002. 120 p.
5. Enerhetyka, dovkillia, enerhozberezhennia. Pid zah. red. prof. V. A. Maliarenko. Kh. Rubikon, 2004. 368 p.
6. Boyle R. Greenwood Ch., Hohler A. etc. Global Trends in Sustainable Energy Investment 2008. Analysis of Trends and Issues in the Financing of Renewable Energy and Energy Efficiency. United Nations Environment Programme and New Energy Finance Ltd, 2008. 295 p.
7. Vykydy zabrudniuiuchykh rehovyn v atmosferu vid enerhetychnykh ustanovok. Metodyka vyznachennia. HKD 34.02.305-2002. Kyiv, 2002. 41 p.
8. DSTU-N B V.1.1-27:2010. Budivelna klimatolohiia. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy, 2011.123 p.
9. Informatsiinyi sait «Coefficient of perfomence». Available at: <https://learnmetrics.com/coefficient-of-performance/>.
10. Informatsiinyi sait «Coefficient of perfomence». Available at: <https://www.nuclear-power.net/nuclear-engineering/thermodynamics/thermodynamic-cycles/heating-and-air-conditioning/coefficient-of-performance-cop-refrigerator-air-conditioner/>.
11. Informatsiinyi sait «Coefficient of perfomence». Available at: <https://www.adams-air.com/houston/what-is-COP.php>.

Стаття надійшла до редакції 21.08.2022 р.

Кундіус Катерина Дмитрівна, аспірант кафедри «Автоматизовані електромеханічні системи», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова 2, Харків, Україна, 61002; провідний інженер, Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України, вул. Пожарського 2/10, Харків, Україна, 61046; Тел. (096)8988759; e-mail: kundiuckateryna@ukr.net; ORCID (0000-0002-9624-0572).

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ АКТИВНОГО ЕКРАНУВАННЯ ЗОВНІШНЬОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ ВБУДОВАНИХ ТРАНСФОРМАТОРНИХ ПІДСТАНЦІЙ ПОТУЖНІСТЮ ДО 1260 кВА

Анотація. У статті на основі розроблених методів розрахунку магнітного поля та синтезу систем активного екранування магнітного поля трансформаторних підстанцій обґрунтована можливість зменшення до рівня санітарних норм індукції магнітного поля у житловому приміщенні розміщеному біля трансформаторної підстанції потужністю до 100 кВА з допомогою найпростіших систем активного екранування з однією обмоткою. Обґрунтування виконане теоретично на комп'ютерній моделі та експериментально на лабораторному макеті трансформаторної підстанції і системи активного екранування. Проведено синтез систем активного екранування магнітного поля трансформаторної підстанції потужністю 1260 кВА та обґрунтована можливість зменшення до рівня санітарних норм індукції магнітного поля у житловому приміщенні системою активного екранування з чотирма компенсаційними обмотками. Проведено порівняння ефективності розроблених систем активного екранування магнітного поля трансформаторних підстанцій з відомими методами пасивного екранування та методами удосконалення конструкції трансформаторних підстанцій. Вперше теоретично та експериментально обґрунтована достатність використання методів пасивного екранування при потужності трансформаторних підстанцій до 300 кВА, методів удосконалення конструкції при потужності трансформаторних підстанцій до 670 кВА та методу активного екранування при потужності трансформаторних підстанцій до 1260 кВА, який є універсальним і дозволяє виконати зменшення магнітного поля без втручання в конструкцію трансформаторної підстанції. Запропоновані рекомендації з використання методів зменшення магнітного поля в житлових приміщеннях від вбудованих трансформаторних підстанцій потужністю 100–1260 кВА.

Ключові слова: вбудована трансформаторна підстанція, магнітне поле, житлове приміщення, активне екранування, пасивне екранування, ефективність екранування.

Kundius Kateryna Dmytrivna, PhD student «Department of Automated electromechanics systems», National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", str. Kirpychova, 2, Kharkiv, Ukraine, 61002. A. Pidhornyi Institute of Mechanical Engineering Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine, Pozharskogo Str. 2/10, Kharkiv, Ukraine, 61046. Tel. (096)8988759; e-mail: kundiuckateryna@ukr.net; ORCID (0000-0002-9624-0572).

ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF ACTIVE SHIELDING OF THE EXTERNAL MAGNETIC FIELD OF BUILT-IN TRANSFORMER SUBSTATIONS WITH A POWER UP TO 1260 kVA

Abstract. In the article, based on the developed methods of calculating the magnetic field and synthesis active screening system of the magnetic field of transformer substations, the possibility of mitigation the induction of the magnetic field to the level of sanitary standards in a living space located near a transformer substation with a power of up to 100 kVA using the active loop. The substantiation was performed theoretically on a computer model and experimentally on a laboratory model of a transformer substation and an active shielding system. The synthesis of active screening system of the magnetic field of a transformer substation with a power of 1260 kVA was carried out, and the possibility of mitigation the induction of the magnetic field in a living space to the reference levels by means of an active screening system with four active loops. A comparison of the efficiency of the developed systems of active screening of the magnetic field of transformer substations with known methods of passive shielding and methods of improving the design of transformer substations was carried out. For the first time, the sufficiency of using passive shielding methods for the power of transformer substations up to 300 kVA, methods for improving the design for the power of transformer substations up to 600 kVA and the method of active shielding for the power of transformer substations up to 1260 kVA are substantiated. The method of active shielding is universal and allows you to mitigate the magnetic field without interfering with the design of the transformer substation.

Recommendations for the use of magnetic field mitigation methods in living spaces from built-in standard transformer substations with a power of 100–1260 kVA have been developed.

Keywords: magnetic field, built-in transformer substation, living spaces, active shielding, passive shielding, shielding factor.

Кундиус Катерина Дмитрієвна, аспірант кафедри «Автоматизовані електромеханічні системи», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», ул. Кирпичева 2, Харків, Україна, 61002; ведучий інженер, Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Подгорного НАН України, ул. Пожарського, 2/10, Харків, Україна, 61046; Тел. (096) 8988759; e-mail: kundiuckateryna@ukr.net; ORCID (0000-0002-9624-0572).

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ АКТИВНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ВСТРОЕННЫХ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ПОДСТАНЦИЙ МОЩНОСТЬЮ ДО 1260 кВА

Аннотация. В статье на основе разработанных методов расчета магнитного поля и синтеза систем активного экранирования магнитного поля трансформаторных подстанций обоснована возможность уменьшения уровня санитарных норм индукции магнитного поля в жилом помещении расположенном возле трансформаторной подстанции мощностью до 100 кВА с помощью простейших систем активного экранирования с одной обмоткой. Обоснование выполнено теоретически на компьютерной модели и экспериментально на лабораторном макете трансформаторной подстанции и системы активного экранирования. Проведен синтез систем активного экранирования магнитного поля трансформаторной подстанции мощностью 1260 кВА и обоснована возможность уменьшения до уровня санитарных норм индукции магнитного поля в жилом помещении системой активного экранирования с четырьмя компенсационными обмотками. Проведено сравнение эффективности разработанных систем активного экранирования магнитного поля трансформаторных подстанций с известными методами пассивного экранирования и методами усовершенствования конструкции трансформаторных подстанций. Впервые обоснована достаточность использования методов пассивного экранирования при мощности трансформаторных подстанций до 300 кВА, методов усовершенствования конструкции при мощности трансформаторных подстанций до 670 кВА и метода активного экранирования при мощности трансформаторных подстанций до 1260 кВА, который является универсальным и позволяет выполнить уменьшения магнитного поля без вмешательства в конструкцию трансформаторной подстанции. Предложены рекомендации по использованию методов уменьшения магнитного поля в жилых помещениях от встроенных трансформаторных подстанций мощностью 100-1260 кВА.

