## ВЕСТНИК НАЦИОНАЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА "ХПИ"

#### Сборник научных трудов Тематический выпуск "Проблемы совершенствования электрических машин и аппаратов"

# 55'2010

Издание основано Национальным техническим университетом "Харьковский политехнический институт" в 2001 году

Государственное издание

Свидетельство Госкомитета по информационной политике Украины КВ № 5256 от 2 июля 2001 гола

## КООРДИНАЦИОННЫЙ СОВЕТ:

#### Председатель

Л.Л. Товажнянский, д-р техн. наук, проф. Секретарь

- К.А. Горбунов, канд. техн. наук, доц.
- А.П. Марченко, д-р техн. наук, проф.
- Е.И. Сокол, д-р техн. наук, проф.
- Е.Е. Александров, д-р техн. наук, проф.
- Л.М. Бесов, д-р техн. наук, проф.
- Б.Т. Бойко, д-р техн. наук, проф.
- Ф.Ф. Гладкий, д-р техн. наук, проф.
- М.Д. Годлевский, д-р техн. наук, проф.
- А.И. Грабченко, д-р техн. наук, проф.
- В.Г. Данько, д-р техн. наук, проф.
- В.Д. Дмитриенко, д-р техн. наук, проф.
- И.Ф. Домнин, д-р техн. наук, проф.
- В.В. Епифанов, канд. техн. наук, проф.
- Ю.И.Зайцев, канд. техн. наук, проф.
- О.П. Качанов, д-р техн. наук, проф.
- В.Б. Клепиков, д-р техн. наук, проф. С.И. Кондрашов, д-р техн. наук, проф.
- В.М. Кошельник, д-р техн. наук, проф.
- В.И. Кравченко, д-р техн. наук, проф.
- Г.В. Лисачук, д-р техн. наук, проф.
- В.С. Лупиков, д-р техн. наук, проф. О.К. Морачковский, д-р техн. наук, проф.
- В.И. Николаенко, канд. ист. наук, проф.
- П.Г. Перерва, д-р техн. наук, проф.
- В.А. Пуляев, д-р техн. наук, проф.
- М.И. Рышенко, д-р техн. наук, проф.
- В.Б. Самородов, д-р техн. наук, проф.
- Г.М. Сучков, д-р техн. наук, проф.
- Ю.В. Тимофеев, д-р техн. наук, проф.
- Н.А. Ткачук, д-р техн. наук, проф.

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Ответственный редактор:

В.С. Лупиков, д-р техн. наук, проф.

#### Ответственный секретарь:

А.Г. Середа, канд. техн. наук, доц.

- В.Ф. Болюх, д-р техн. наук, проф.
- В.Г. Данько, д-р техн. наук, проф.
- В.Б. Клепиков, д-р техн. наук, проф.
- Б.В. Клименко, д-р техн. наук, проф.
- В.И. Кравченко, д-р техн. наук, проф.
- В.И. Милых, д-р техн. наук, проф.
- В.П. Себко, д-р техн. наук, проф.
- Е.И. Сокол, д-р техн. наук, проф.

Адрес редколлегии: 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21. НТУ "ХПИ".

Каф. ЭА. Тел. (057) 707-68-64

## Харьков 2010

Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2010. – № 55. – 162 с.

Випуск присвячений 125-річчю Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" і приурочений до Міжнародного симпозіуму "Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика" (SIEMA'2010), 27 – 29 жовтня 2010 року, Харків, НТУ "ХПІ". В збірнику висвітлюються проблеми удосконалення електричних машин і апаратів, досягнення вчених, вузів і підприємств України та інших країн.

Для наукових співробітників, викладачів, аспірантів, спеціалістів.

Выпуск посвящен 125-летию Национального технического университета "Харьковский политехнический институт" и приурочен к Международному симпозиуму "Проблемы совершенствования электрических машин и аппаратов. Теория и практика" (SIEMA'2010), 27 – 29 октября 2010 года, Харьков, НТУ "ХПИ". В сборнике освещаются проблемы совершенствования электрических машин и аппаратов, достижения ученых, вузов и предприятий Украины и других стран.

Для научных сотрудников, преподавателей, аспирантов, специалистов.

Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" включено до Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук (додаток до Постанови Президії ВАК України від 26 травня 2010 р., № 1 - 05/4, п. 20, технічні науки).

## Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ "ХПІ"; Протокол № 10 від 26.11.2010

© Національний технічний університет "ХПІ", 2010

## **В.А. ВЛАСЕНКО**, аспірант, КТУ, Кривий Ріг

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОІНДУКЦІЇ ФАЗ ВЕНТИЛЬНО-ІНДУКТОРНОГО ДВИГУНА

Побудовано польові моделі індукторних машин різних конструкцій з метою визначення параметрів міжфазної взаємної індуктивності. Сформульовано рекомендації щодо врахування взаємоіндукції фаз.

Построено полевые модели индукторных машин разной конструкции с целью определения параметров межфазной взаимной индуктивности. Сформулировано предложения относительно учета взаимоиндукции фаз.

Вступ. Математичне моделювання вентильно-індукторного двигуна (ВІД) є основним засобом його дослідження та проектування. У переважній більшості математичних моделей ВІД взаємна індукція фаз двигуна не враховується і розглядається без належного обгрунтування як фактор невисокої значимості [1-3]. Деякі ж дослідники включають в модель двигуна взаємну індуктивність фаз, проте не приділяють питанню її кількісного визначення достатньої уваги [4, 5].

На практиці при застосуванні симетричної одиночної комутації фаз індукторної машини токові хвилі фаз перекриваються між собою [3]. Фактично це означає, що за період роботи кожної фази в ній виникають напруги взаємоіндукції від струмів в інших фазах.

Мета дослідження. Встановити закономірність зміни взаємоіндукції для вентильних реактивних двигунів в залежності від поточної конфігурації магнітної системи та визначити вплив взаємоіндукції фаз на електромагнітні процеси в двигуні.