Ключевые слова: встроенная трансформаторная подстанция, магнитное поле, жилое помещение, активное экранирование, пассивное экранирование, эффективность экранирования.

Вступ. Вбудовані трансформаторні підстанції (ТП) є джерелом магнітного поля (МП), що створюють у прилеглих житлових приміщеннях небезпечний для населення рівень МП промислової частоти, який перевищує санітарні норми [1, 2]. Для захисту населення використовуються різні методи зменшення МП ТП [3, 8]. Метод пасивного екранування широко застосовують для захисту трансформаторних підстанцій [5–7], де для зменшення МП використовують пасивні екрани виконані із електропровідних, магнітостатичних пластин, що розміщуються між ТП і житловим приміщенням. Методи удосконалення конструкції передбачають зміну конструкції ТП, де за рахунок зміни положення ступоводів ТП зменшують МП ТП [6, 8–11]. Методи активного екранування, при яких МП ТП зменшується за рахунок використання активних контурів, що потребує використання додаткового джерела живлення та системи керування струму у контурі [8, 12–17]. При цьому світова тенденція розвитку систем активного екранування спрямована на оптимізацію їх конструкції по енергоспоживанню і вартості за умови забезпечення необхідної ефективності екранування. Однак в

Україні розвитку методів і засобів активного екранування МП ТП не приділяється належної уваги. Так, не визначена гранична ефективність методів активного екранування у порівнянні із відомими методами пасивного екранування та методами удосконалення конструкції ТП в залежності від потужності ТП, що не дозволяє раціонально використовувати методи активного екранування, а також інші методи екранування для зменшення МП в житлових приміщеннях до рівня санітарних норм.

Мета роботи – на основі розроблених методів розрахунку розподілу МП в житлових приміщеннях будинків із вбудованими ТП визначити ефективність активного екранування МП в порівнянні з відомими методами пасивного екранування та методами удосконалення конструкції ТП для ТП різної потужності.

Викладення основного матеріалу. Магнітне поле від ТП в житлових приміщеннях, що розташовані на відстані в декілька метрів від ТП, визначається виключно їх струмопроводами [3]. Тому для розрахунку потенційного МП ТП використаємо розроблену автором мультидипольну математичну модель зовнішнього МП ТП [3]:

$$\vec{B}_S(P_i, t) = - \sum_{k=1}^K \sum_{\alpha=1}^3 \sum_{n=1}^N \nabla \left[\frac{\mu_0 (\vec{m}(t)_{lcn}, \vec{R}_{lai})}{4\pi R_{lai}^3} \right], \quad \vec{m}(t)_{lcn} = I(t) \cdot \vec{S}_{lcn}, \quad (1)$$

де N – кількість мікроконтурів у прямолінійному контурі струмопроводу ТП; K – кількість прямолінійних контурів; $\vec{S}_{lcn}$ – вектор площі мікроконтуру; $\vec{n}_i$ – одиничний вектор, нормальний до S_i ; $\vec{R}_{lai}$ – радіус вектор від геометричного центру мікроконтуру до точки спостереження P_i ; $I(t)$ – миттєве значення струму мікроконтуру; α – номер фази струмопроводу ТП ($\alpha = 1 \dots, 3$); μ_0 – магнітна стала.

Синтез систем активного екранування (САЕ) проведемо за допомогою розробленого автором методу [4], на основі якого шукані параметри R (координати просторового розташування та струм компенсаційної обмотки (КО)) визначаються як

$$\vec{B}(R, P_i, t) = \vec{B}_S(P_i, t) + \vec{B}_y(R, P_i, t), \quad (2)$$

де $\vec{B}_y(R, P_i, t)$ – миттєві значення індукції МП, що генерується КО САЕ в точках P_i .

Пошук шуканих параметрів зводиться до рішення задачі багатокритеріальної оптимізації векторного критерію

$$B(R) = [B(R, P_1), B(R, P_2) \dots B(R, P_m)]^T, \quad (3)$$

компонентами якого $\vec{B}(R, P_i)$ є значення індукції результуючого МП у точках P_i .

Ефективність зменшення МП визначається коефіцієнтом екранування SF [4], як відношення індукції МП ТП у житлових приміщеннях до і після його екранування.

Активне екранування МП ТП 100 кВА.

Виконаємо синтез КО САЕ у приміщенні, розташованого зверху ТП 6/0,4 кВ з одним трансформатором потужністю 100 кВА (рис. 1а). Для гарантованого зменшення потенційного МП ТП до безпечного рівня у приміщенні достатньо зменшити МП на контрольній площині D на відстані 0,5 м від підлоги. Розрахункові значення (1) розподілу індукції МП ТП показані на рис. 1б, де максимальне значення МП становить 1,9 мкТл.

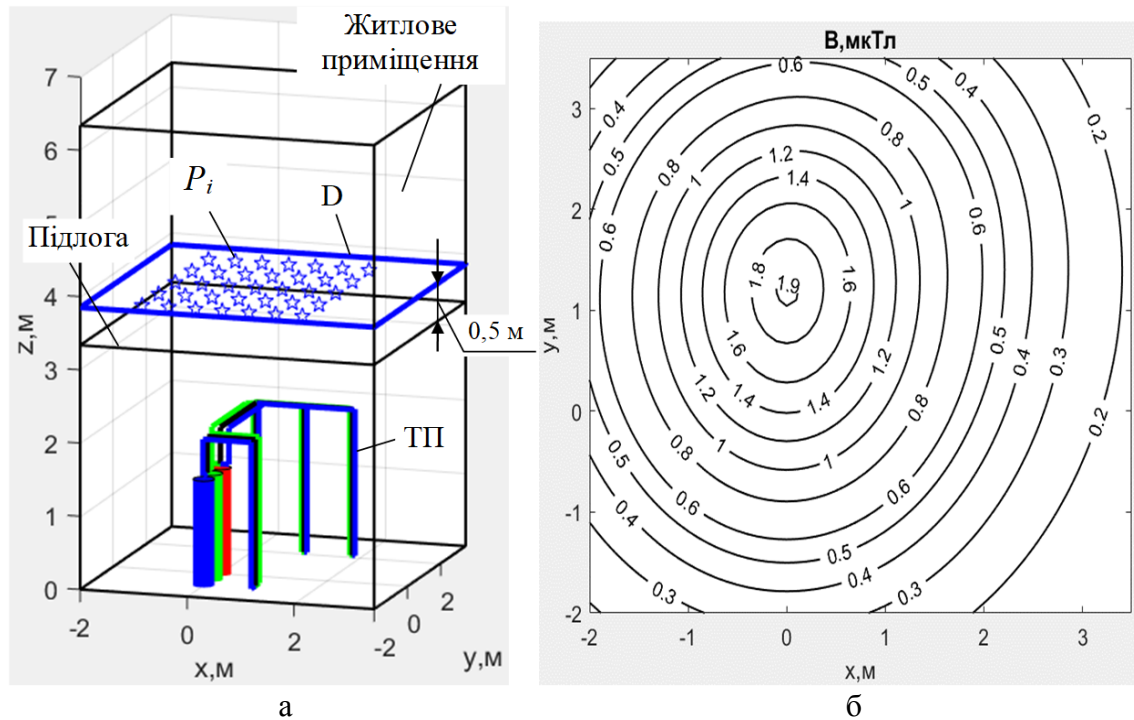


Рис. 1. Положення ТП і житлового приміщення а), розподіл індукції магнітного поля ТП на площині D б), $S_{\text{ном}}=100$ кВА

На основі методу синтезу САЕ (2-3) знайдено параметри КО, приведені у табл. 1. КО розміщена зверху над ТП паралельно підлоги на відстані 0,8 м від струмопроводу ТП (рис. 2а) та зменшує рівень МП до 0,25 мкТл (рис. 2б). Розрахункова ефективність екранування синтезованої системи $SF = 7,6$ одиниць.

Таблиця 1

Параметри компенсаційної обмотки САЕ для ТП 100 кВА

№ КО	Ампер-витки	Координати кутів КО (x,y,z) та відстань між КО та D (h)
1	$IW = 10,8$ А	$x1 = -0,82$ м, $x2 = -0,93$ м, $x3 = 1,15$ м, $x4 = 0,8$ м, $z = 2,8$ м, $y1 = -0,68$ м, $y2 = 2,6$ м, $y3 = 2,7$ м, $y4 = -0,6$ м, $h = 1,05$ м.

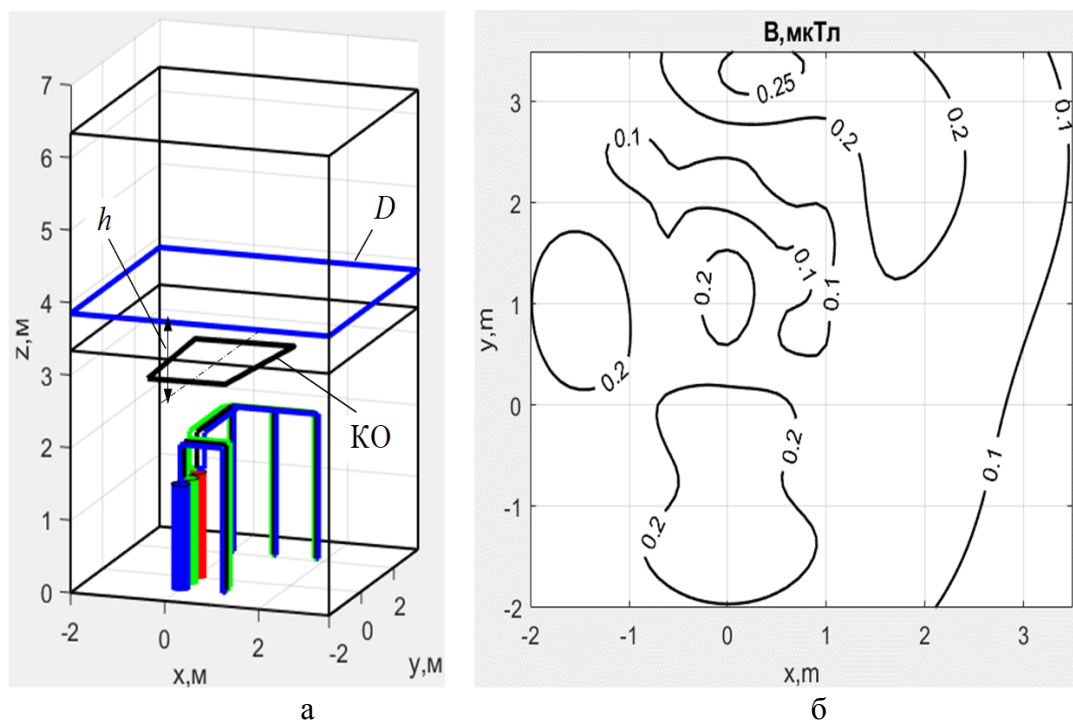


Рис. 2. Положення ТП та КО САЕ а), розподіл індукції зменшеного магнітного поля ТП на площині D б), $S_{\text{ном}} = 100 \text{ кВА}$

Експериментальна перевірка системи активного екранування МП ТП.

Експериментальна перевірка проведена на лабораторному макеті ТП 6/0,4 кВ з одним трансформатором потужністю 100 кВА виконаному у геометричному масштабі 1:1 (рис. 3).

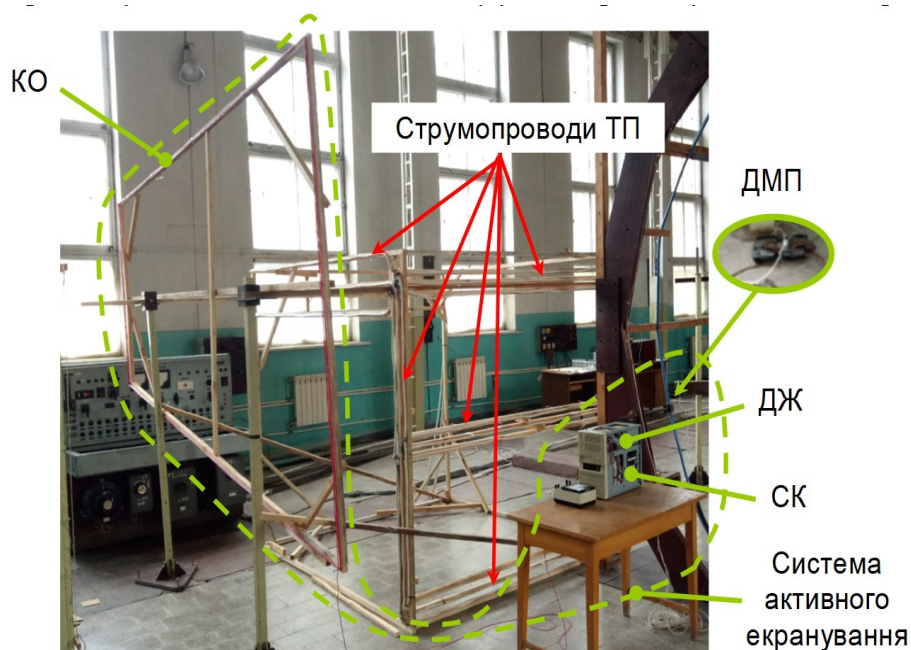


Рис. 3. Макет ТП 100 кВА та макет системи активного екранування МП

Поперечний переріз проводів трифазного струмопроводу $5 \times 2,5 \text{ мм}^2$.