Теоретичні дослідження. Визначення взаємної індуктивності фаз ВІД безпосередньо пов'язане з розрахунком розподілу магнітної індукції при доволі складному поперечному перетину магнітної системи, а тому може бути якісно обґрунтовано лише на основі польового підходу. В даній публікації для дослідження задачі магнітостатики використовується чисельний метод інтегральних рівнянь відносно вектора намагніченості, який детально розглянуто в [6].

Як відомо, взаємна індуктивність між двома котушками визначається впливом струму однієї котушки на потокозчеплення іншої. З

урахуванням принципу взаємності між фазами k та  $j M_{kj} = M_{jk}$ . Таким чином, достатньо визначити лише вплив однієї фази на іншу в кожній парі досліджуваних фаз. Оскільки конструкція ВІД симетрична, то потрібно визначити взаємоіндукцію між однією будь-якою фазою та іншими фазами машини попарно. Для інших фаз ці залежності будуть аналогічні за урахування кута зміщення фаз.

Для індукторних двигунів розрахунок взаємоіндукції передбачає визначення потокозчеплення у полюсі статора досліджуваної фази при збудженні іншої фази. Таким чином, взаємна індуктивність *k*-ї та *j*-ї фаз

$$M_{kj} = \Psi_k / i_j = 2\Phi_k w_j / i_j , \qquad (1)$$

де  $\Phi_k = \int B_k dl$  – магнітний потік, що проходить через поперечний перетин полюса *k*-ї фази під дією струму *i<sub>j</sub> j*-ї фази; *w<sub>j</sub>* – кількість витків *j*-ї фази.

Взаємна індуктивність, як і власна індуктивність фази, не є величиною постійною і залежить від поточного положення магнітної системи, тобто є функцією кута повороту ротора  $\theta$ . Тому розрахунки слід проводити для різних положень ротора на всьому періоді зміни функції. Очевидно, періоди функцій  $M(\theta)$  і  $L(\theta)$  однакові, і обумовлені кількістю зубців ротора. Нульове значення  $\theta$  прийнято для повністю неузгодженого положення ротора відносно статора, тобто коли вісі пазу ротора та полюса статора співпадають, а додатний напрям руху ротора – проти годинникової стрілки.

Математичне моделювання. Результати моделювання поля з різними конструкціями магнітної системи, яке було проведено на основі програмного пакету Matlab, показані на рис. 1. Для моделювання обрані найбільш розповсюджені конфігурації двигунів: трифазна машина простої конструкції 6/4 (рис. 1, а), чотирифазна машина конструкції 8/6 (рис. 1, б), трифазна машина з подвоєною кількістю полюсів на фазу конструкції 12/8 (рис. 1, в) та трифазна машина конструкції 12/10 псевдо *U*подібного типу (рис. 1, г).

Картини магнітних полів наглядно демонструють, яким чином взаємодіють обмотки суміжних фаз. Вони представлені для кутів положення ротора, що відповідають максимальним значенням взаємної індуктивності.

Результати розрахунку взаємної індуктивності між фазними обмотками статора для розглянутих конструкцій двигунів представлені на рис. 2 у вигляді графічних залежностей  $M(\theta)$ : а – 6/4; б – 8/6; в – 12/8; г – 12/10.











Рис. 2.

ISSN 2079-3944. Вісник НТУ ''ХПІ''. 2010. № 55

Значення взаємної індуктивності для суміжних фаз, отримані в ході обчислювальних експериментів, зведені до табл. 1.

			Таблиця 1		
Конфігурація маг- нітної системи Z <sub>1</sub> /Z <sub>2</sub>	Мінімальне зна- чення взаємної ін- дуктивності М <sub>тін</sub> , мГн	Максимальне зна- чення взаємної ін- дуктивності М <sub>пах</sub> , мГн	Середнє значення взаємної індукти- вності М <sub>0</sub> , мГн	Амплігуда взаєм- ної індуктивності <i>М</i> <sub>1</sub> , мГн	Співвідношення взаємної та влас- ної індуктивнос- тей М <sub>тах</sub> / L <sub>тах</sub>
6/4	0,5	6,6	3,55	3,05	0,06
8/6	0,9	9,4	5,15	4,05	0,10
12/8	3,8	17,4	10,6	6,8	0,12
12/10	0,9	8,8	4,85	3,95	0,056

Із наведених результатів моделювання витікає, що найбільше значення взаємної індуктивності фази мають в момент максимального полюсного перекриття відповідних полюсів статора полюсами ротора. Це означає, що кут зміщення функції взаємної індуктивності відносно функції власної індуктивності фази рівний половині різниці кута між полюсами статора та кута між полюсами ротора:

$$\gamma = \frac{\pi(z_1 - z_2)}{z_1 z_2},$$
 (2)

де z<sub>1</sub>, z<sub>2</sub> – кількість полюсів статора і ротора відповідно.

Аналіз графіків на рис. 2 свідчить, що найбільше значення взаємної індуктивності мають суміжні фази. При цьому з діаграми фазних струмів при симетричній одиночній комутації видно, що в період дії струму в фазі одночасно з ним може протікати лише струм в попередній фазі, що вимикається, або в наступній фазі, що вмикається [1, 3]. Отже, врахування взаємної індуктивності доцільне лише для суміжних фаз.

Взаємна індуктивність між суміжними фазами може бути представлена періодичною функцією, розкладеною в ряд Фур'є, гармонійний склад якого обумовлений особливостями магнітної системи ВІД

$$M_{kj} = \sum_{i=0}^{N} M_i \cos\left[ipz_2\theta - \frac{\pi(2k-1)}{m} + (k-j)\frac{\pi(z_1-z_2)}{z_1}\right],$$
 (3)

де k, j – номера фаз, причому  $j = k \pm 1$ , так як розглядаються суміжні фази; N – кількість гармонік ряду Фур'є; i – номер гармоніки; p – кількість

пар полюсів на фазу; θ – кут положення ротора; m – кількість фаз.