Компенсаційна обмотка КО має 10 витків, активний опір 4 Ом. САЕ виконана у розімкненій структурі зі слідкуванням за струмом у одній фазі струмопроводу макету ТП. Де СК – система керування; ДЖ – джерело живлення; ДМП – датчик магнітного поля, що слідкує за струмом струмопроводу.

Експериментально визначене значення індукції МП макету ТП при фазному струмі 150 А (діюче значення) у низьковольтному струмопроводі 0,4 кВ на площині D представлено на рис. 4а. При цьому максимальне значення вихідної індукції МП становить $B_{max} = 1,9$ мкТл.

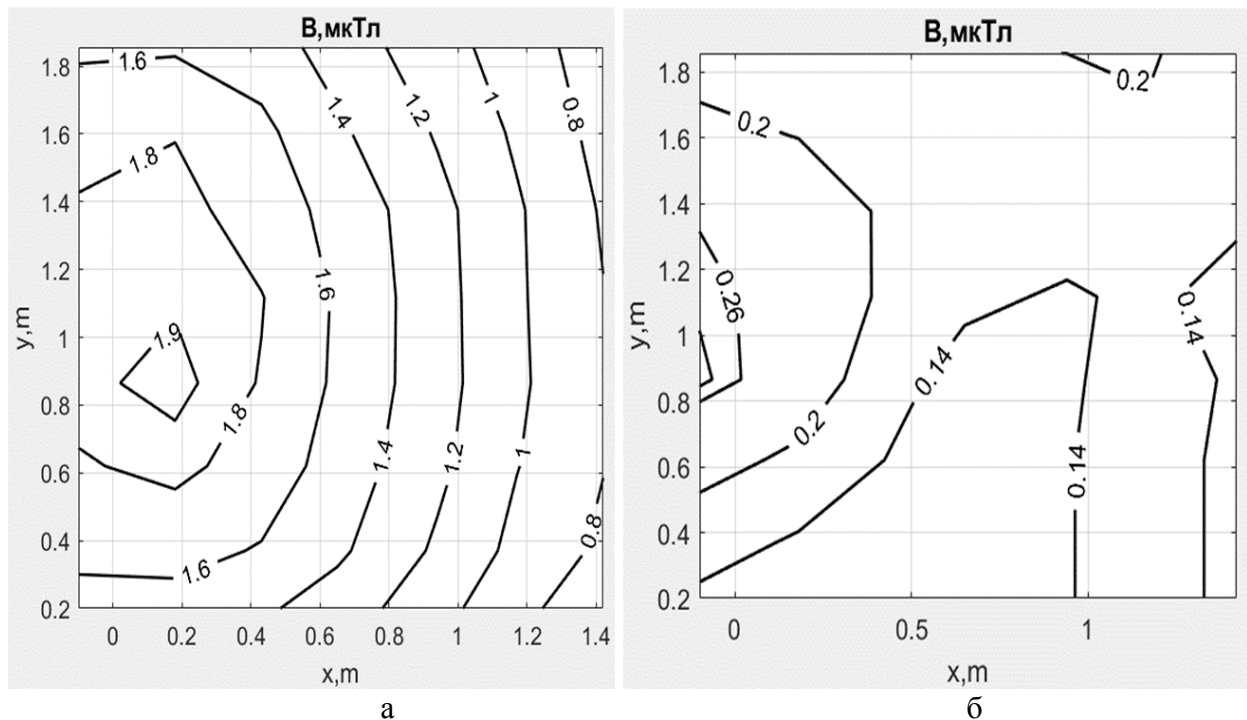


Рис. 4. Експериментально визначене магнітне поле ТП а), зменшене магнітне поле ТП на площині D б), $S_{ном} = 100$ кВА

Як показують результати експериментальних досліджень (рис. 4б), при використанні синтезованої САЕ рівень індукції МП зменшується до значення 0,27 мкТл, як на площині D , так і у всьому об'єму зверху над макетом ТП. При цьому синтезована САЕ має одну компенсаційну обмотку, розміщену на відстані 0,8 м від струмопроводу макету ТП і забезпечує ефективність екранування SF не менше 7 одиниць при струмі у КО 1,08 А, енергоспоживанні не більше 0,05 кВт та площі компенсаційної обмотки не більше 7 м². Порівняння результатів експерименту (рис. 1, 2) з результатами розрахунку (рис. 3, 4) показують похибку по ефективності САЕ не більше 8 %.

Таким чином, проведені вище теоретичні та експериментальні дослідження ефективності САЕ підтверджують можливість зменшення індукції МП ТП у приміщенні площею до 20 м² біля ТП 100 кВА 6/0,4кВ, до

рівня санітарних норм (0,5 мкТл) за допомогою САЕ з однією КО при енергоспоживання САЕ не більше 0,05 кВт, площі компенсаційної обмотки не більше 7 м².

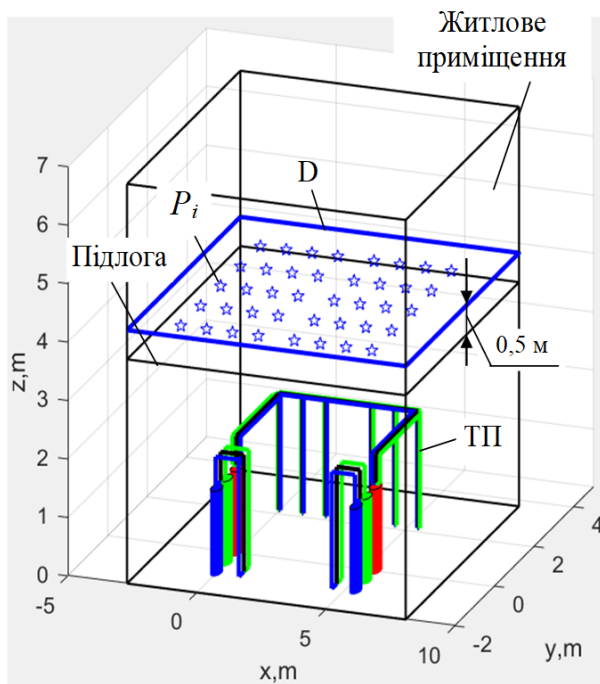
Активне екранування МП ТП 1260 кВА.

Виконаємо синтез КО САЕ у приміщенні зверху ТП площею 50 м² на типовій трансформаторній підстанції (ТП-2-77/79-630) з двома трансформаторами номінальною потужністю по 630 кВА (рис. 5а). Розрахункові значення розподілу індукції МП ТП (1) показані на контрольній площині D на відстані 0,5 м від підлоги, де максимальне значення МП становить 6,5 мкТл (рис. 5б). На основі методу синтезу САЕ (2-3) знайдемо параметри двох КО, що приведені у табл. 2. та на рис. 6а.

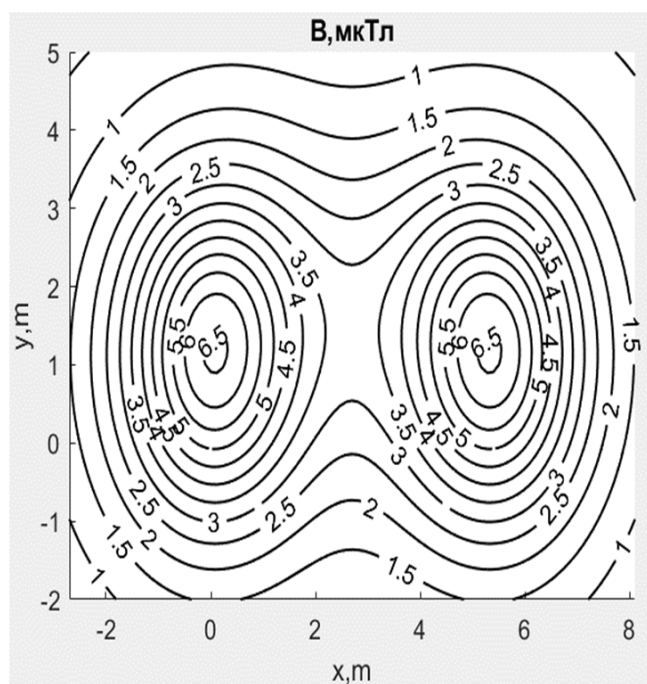
Таблиця 2

Параметри компенсаційних обмоток САЕ для ТП 1260 кВА

№ КО	Ампер-витки	Координати кутів КО (x,y,z) та відстань між КО та D (h)
1	$IW1 = 42,7 \text{ A}$	$x11 = -0,67 \text{ м}, x21 = -1,06 \text{ м}, x31 = 1,38 \text{ м}, x41 = 0,3 \text{ м}, z1 = 3 \text{ м},$ $y11 = -0,67 \text{ м}, y21 = 2,5 \text{ м}, y31 = 2,5 \text{ м}, y41 = -0,98 \text{ м}, h = 1,35 \text{ м},$
2	$IW2 = 42,7 \text{ A}$	$x12 = 6,07 \text{ м}, x22 = 6,46 \text{ м}, x32 = 4,02 \text{ м}, x42 = 5,1 \text{ м}, z2 = 3 \text{ м},$ $y12 = -0,67 \text{ м}, y22 = 2,5 \text{ м}, y32 = 2,5 \text{ м}, y42 = -0,98 \text{ м}, h = 1,35 \text{ м},$



а



б

Рис. 5. Положення ТП і житлового приміщення а), розподіл індукції магнітного поля ТП на площині D б), $S_{\text{ном}} = 1260 \text{ кВА}$

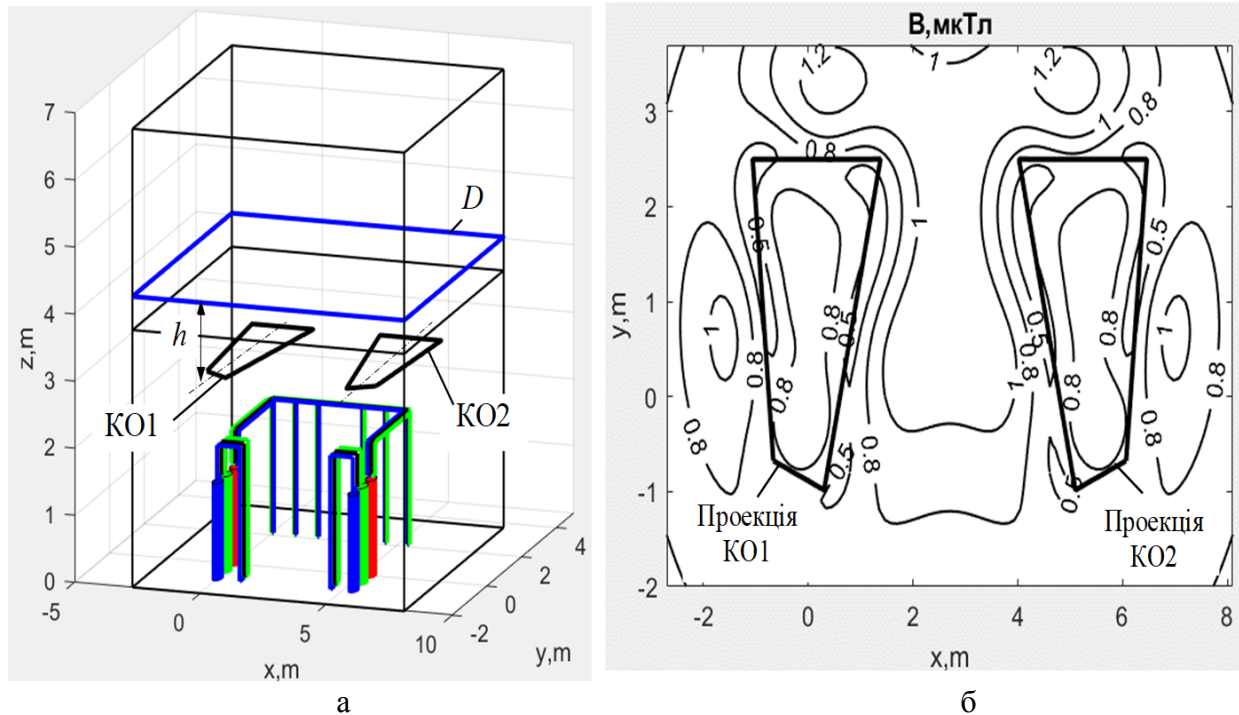


Рис. 6. Положення ТП і КО САЕ а), розподіл індукції зменшеного магнітного поля ТП на площині D б), $S_{\text{ном}} = 1260$ кВА

Дві КО САЕ розміщені зверху над ТП паралельно підлоги на відстані 0,85 м від неї та зменшують рівень вихідного МП до 1,2 мкТл (рис. 6б). Ефективність синтезованої САЕ $SF = 5,5$ одиниць.

Розглянутий варіант САЕ з двома КО не дозволяє зменшити рівень МП у житловому приміщенні до безпечного для населення рівня 0,5 мкТл [1,2] при номінальній потужності ТП 1260 кВА (рис. 6б).

Підвищення ефективності активного екранування МП для ТП 1260 кВА.

З допомогою методу синтезу САЕ (2-3) знайдено параметри чотирьох КО, що приведені у табл. 3.