За умови близького до синусоїдного виду залежності  $\hat{M}(\theta)$  можна обмежитись нульовим та першим членами ряду Фур'є, які можуть бути визначені на основі мінімального та максимального значень взаємної індуктивності

$$M_{kj} = M_0 - M_1 \cos\left[pz_2\theta - \frac{\pi(2k-1)}{m} + (k-j)\frac{\pi(z_1 - z_2)}{z_1}\right], \quad (4)$$

де

$$M_0 = \frac{M_{\text{max}} + M_{\text{min}}}{2}; \qquad M_1 = \frac{M_{\text{max}} - M_{\text{min}}}{2}.$$
 (5)

Однойменне приєднання суміжних фаз до джерела живлення призводить до "послаблення" індуктивності фази завдяки ефекту взаємоіндукції, так як при цьому котушки фаз знаходяться в неузгодженому з'єднанні одна відносно іншої. З огляду на це можна зробити висновок, що вигідним з позиції врахування взаємоіндукції є різнойменне з'єднання котушок суміжних фаз, так як при цьому електромагнітний момент, що розвивається фазою, збільшується за рахунок складання магнітних потоків суміжних фаз. Для машин з непарною кількістю фаз, наприклад трифазних, це просто реалізувати, приєднавши до джерела живлення фазні обмотки, почергово змінюючи полярність. У машин з парною кількістю фаз, таке з'єднання неможливе, при цьому завжди буде як мінімум одна пара котушок, розташованих одна відносно іншої не узгоджено, що вносить асиметрію в роботу машини.

Отже, система класичних рівнянь [4], що описують електромеханічні процеси ВІД, з урахуванням взаємної індуктивності суміжних фаз може бути записана у наступному вигляді:

$$\begin{cases}
u_{k} = Ri_{k} + L_{k}(\theta, i_{k})\frac{di_{k}}{dt} + \omega \frac{\partial L_{k}(\theta, i_{k})}{\partial \theta}i_{k} \pm M_{kj}(\theta, i_{j})\frac{di_{j}}{dt} \pm \omega \frac{\partial M_{kj}(\theta, i_{j})}{\partial \theta}i_{j} \\
M_{e} = \frac{\partial L_{k}(\theta, i_{k})}{\partial \theta} \cdot \frac{i_{k}^{2}}{2} \pm \frac{\partial M_{kj}(\theta, i_{j})}{\partial \theta} \cdot \frac{i_{j}^{2}}{2} \\
\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (M_{e} - M_{c}) \\
\frac{d\theta}{dt} = \omega
\end{cases}$$
(6)

де k = 1...m – номер фази;  $j = k \pm 1$  – номера фаз, суміжних з k-ю фазою;  $u_k$ ,  $i_k$  – відповідно напруга та струм k-ї фази; R – активний опір обмотки;  $M_e$  – електромагнітний момент двигуна;  $M_c$  – статичний мо-

мент навантаження; *J* – момент інерції; ω – кутова частота обертання ротора. Знак "+" перед останніми двома доданками першого рівняння та останнім доданком другого відповідає узгодженому з'єднанню фаз.

**Подяки**. Автор статті виражає подяку своєму науковому керівнику доктору технічних наук, професору, завідуючому кафедри електромеханіки КТУ Толмачову Станіславу Трохимовичу за сприяння у виконанні роботи.

Висновки. Аналіз результатів обчислювальних експериментів свідчить про збільшення значення відносної взаємної індуктивності при збільшенні числа полюсів статора, найменше її значення має машина псевдо *U*-подібної конструкції.

Врахування взаємної індуктивності при моделюванні ВІД певним чином ускладнює його математичну модель. Враховуючи, що значення взаємної індуктивності складає 5-12% відносно власної індуктивності фази, доцільно враховувати взаємоіндукцію лише на етапі проектування машини та при необхідності детального аналізу її електромагнітних процесів. У переважній більшості інженерних розрахунків наявністю міжфазної взаємоіндукції можна знехтувати.

Список літератури: 1. *Ткачук В.І.* Електромеханотроніка: Підручник. – Львів: Вид-во Національного університету "Львівська політехніка", 2006. – 406 с. 2. *Рымша В.В., Радимов И.Н., Малеваный О.Е.* Моделирование режимов работы вентильного индукторного двигателя // Електротехніка і електромеханіка. – 2002. – № 2. – С. 60-64. **3.** *Кузнецов В.А., Кузьмичев В.А.* Вентильноиндукторные двигатели. – М.: Издательство МЭИ, 2003. – 70 с. **4.** *Голландцев Ю.А.* Вентильные индукторно-реактивные двигатели. – СПб.: ГНЦ РФ – ЦНИИ "Электроприбор", 2003. – 148 с. **5.** *Польовий С.В., Садовий О.В., Сохіна Ю.В.* Модель вентильно-індукторного двигуна з врахуванням взаємоіндукції фаз статора // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика, 2009. – С. 285-286. **6.** *Толмачев С.Т.* Специальные методы решения задач магнитостатики. – Киев: Вища школа, 1983. – 166 с.

Надійшла до редколегії 13.10.2010

## УДК 621.3

## **Л.П. ГАЛАЙКО,** канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ", Харьков

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ СТИРАЛЬНОЙ МАШИНЫ

В статті розглядається питання аналізу різних динамічних режимів вентильноіндукторного двигуна пральної машини за допомогою програми Simulink пакета програм Matlab. Наведені розроблені імітаційні моделі та результати розрахунків на цих моделях для двигуна пральної машини потужністю 90 Вт та частотою обертів 2900 об/хв.

В статье рассматривается вопрос анализа различных динамических режимов вентильно-индукторного двигателя стиральной машины с помощью программы Simulink пакета программ Matlab. Приведены разработанные имитационные модели и результаты расчетов на этих моделях для двигателя стиральной машины мощностью 90 Вт и частотою вращения 2900 об/мин.