Таблиця 3

Параметри компенсаційних обмоток САЕ для ТП 1260 кВА

№ КО	Ампер-витки	Координати КО
1	$IW1 = 104,7$ А	$x11 = x21 = -0,73$ м, $x31 = 0,7$ м, $x41 = 0$ м, $z1 = 2,33$ м, $y11 = y41 = -0,68$ м, $y21 = y31 = 2,7$ м, $h = 2$ м.
2	$IW2 = 19,1$ А	$x12 = x22 = 1,98$ м, $x32 = 0$ м, $x42 = 0,7$ м, $z2 = 2,33$ м, $y12 = y42 = 2,7$ м, $y22 = y32 = -0,68$ м, $h = 2$ м,
3	$IW3 = 19,1$ А	$x13 = x23 = 3,42$ м, $x33 = 5,4$ м, $x43 = 4,7$ м, $z3 = 2,33$ м, $y13 = y43 = 2,7$ м, $y23 = y33 = -0,68$ м, $h = 2$ м.
4	$IW4 = 104,7$ А	$x14 = x24 = 6,13$ м, $x34 = 4,7$ м, $x44 = 5,4$ м, $z4 = 2,33$ м, $y14 = y44 = -0,68$ м, $y24 = y34 = 2,7$ м, $h = 2$ м.

Як показують результати моделювання (рис. 7б), при використанні синтезованої САЕ рівень індукції МП зменшується до значення 0,4 мкТл, як на площині D , так і у всьому об'ємі зверху. При цьому синтезована САЕ має чотири КО САЕ, розміщені зверху над ТП паралельно стелі приміщення ТП на відстані 1,5 м від неї. Синтезована САЕ забезпечує ефективність екранування SF не менше 16 одиниць при енергоспоживанні не більше 0,5 кВт та площі компенсаційних обмоток не більше 20 м².

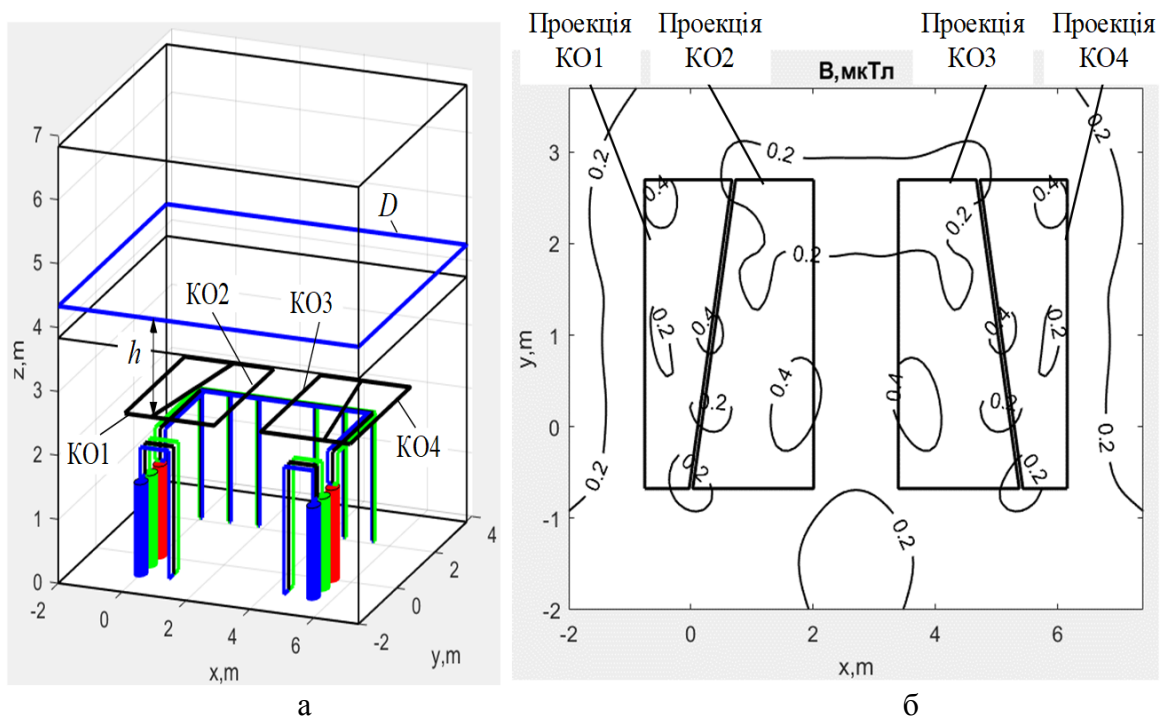


Рис. 7. Положення ТП і КО САЕ а) та розподіл індукції зменшеного магнітного поля ТП на площині D б), $S_{\text{ном}}=1260$ кВА

Реалізоване підвищення ефективності САЕ за рахунок використання чотирьох КО дозволяє зменшити рівень МП у житловому приміщенні до безпечного для населення рівня 0,5 мкТл [1,2] при номінальній потужності ТП 1260 кВА (рис. 7б).

Аналіз ефективності різних методів пасивного екранування. Ефективність методу пасивного екранування МП залежить від положення екрану, матеріалів що використовуються, а також розміру екрану. Для захисту від МП ТП використовують пасивні екрани виконанні з феромагнітних матеріалів або провідних матеріалів. Застосування методу пасивного екранування на діючих ТП показали наступну ефективність. Для ТП 10/0,4 кВА [5] при використанні пасивного екрану з металевих листів коефіцієнт екранування SF досягає 3,6 одиниць, а для листів із провідних матеріалів досягає 4,5 одиниць. Для ТП 20/0,4 кВА [6] при використанні пасивного екрану із провідних матеріалів SF складає 3,3 одиниць. Для ТП 110/35 кВА [7] ефективність екранування для листів із провідних матеріалів SF

досягає 5 одиниць. Таким чином ефективність екранування відомих методів пасивного екранування складає 3,3-5 одиниць.

Аналіз ефективності методів удосконалення конструкції ТП. Використання відомих методів удосконалення конструкцій ТП показали наступну ефективність SF : для ТП 20/0,4 кВ за рахунок зміни конфігурації трифазних струмопроводів коефіцієнт екранування SF досягає 2 одиниць [6]; для ТП 20/0,4 кВ за рахунок змішування фазних проводів низької напруги коефіцієнт екранування SF досягає 8 одиниць [8]; для ТП 20/0,4 кВ за рахунок зміни положення струмопроводів низької на високої напруги досягає 2 одиниць [9]; для ТП 11/0,4 кВ за рахунок зменшення міжфазної відстані та положення проводів фази і нульового проводу коефіцієнт екранування SF досягає 6 одиниць [10]; для ТП 11/0,4 кВ за рахунок зміни конфігурації трифазних струмопроводів коефіцієнт екранування SF досягає 1,3 одиниці [11]. Таким чином ефективність екранування відомих методів удосконалення конструкції ТП складає 1,3–8 одиниць.

Порівняння ефективності методів зменшення МП ТП та рекомендації з їх використання. На рис. 8 приведено графік залежності граничного коефіцієнта екранування SF_{lim} від номінальної потужності $S_{ном}$ трансформаторних підстанцій визначений по результатам експериментальних досліджень, проведеними автором у [3] $SF_{lim} = f(S_{ном})$, та максимальні значення коефіцієнтів екранування методів пасивного SF_{PEmax} , активного SF_{AEmax} екранування та удосконалення конструкції ТП SF_{YEmax} .

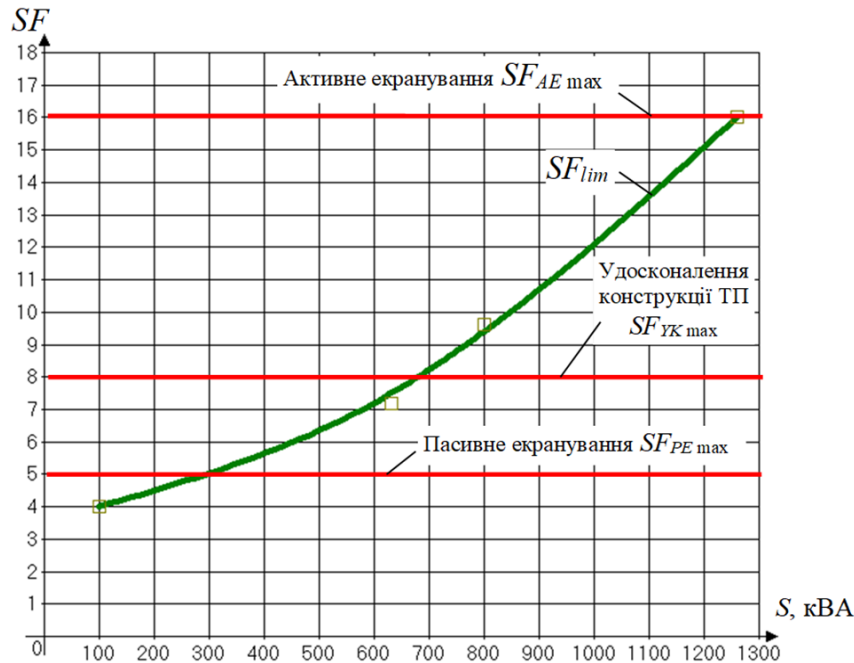


Рис. 8. Залежність граничного коефіцієнта екранування МП ТП SF_{lim} від номінальної потужності ТП $S_{ном}$ та максимальні значення коефіцієнтів екранування методів пасивного SF_{PEmax} , активного SF_{AEmax} екранування та удосконалення конструкції ТП SF_{YEmax}

Граничний коефіцієнт екранування SF_{lim} (рис. 8) визначає ефективність, що необхідна для зменшення МП ТП до безпечного для населення рівня у житлових приміщеннях.

У табл. 4 наведені узагальнені результати ефективності різних методів зменшення МП ТП.

Таблиця 4

Ефективність методів зменшення МП ТП та рекомендації по їх застосуванню

Методи зменшення МП ТП	SF	Рекомендації по застосуванню методів
Удосконалення конструкції ТП	1,3–8	Для ТП до 670 кВА
Пасивне екранування	3,3–5	Для ТП до 300 кВА
Активне екранування	5,5–16	Для ТП до 1260 кВА

Так зменшення МП ТП методами удосконаленням конструкції ТП має ефективність 1,3–8. Таким чином, застосування цих методів дозволяє зменшити МП до безпечного для населення рівня у ТП з потужністю до 670 кВА (рис. 8). Однак зміна конструкції діючих ТП технічно складно і має юридичні обмеження, а промисловий випуск ТП у спеціальному конструктивному виконанні вимагає значних інвестицій. Тому кращими для практичної реалізації є методи зовнішнього екранування МП ТП.

В даний час найбільш поширеним на практиці методом зовнішнього екранування є пасивне екранування приміщень ТП електромагнітними (магнітостатичними) екранами [5–7], При цьому ефективність методу пасивного екранування сягає 3,3–5 одиниць (табл. 4), що дозволяє зменшити рівень МП до безпечного для населення рівня для ТП потужністю до 300 кВА (рис. 8). Метод пасивного екранування є універсальним, однак на низькій частоті 50 Гц його реалізація з необхідною ефективністю вимагає залучення істотних коштів і відрізняється високою металоємністю і вартістю при незначній ефективності.

Тому найбільш перспективним методом зменшення МП ТП є активне екранування МП. Як доведено (табл. 4), його ефективність сягає 5,5–16 одиниць, що дозволяє зменшити рівень МП у житлових приміщеннях до безпечного для населення рівня з індукцією 0,5 мкТл для ТП з потужністю від 100 до 1260 кВА (рис. 8).

Висновки. Вперше обґрунтована можливість зменшення до санітарних норм індукції магнітного поля у житлових приміщеннях площею до 20 м², розташованих поблизу вбудованих трансформаторних підстанцій потужністю до 100 кВА за допомогою системи активного екранування з однією плоскою компенсаційною обмоткою, розміщеною біля стелі приміщення ТП, при енергоспоживанні САЕ не більше 0,05 кВт, площі компенсаційної обмотки не більше 7 м².

Вперше показана можливість зменшення до санітарних норм індукції магнітного поля у житлових приміщеннях площею до 50 м², розташованих

поблизу вбудованих трансформаторних підстанцій потужністю до 1260 кВА з допомогою системи активного екранування з чотирма плоскими компенсаційними обмотками, розміщеними у приміщенні ТП над її струмопроводами, при енергоспоживанні САЕ не більше 0,5 кВт, площі компенсаційних обмоток не більше 20 м².

Вперше доведено достатність використання методів пасивного екранування при потужності трансформаторних підстанцій до 300 кВА, методів удосконалення конструкції при потужності трансформаторних підстанцій до 670 кВА та розробленого методу активного екранування при потужності трансформаторних підстанцій до 1260 кВА, який є універсальним і дозволяє виконати зменшення магнітного поля без втручання в конструкцію трансформаторної підстанції.

Результати теоретичних досліджень методів екранування магнітного поля, виконаних на комп'ютерній моделі, експериментально обґрунтовані на повномасштабному лабораторному макеті трансформаторної підстанції із системою активного екранування.

Практичне використання розроблених систем активного екранування дозволить ефективно вирішити актуальну і соціально значиму для України проблему захисту здоров'я населення у житлових будинках з вбудованими трансформаторними підстанціями від негативної дії магнітного поля промислової частоти.