Введение. Вентильно-индукторный привод (ВИП) (за рубежом Switched Reluctance Drive) относится к классу широко-регулируемых приводов. Для разработки качественной программы для микропроцессора контроллера этих приводов требуется проведение большого числа расчетов переходных процессов в вентильно-индукторном двигателе (ВИЛ), вхоляшем в состав ВИП, в различных режимах его работы. Наиболее просто и наглядно эти процессы можно проанализировать с помощью имитационной модели для программы Simulink пакета программ Matlab. Поставлена задача разработать дополнительные субмодели к разработанной ранее имитационной модели ВИД для переходных процессов [1, 2]. Эти субмодели должны позволить проанализировать различные способы пуска, торможения, изменения режима работы всеми способами, которые используются в вентильно-индукторном двигателе (фазовое регулирование, ограничение тока, ШИМ напряжения). Также эти субмодели должны позволить проанализировать работу ВИД при изменении нагрузки при соблюдении следующих условий: 1) постоянства скорости; 2) постоянства момента; 3) постоянства мощности.

Цель работы. Разработать субмодель для анализа переходного процесса в ВИД при изменении нагрузки, в котором должно быть обеспечено постоянство скорости с помощью фазового регулирования.

Результаты исследования. В данной работе рассматривается

ВИД для стиральной машины мощностью 90 Вт, спроектированный на базе асинхронного конденсаторного двигателя. Напряжение питания 200 В, номинальная частота вращения 2900 об/мин. Число зубцов статора/ротора – 8/6. На рис. 1 приведена основная имитационная модель [2], включающая две дополнительные субмодели, одна из которых приведена на рис. 2.



Рис.1.

Основная модель подробно описана в работе [2]. Субмодель, приведенная на рис. 2, задает закон изменения углов включения и отключения  $\Theta_{on}$  и  $\Theta_{off}$ , углов между полюсами статора и ротора, при которых включаются и отключаются транзисторы, подающие напряжение на катушки фаз. Вторая дополнительная субмодель определяет среднее значение момента на периоде и останавливает расчет при выполнении равенства среднего момента двигателя и момента нагрузки.

На рис. З приведены графики изменения скорости, момента двигателя, момента нагрузки, угла  $\Theta$  в одной из фаз при уменьшении момента нагрузки и отсутствии регулирования  $\Theta_{on}$  и  $\Theta_{off}$ . Как видно из рисунка, при этом скорость резко увеличивается. Для поддержания постоянной скорости углы  $\Theta_{on}$  и  $\Theta_{off}$  необходимо уменьшать. На рисунках 4-6 приведены графики при разных законах изменения этих углов.













ISSN 2079-3944. Вісник НТУ ''ХПІ''. 2010. № 55



**Выводы.** Анализ графиков переходных процессов позволяет выбрать рациональный закон задания углов  $\Theta_{on}$  и  $\Theta_{off}$  с точки зрения работы электромеханического преобразователя и инвертора.

Список источников информации: 1. *Galayko L.P.* Analysis different dynamic modes in simulation model of switched reluctanse motor // ICEEE-2010. 13<sup>th</sup> International Conference on Electromechanics, Electrotechnology, Electromaterials and Components. September 19-25, 2010. – Alushta, Crimea, Ukraine. – Р. 96. 2. *Галайко Л.П.* Имитационное моделирование вентильно-индукторного двигателя в переходных режимах // Вестник национального технического университета "ХПИ". – Харьков: НТУ "ХПІ". – 2005. – №48. – С. 24-27.



Галайко Лидия Петровна, доцент, кандидат технических наук. Защитила диплом инженера, диссертацию кандидата технических наук в Харьковском политехническом институте по специальности электрические машины и аппараты соответственно в 1960 и 1969 гг. Доцент кафедры "Электрические машины" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт" с 1975 г.

Научные интересы связаны с проблемами специальных электрических машин, в частности, вентильно-индукторных.

Поступила в редколлегию 7.09.2010

## УДК 621.317.4

*А.В. ГЕТЬМАН*, канд. техн. наук, зав. отделом, НТЦ МТО НАНУ, Харьков

## АНАЛИЗ МЕТОДИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ГАРМОНИК МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ЧЕТЫРНАДЦАТИ ДАТЧИКОВОЙ СИСТЕМОЙ

Показана практична можливість використання величин просторових гармонік магнітного поля старше дипольної, для оцінки методичної похибки дипольної моделі магнітного поля технічних об'єктів. Розглянута залежність методичної похибки вимірювання магнітного моменту від зміщення диполя всередині технічного об'єкта.

Показана практическая возможность использования величин пространственных гармоник магнитного поля старше дипольной, для оценки методической погрешности дипольной модели магнитного поля технических объектов. Рассмотрена зависимость методической погрешности измерения магнитного момента от смещения диполя внутри технического объекта.

Введение. Практическая необходимость повышения точности измерений обуславливает постоянный процесс создания и модернизации соответствующих средств и методик, в частности, для определения магнитных характеристик технических объектов (ТО). Традиционно в качестве основной математической модели внешнего магнитного поля ТО используется его представление в виде точечного источника – магнитного диполя, пространственное распределение магнитного поля которого однозначно описывается магнитным моментом. Поэтому на практике необходимо точное знание величины магнитного момента ТО. Однако реальное пространственное распределение ТО на расстояниях сравнимых с его габаритным размером существенно отличается от картины магнитного поля диполя. В качестве уточняющих магнитных характеристик в этих случаях используют пространственные гармоники старше дипольной или эквивалентные им точечные источники поля – мультиполи.

Кроме того, интерес к практическому определению пространственных гармоник старших степеней вызван необходимостью оценки методической погрешности измерения магнитного момента TO, присущей соответствующим измерительным средствам. В этой связи

практическая возможность определения измерительной системой гармоник старших степеней, является качественным критерием оценки методической погрешности измерения ею магнитного момента TO.

Одной из хорошо зарекомендовавших себя на практике при измерении магнитного момента ТО является система на основе 14-ти феррозондовых датчиков, расположенных на сфере, в центре которой располагают исследуемый ТО [1]. Методическая погрешность измерения магнитного момента (дипольной гармоники магнитного поля) такой системой в первом приближении может быть представлена в виде двух составляющих.

Первая составляющая обусловлена недипольным распределением внешнего магнитного поля ТО. При использовании мультипольной модели для описания поля ТО полагают, что недипольные мультиполи также расположены в центре измерительной системы и взяты с соответствующими весовыми (амплитудными) коэффициентами.

Вторая составляющая методической погрешности вызвана смещением дипольного источника магнитного момента внутри TO, относительно центра измерительной системы, совмещаемого с центром TO.

С целью оценки составляющих методической погрешности измерения магнитного момента ТО с помощью 14-ти датчиковой системы в работе проведен анализ вкладов гармоник старших степеней в результат измерения, а также исследована зависимость погрешности от величины смещения дипольного источника внутри ТО.

Постановка задачи. Будем рассматривать магнитную индукцию, создаваемую источником – ТО, расположенным внутри датчиковой системы из 14 датчиков, направления осей чувствительности которых и расположение относительно ТО показаны на рис. 1.



ISSN 2079-3944. Вісник НТУ "ХПІ". 2010. № 55

Для каждого из 14 датчиков магнитной индукции (на рис. 1 показаны стрелочками) воспользуемся представлением на основе пространственных гармоник, взятых с амплитудными коэффициентами  $g_n^m$  и  $h_n^m$ , считая  $\mu$ =1,

$$\overset{\mathbf{r}}{B} = -\mu_0 \nabla U = -\mu_0 \nabla \left( \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{R^{n+1}} \sum_{m=0}^n P_n^m (\cos \theta) \left\{ g_n^m \cos m\varphi + h_n^m \sin m\varphi \right\} \right), (1)$$

где *R*,  $\theta$  и  $\phi$  – сферические координаты соответствующего датчика магнитной индукции, согласно данным табл. 1.

	Дa	тчик	Координаты датчика								
№ да: № т	гчика, очки	Индексы в обозначении	X	Y	Ζ	R	θ	φ			
1		1x									
2	1	1y	+R	0	0	R	$\pi/2$	0			
3		1z									
4		2x									
5	2	2y	0	-R	0	R	$\pi/2$	$3\pi/2$			
6		2z									
7		3 <i>x</i>									
8	3	Зу	- <i>R</i>	0	0	R	π/2	π			
9		3z									
10		4x									
11	4	4y	0	+R	0	R	π/2	π/2			
12		4 <i>z</i>									
13	5	5z	0	0	- <i>R</i>	R	π	-			
14	6	6z	0	0	+R	R	0	-			

Таблица 1 – Декартовые и сферические координаты датчиков

Вклады пространственных гармоник в измеряемую магнитную индукцию. Вклады в напряженность магнитного поля от всех пространственных гармоник до четвертой степени центральнорасположенного источника для групп датчиков направленных по оси X, Y, Zпредставлены в табл. 2-4, соответственно. При этом вклады всех отсутствующих в табл. 2-4 гармоник в измеряемое поле соответствующим датчиком равны нулю (для  $n \le 4$ ).

		Вклад пространственной гармоники в суммарное поле, А/м											
	$\frac{g_1^1}{R^3}$	$\frac{g_2^0}{R^4}$	$\frac{g_2^2}{R^4}$	$\frac{h_2^2}{R^4}$	$\frac{g_3^1}{R^5}$	$\frac{g_3^3}{R^5}$	$\frac{g_4^0}{R^6}$	$\frac{g_4^2}{R^6}$	$\frac{h_4^2}{R^6}$	$\frac{\frac{g_4^4}{R^6}}{R^6}$	$\frac{h_4^4}{R^6}$		
$\frac{B_{1x}}{\mu_0}$	+2	-3/2	+9	0	-6	+60	$+\frac{15}{8}$	$-\frac{75}{2}$	0	+525	0		
$\frac{B_{2x}}{\mu_0}$	-1	0	0	+6	+3/2	+45	0	0	-15	0	-420		
$\frac{B_{3x}}{\mu_0}$	+2	+3/2	-9	0	-6	+60	$-\frac{15}{8}$	$+\frac{75}{2}$	0	-525	0		
$\frac{B_{4x}}{\mu_0}$	-1	0	0	-6	+3/2	+45	0	0	+15	0	+420		

Таблица 2 – Магнитное поле гармоник (датчики ориентированы по оси Х)

Таблица 3 – Магнитное поле гармоник (датчики ориентированы по оси У)

		Вклад пространственной гармоники в суммарное поле, А/м										
	$\frac{h_{\rm l}^1}{R^3}$	$\frac{g_2^0}{R^4}$	$\frac{g_2^2}{R^4}$	$\frac{h_2^2}{R^4}$	$\frac{h_3^1}{R^5}$	$\frac{h_3^3}{R^5}$	$\frac{g_4^0}{R^6}$	$\frac{g_4^2}{R^6}$	$\frac{h_4^2}{R^6}$	$\frac{g_4^4}{R^6}$	$\frac{h_4^4}{R^6}$	
$\frac{B_{1y}}{\mu_0}$	-1	0	0	-6	+3/2	-45	0	0	+15	0	-420	
$\frac{B_{2y}}{\mu_0}$	+2	+3/2	+9	0	-6	-60	$-\frac{15}{8}$	$-\frac{75}{2}$	0	-525	0	
$\frac{B_{3y}}{\mu_0}$	-1	0	0	+6	+3/2	-45	0	0	-15	0	+420	
$\frac{B_{4y}}{\mu_0}$	+2	-3/2	-9	0	-6	-60	$+\frac{15}{8}$	$+\frac{75}{2}$	0	+525	0	

Таблица 4 – Магнитное поле гармоник (датчики ориентированы по оси Z)