Список використаної літератури:

1. Сердюк А. М., Думанський В. Ю., Біткін С. В., Дідик Н. В., Думанський Ю. Д., та ін. Гігієнічне обґрунтування вимог до розміщення та експлуатації кабельних ліній електропередачі та їх обладнання у умовах сучасної міської забудови. Гігієна населених місць: Зб. Наук. Пр. 2015. № 66. С. 20–29.
2. Правила улаштування електроустановок. Видання офіційне. Міненерговугілля України. Видавництво «Форт». Харків. 2017. 760 с.
3. Rozov V. Y., Pelevin D. Y., Pielievina K. D. External magnetic field of urban transformer substations and methods of its normalization. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2017. no.5. P. 60–66.
4. Rozov V. Yu., Kundius K. D., Pelevin D. Ye. Active shielding of external magnetic field of built-in transformer substations. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2020. no. 3. P. 24–30.
5. Grbić M., Canova A., Giaccone L. Magnetic field in an apartment located above 10/0.4 kV substation: levels and mitigation techniques. *CIREN – Open Access Proceedings Journal*. 2017. vol. 1. P. 752–756.
6. Alotto P., Guarnieri M., Moro F., Turri R. Mitigation of residential magnetic fields generated by MV/LV substations. 42nd International Universities Power Engineering Conference. 2007. P. 832–836.
7. Grbić M., Canova A., Giaccone L. Levels of magnetic field in an apartment near 110/35 kv substation and proposal of mitigation techniques. *Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion*. 2016. P. 1–8.
8. Bravo-Rodríguez J., Del-Pino-López J., Cruz-Romero P. A Survey on optimization techniques applied to magnetic field mitigation in power systems. *Energies*. 2019. vol. 12. no. 7. P. 1332.
9. Geri A., Veca G. M. Power-frequency magnetic field calculation around an indoor transformer substation. *WIT transactions on modelling and simulation*. 2005. vol. 39. 10 p. <https://doi.org/10.2495/BE050641>.
10. Burnett J., Du Yaping P. Mitigation of extremely low frequency magnetic fields from electrical installations in high-rise buildings. *Building and Environment*. 2002. vol. 37. no. 8–9. P. 769–775.
11. Leung S. W., Chan K. H., Fung L. C. Investigation of power frequency magnetic field radiation in typical high-rise building. *European Transactions on Electrical Power*. 2011. vol. 21. no. 5. P. 1711–1718.
12. Canova A., Giaccone L. Real-time optimization of active loops for the magnetic field minimization. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*. 2018. vol. 56. P. 97–106.

13. del-Pino-Lopez J. C., Giaccone L., Canova A., Cruz-Romero P. Ga-based active loop optimization for magnetic field mitigation of MV/LV substations. *IEEE Latin America Transactions*. 2014. vol. 12. no. 6. P. 1055–1061.
14. del-Pino-López J., Giaccone L., Canova A., Cruz-Romero P. Design of active loops for magnetic field mitigation in MV/LV substation surroundings. *Electric Power Systems Research*. 2015. vol. 119. P. 337–344.
15. Canova A., del-Pino-López J. C., Giaccone L., Manca M. Active Shielding System for ELF Magnetic Fields. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2015. vol. 51. no. 3. P. 1–4.
16. Garzia F., Geri A. Active shielding design in full 3D space of indoor MV/LV substations using genetic algorithm optimization. *IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility*. 2003. vol. 1. P. 197–202.
17. Garzia F., Geri A. Reduction of magnetic pollution in urban areas by an active field cancellation. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. 2004. p. 72.
18. Розов В. Ю. Внешние магнитные поля силового электрооборудования и методы их уменьшения. Препринт. НАН Украины. Ин-т электродинамики. Киев. 1995. № 772. 42 с.

References:

1. Serdiuk A. M., Dumanskiy V. Yu., Bitkin S. V., Didyk N. V., Dumanskiy Yu. D, et. al. Hygienical ground of requirements to placing and exploitation of cable busses of electricity transmission and their equipment in the conditions of modern municipal building [Hihiiienichne obgruntuvannia vymoh do rozmishchennia ta ekspluatatsii kabelnykh liniy elektroperedachi ta yikh obladnannia v umovakh suchasnoi miskoi zabudovy], *Hihiiena naselenykh mist: Zbr. Nauk. Pr.*, 2015. no. 66, pp. 20–29.
2. Electrical installation regulations [Pravila ulashtuvannya electroustanovok], Fort Publ. Kharkiv, 2017, 760 p.
3. Rozov V. Y., Pelevin D. Y., Pielievina K. D. External magnetic field of urban transformer substations and methods of its normalization. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2017. no. 5. pp. 60–66.
4. Rozov V. Yu., Kundius K. D., Pelevin D. Ye. Active shielding of external magnetic field of built-in transformer substations. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2020. no. 3. pp. 24–30.
5. Grbić M., Canova A., Giaccone L. Magnetic field in an apartment located above 10/0.4 kV substation: levels and mitigation techniques. *CIREN – Open Access Proceedings Journal*. 2017. vol. 1. pp. 752–756.
6. Alotto P., Guarnieri M., Moro F., Turri R. Mitigation of residential magnetic fields generated by MV/LV substations. *42nd International Universities Power Engineering Conference*. 2007. pp. 832–836.
7. Grbić M., Canova A., Giaccone L. Levels of magnetic field in an apartment near 110/35 kV substation and proposal of mitigation techniques. *Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion*. 2016. P. 1–8.
8. Bravo-Rodríguez J., Del-Pino-López J., Cruz-Romero P. A Survey on optimization techniques applied to magnetic field mitigation in power systems. *Energies*. 2019. vol. 12. no. 7. pp. 1332.
9. Geri A., Veca G. M. Power-frequency magnetic field calculation around an indoor transformer substation. *WIT transactions on modelling and simulation*. 2005. vol. 39. 10 p. <https://doi.org/10.2495/BE050641>.
10. Burnett J., Du Yaping P. Mitigation of extremely low frequency magnetic fields from electrical installations in high-rise buildings. *Building and Environment*. 2002. vol. 37. no. 8–9. pp. 769–775.
11. Leung S. W., Chan K. H., Fung L. C. Investigation of power frequency magnetic field radiation in typical high-rise building. *European Transactions on Electrical Power*. 2011. vol. 21. no. 5. pp. 1711–1718.
12. Canova A., Giaccone L. Real-time optimization of active loops for the magnetic field minimization. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*. 2018. vol. 56. pp. 97–106.
13. del-Pino-Lopez J. C., Giaccone L., Canova A., Cruz-Romero P. Ga-based active loop optimization for magnetic field mitigation of MV/LV substations. *IEEE Latin America Transactions*. 2014. vol. 12. no. 6. pp. 1055–1061.
14. del-Pino-López J., Giaccone L., Canova A., Cruz-Romero P. Design of active loops for magnetic field mitigation in MV/LV substation surroundings. *Electric Power Systems Research*. 2015. vol. 119. pp. 337–344.
15. Canova A., del-Pino-López J. C., Giaccone L., Manca M. Active Shielding System for ELF Magnetic Fields. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2015. vol. 51. no. 3. pp. 1–4.
16. Garzia F., Geri A. Active shielding design in full 3D space of indoor MV/LV substations using genetic algorithm optimization. *IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility*. 2003. vol. 1. pp. 197–202.
17. Garzia F., Geri A. Reduction of magnetic pollution in urban areas by an active field cancellation. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. 2004. p. 72.
18. Rozo, V. Yu. External magnetic fields of power electrical equipment and methods for reducing them. Preprint. [Vneshnie magnitnie polya silovogo elektrooborudovaniya i metodi ikh umensheniya Preprint], NAS of Ukraine The Institute of Electrodynamics Publ., Kyiv, 1995. no. 772, 42 p.

Стаття надійшла до редакції 21.09.2022 р.