		Вклад пространственной гармоники в суммарное поле, А/м											
	$\frac{g_1^0}{R^3}$	$\frac{g_2^0}{R^4}$	$\frac{g_2^1}{R^4}$	$\frac{h_2^1}{R^4}$	$\frac{g_3^0}{R^5}$	$\frac{g_3^2}{R^5}$	$\frac{g_4^0}{R^6}$	$\frac{g_4^1}{R^6}$	$\frac{h_4^1}{R^6}$	$\frac{g_4^3}{R^6}$	$\frac{h_4^3}{R^6}$		
$\frac{B_{1z}}{\mu_0}$	-1	0	-3	0	+3/2	-15	0	$+\frac{15}{2}$	0	-105	0		
$\frac{B_{2z}}{\mu_0}$	-1	0	0	+3	+3/2	+15	0	0	$-\frac{15}{2}$	0	-105		
$\frac{B_{3z}}{\mu_0}$	-1	0	+3	0	+3/2	-15	0	$-\frac{15}{2}$	0	+105	0		
$\frac{B_{4z}}{\mu_0}$	-1	0	0	-3	+3/2	+15	0	0	$+\frac{15}{2}$	0	+105		
$\frac{B_{5z}}{\mu_0}$	+2	-3	0	0	+4	0	-5	0	0	0	0		
$\frac{B_{6z}}{\mu_0}$	+2	+3	0	0	+4	0	+5	0	0	0	0		

ISSN 2079-3944. Вісник НТУ ''ХПІ''. 2010. № 55

На основе данных табл. 2-4 можно оценить методическую погрешность измерения пространственной гармоники. Например, при измерении датчиком  $B_{2x}$  магнитной индукции, определяемой согласно табл. 2 формулой:

$$B_{2x} = \mu_0 \left( -\frac{g_1^1}{R^3} + 6\frac{h_2^2}{R^4} + \frac{3}{2}\frac{g_3^1}{R^5} + 45\frac{g_3^1}{R^5} - 15\frac{h_4^2}{R^6} - 420\frac{h_4^4}{R^6} \right), \tag{2}$$

значения коэффициентов  $h_2^2$ ,  $g_3^1$ ,  $g_3^1$ ,  $h_4^2$  и  $h_4^4$  могут быть использованы для оценки в первом приближении погрешности измерения дипольной гармоники  $g_1^1$ . Однако, непосредственно из анализа вкладов гармоник в измеряемые датчиками величины магнитной индукции следует, что количество гармоник, вклады которых определяют методическую погрешность, может быть существенно уменьшено при использовании суммарных показаний соответствующих пар (или четверок) датчиков. В частности, для измерения 14-ти датчиковой системой дипольной гармоники справедливы соотношения:

$$B_{1x} + B_{3x} = \mu_0 \left( 4 \frac{g_1^1}{R^3} - 12 \frac{g_3^1}{R^5} + 120 \frac{g_3^3}{R^5} \right) \quad B_{2x} + B_{4x} = \mu_0 \left( -2 \frac{g_1^1}{R^3} + 3 \frac{g_3^1}{R^5} + 90 \frac{g_3^3}{R^5} \right);$$

$$B_{1x} + B_{3x} - B_{2x} - B_{4x} = \mu_0 \left( 6 \frac{g_1^1}{R^3} - 15 \frac{g_3^1}{R^5} + 30 \frac{g_3^3}{R^5} \right);$$
(3)

$$B_{1y} + B_{3y} = \mu_0 \left( -2\frac{h_1^1}{R^3} + 3\frac{h_3^1}{R^5} - 90\frac{h_3^3}{R^5} \right) \quad B_{2x} + B_{4x} = \mu_0 \left( 4\frac{h_1^1}{R^3} - 12\frac{h_3^1}{R^5} - 120\frac{h_3^3}{R^5} \right);$$

$$B_{1y} + B_{2y} - B_{2y} - B_{4y} = \mu_0 \left( 6\frac{h_1^1}{R^3} - 15\frac{h_3^1}{R^5} + 30\frac{h_3^3}{R^5} \right);$$
(4)

$$B_{1y} + B_{3y} - B_{2y} - B_{4y} = \mu_0 \left( 6 \frac{n_1}{R^3} - 15 \frac{n_3}{R^5} + 30 \frac{n_3}{R^5} \right); \tag{4}$$

$$B_{1z} + B_{3z} = \mu_0 \left( -2\frac{g_1^0}{R^3} + 3\frac{g_3^0}{R^5} - 30\frac{g_3^2}{R^5} \right) \quad B_{5z} + B_{6z} = \mu_0 \left( 4\frac{g_1^0}{R^3} + 8\frac{g_3^0}{R^5} \right);$$
$$B_{5z} + B_{6z} - B_{1z} - B_{3z} = \mu_0 \left( 6\frac{g_1^0}{R^3} + 5\frac{g_3^0}{R^5} + 30\frac{g_3^2}{R^5} \right). \tag{5}$$

Методическая погрешность измерения магнитного момента смещенного внутри ТО дипольного источника. На рис. 2-3 представлены зависимости методической погрешности измерения системой *X*-ой проекции магнитного момента от величины перемещения по оси

Х магнитного диполя соответственно для 0,3 и 0,5 м.



Сплошная линия на графиках соответствует погрешности для диполя, имеющего только X проекцию, а прерывистая линия – случаю диполя, имеющего три одинаковые проекции на декартовые оси координат. При этом расчет магнитной индукции создаваемой смещенным диполем производился на основании представления:

$$\overset{\mathbf{r}}{B} = -\frac{\mu_0}{4\pi} \nabla \frac{\left(\overset{\mathbf{A}}{M}, \overset{\mathbf{R}}{R_i} - \overset{\mathbf{r}}{r}\right)}{\left|\overset{\mathbf{r}}{R_i} - \overset{\mathbf{r}}{r}\right|^3},\tag{6}$$

где  $r_{i}$  – центральный вектор смещения источника магнитного момента;  $R_{i}$  – вектор положения *i*-го датчика магнитной индукции на сфере R = 2,25 м.

Выводы. При измерении магнитного момента системой из 14 датчиков в методической погрешности отсутствуют вклады всех четных гармоник, а для оценки в первом приближении величины методической погрешности можно воспользоваться величиной октупольной гармоники. Графически оценена верхняя граница составляющей методической погрешности, вызванной смещением дипольного источника внутри технического объекта.

Список литературы: 1. Гетьман А.В., Зверев С.Г., Крамчанин Е.Г. Системы измерения пространственных характеристик магнитного поля технических объектов // Вестник Национального технического университета "ХПИ". – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2009. – №7". – С. 25-33.

Поступила в редколлегию 25.10.2010

### *Є.В. ГОНЧАРОВ*, мол. наук. співроб., НТУ "ХПІ", Харків

## ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО НАДПРОВІДНОГО ОБМЕЖУВАЧА СТРУМУ

В статті запропоновано використання електромагнітного обмежувача струму для захисту від короткого замикання. Розглянута конструкція та принцип дії обмежувача струму короткого замикання.

В статье предлагается использование электромагнитного ограничителя тока для защиты от короткого замыкания. Рассмотрена конструкция и принцип действия ограничителя тока короткого замыкания.

Вступ. Дуже небезпечним явищем в електромережах є виникнення аварійних струмів короткого замикання, яке спричиняє руйнацію електрообладнання. Для забезпечення захисту від струмів короткого замикання використовуються різні пристрої, такі як: вимикачі, плавкі запобіжники, традиційні струмообмежуючі реактори. За останні роки розробляються обмежувачі струму короткого замикання з надпровідними елементами.

Надпровідний обмежувач струму короткого замикання вмикається в частину мережі, яка передбачає захист від аварійних струмів. Такий пристрій має близький до нуля опір в номінальному режимі на відміну від традиційних струмообмежувальних реакторів. За рахунок використання властивостей надпровідних матеріалів можливо створити струмообмежувачі, що не мають аналогів серед традиційних пристроїв. Вмикання струмообмежувачів у певні вузли енергосистеми дозволить продовжити строк роботи комутаційної апаратури і створить умови для її поступової заміни сучасним устаткуванням.

Але для впровадження надпровідникового обмежувача струму необхідно вирішити ряд технічних задач.

**Метою роботи** є покращення параметрів існуючих надпровідних обмежувачів струму (НПОС) за рахунок конструкції, що запропонована.

За принципом дії можна виділити два класи НПОС: резистивний і індуктивний. Відповідно, до яких струм короткого замикання обмежується завдяки послідовному введенню активного або індуктивного опору у коло. Вони є базовими, на них заснована більшість інших пропонованих конструкцій, які повинні задовольняти тим же вимогам [1].

Але для ефективного використання схем заснованих на цих ти-

пах необхідно врахувати, що надпровідні елементи повинні мати як можливо більшу величину критичного струму, для запобігання руйнування надпровідних властивостей елементів. При виникненні і протіканні струму короткого замикання необхідно ефективно відводити тепло, від надпровідника, забезпечити його швидкий та однорідний перехід в нормальний стан. Після усунення аварійного струму необхідно забезпечити швидке відновлення приладу для роботи у номінальному режимі.

## Конструкція і принцип дії електромагнітного НПОС.

На рис. 1 представлена конструктивна схема обмежувача струму, яка представляє загальний вигляд приладу для увімкнення у фазу електромережі.



Рис. 1. Схематичне зображення НПОС.

НПОС зображений на рис. 1. містить: магнітопровід 1 і його від'ємну частину – якір 2, закріплений до пружин 5; основну обмотку 3, яка міститься у кріостаті 4, що розміщений на середньому стержні магнітопроводу 1.

Основна обмотка виготовлена з високотемпературного надпровідника 2-го по-

коління, кріостат в свою чергу заповнюється холодоагентом, у даному випадку азотом.

При номінальному режимі роботи мережі струм протікає по основній обмотці 3 обмежувача струму короткого замикання. З огляду того, що обмотка виготовлена з ВТНП проводу 2-го покоління який, при охолодженні до температури відповідній надпровідному стану (~77 К), не має опору, прилад не має активних втрат на нагрів. Магнітопровід 1 знаходиться у розімкненому стані, завдяки повітряним проміжкам у магнітопроводі котушка 3 має незначну індуктивність.

При виникненні короткого замикання магніторушійна сила котушки 3 зростає, а отже зростає магнітний потік у магнітопроводі, відповідно зростає електромагнітна сила, яка притягує якір 2 до магнітопроводу 1. Таким чином магнітний опір магнітопроводу 1 зменшується, а індуктивний опір котушки 3 зростає, що в свою чергу і обмежує струм короткого замикання [2, 3].

При КЗ котушка повинна зберігати надпровідність, тоді номіна-

льна напруга буде дорівнювати падінню напруги на обмежувачі струму  $U_{\rm H} = X_L I_{\rm K3} = 4,44 \, f \, w B_{\rm K3} \, S_{\rm oc}$ .

Для того, щоб при зростанні струму КЗ індукція осердя не опинилась в зоні насичення ( $B_{\max}$ ), приймаємо  $B_{K3} = (0,8...0,85)B_{\max}$  для прийнятного матеріалу осердя.

$$S_{\hat{1}\hat{1}} = \frac{U_{\hat{1}}}{4,44 f w B_{\hat{1}C}},$$

де  $S_{oc}$  – площина перерізу осердя, яка визначає його розміри і масу рухомого якоря ( $M_{g}$ ); w – кількість витків визначає розміри ВТНП котушки і, відповідно, кріостата; f – частота коливань.

3 іншого боку, кількість витків визначається початковими умовами протягування якоря:

$$B_{\delta} = \mu_0 H \approx \mu_0 \frac{w I_{\text{HOM}}}{2\delta};$$
$$w = \frac{2 \delta B_{\delta}}{\mu_0 I_{\text{HOM}}},$$

де  $m_0$  – магнітна стала; H – напруженість магнітного поля;  $I_{\text{ном}}$  – номінальний струм;  $B_{\delta}$  – індукція у повітряному зазорі;  $\delta$  – повітряний проміжок між якорем і осердям.

Приймаємо  $2B'_{\delta}S'_{oc} = B_{\delta}S_{oc}$  ( $2S'_{oc} = S_{oc}$ ), де  $B'_{\delta}$  – індукція у повітряних зазорах бокових стержнів,  $S'_{oc}$  – площина перерізу бокових стержнів. Початкова електромагнітна сила протягування якоря:



Площина осердя ( $S_{oc}$ ) і кількість витків (w) є визначальними для розрахунку розмірів обмежувача струму.

Висновки. Завдяки використанню такого НПОС можна підвищити ефективність та надійність захисту електричної мережі та електроустаткування від струмів КЗ, а також знизити енерговитрати шляхом використання високотемпературної надпровідникової обмотки з проводу 2-го покоління, який перевершує параметри попередніх і має більшу критичну щільність струму [4]. Такий підхід дозволяє виключити перехід ВТНП обмотки з надпровідного до нормального стану, що видаляє недоліки та негативні ризики пов'язані з цим.

Використання НПОС в енергетичних системах дозволить зменшити кількість і параметри пристроїв та апаратів захисту електромережі.

Список джерел інформації: 1. Тенденції розвитку і використання високотемпературних надпровідникових струмообмежувачів / Данько В.Г., Гончаров *С.В., Лисенко Л.І.* та ін. // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Тем. вип.: Прилади та методи неруйнівного контролю. - Харків: НТУ "ХПІ". – 2006. – № 38. – С. 35-44. 2. Електромагнітний обмежувач струму короткого замикання з високотемпературною надпровідниковою обмоткою [Текст]: патент 48214 : МКЗ НО2Н 9/00 / Данько В.Г., Гончаров С.В.; власник патенту Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут". -№ и 200909564; заявл. 18.09.09; опубл. 10.03.10, Бюл. № 5. – 4 с. 3. Данько В.Г., Гончаров С.В. Електромагнітний надпровідний обмежувач струму короткого замикання / Данько В.Г., Гончаров С.В. // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: XVIII міжн. наук.практична конф. (MicroCAD-2010), 12-14 травня 2010 р.: Тези доп. / НТУ "ХПІ" – Харків, 2010. – С. 160. 4. Study of HTS Wires at High Magnetic Fields/ D. Turrioni, E. Barzi, M.J. Lamm et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. - 2009. - Vol. 19. - № 3. - P. 3057-3060.



**Гончаров Євген Вікторович**. Захистив диплом інженера в Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" за фахом електричні машини й апарати в 2004 р. Молодший науковий співробітник кафедри загальної електротехніки НТУ "ХПІ".

Наукові інтереси пов'язані з проблемами використання високотемпературної надпровідності в електричних пристроях.

Надійшла до редколегії 25.09.2010

## УДК 622. 276.6

*А.Г. ГУРИН*, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПІ", Харьков *С.П. МОСТОВОЙ*, канд. физ.-мат. наук, доц., НТУ "ХПИ", Харьков *В.В. ПИДАШОВ*, канд. техн. наук, НТУ "ХПИ", Харьков *Н.С. ЯРМАК*, канд. техн. наук, НТУ "ХПИ", Харьков

## СЕЙСМОРАЗВЕДОЧНЫЙ КОМПЛЕКС ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ЗАПАСОВ НЕФТИ И ИНТЕНСИФИКАЦИИ ЕЕ ДОБЫЧИ ИЗ ДЕЙСТВУЮЩИХ СКВАЖИН

В статті розглянуто сейсмоакустичний комплекс для підвищення дебіту діючих свердловин шляхом одночасної дії на продуктивний пласт поверхневими та свердловинними випромінювачами електродинамічного та електрогідравлічного типів. Запропоновано перед цим визначати запаси нафти у районі колектора свердловини сейсмоакустичним методом, шляхом сканування засвердловинного простору направленим випромінюванням.

В статье рассмотрен сейсмоаккустический комплекс для повышения дебита действующих скважин путем одновременного действия на продуктивный пласт поверхностными и скважинными излучателями электродинамического и электрогидравлического типов. Предложено перед этим определять запасы нефти в районе коллектора скважины сейсмоакустическим методом, путем сканирования заскваженного объема направленным излучением.

Введение. В настоящее время все больше внимания уделяется интенсификации добычи нефти из действующих скважин путем акустического воздействия на продуктивный пласт электрогидравлическими, электродинамическими, взрывными методами [1-4] как с поверхности земли, так и со скважин. Это позволяет увеличить приток нефти в зону коллектора. Однако, при этом не проводится контроль остаточных запасов в околоскважинном пространстве, отсутствует предварительное изучение согласования спектра излучаемых ударных импульсов в затрубное пространство зоны коллектора. В статье предлагается для этих целей использовать сейсмоакустический комплекс, включающий поверхностные электродинамические излучатели направленного действия в сочетании с электрогидравлическими излучателями направленного действия, расположенными в обсадной колонне. Это позволяет, кроме перечисленных работ при обслуживании скважины, проводить доразведку запасов нефти, выбирать необходимый режим акустической обработки скважины. Преимущество данного

способа акустической обработки нефтяного пласта заключается в том, что наряду с использованием поверхностных излучателей сейсмиче-ских колебаний направленного действия, в скважине располагаются излучатели на глубине исследуемого пласта. Возможность разместить в скважине излучатели позволяет усилить отраженный импульс, т.е. значительно повысить разрешенность полученных сейсмограмм, а их расшифровки позволят установить амплитуду и спектр акустического сигнала, воздействующего на пласт. Это даст возможность усилить отраженный сигнал от нефтеносного пласта и при расшифровке сейс-мограмм получить уточненные сведения о наличии запасов нефти в районе расположения скважины, после чего проводить процесс ее об-работки акустическим сигналом, согласованным с механическими па-раметрами скважины. раметрами скважины.

раметрами скважины. Существующие методы интенсификации добычи нефти с помо-щью электрофизических установок основаны на создании условий акустического воздействия на продуктивный пласт с поверхности зем-ли или с действующих нефтяных скважин. Применение поверхностных излучателей связано с разработками

в 1980-1990 годы мощных электродинамических устройств для сейс-мического просвечивания Земли, поиска нефтяных месторождений на больших глубинах [5-8]. Работы ИФЗ АН РФ и Сибирского отделения

больших глубинах [5-8]. Работы ИФЗ АН РФ и Сибирского отделения ВЦ АН РФ показали возможность интенсифицировать приток нефти в действующие скважины при слабых воздействиях на продуктивный пласт. Сильное затухание акустического сигнала в верхних слоях зем-ного полупространства вызывает необходимость увеличивать мощ-ность поверхностных излучателей или создавать излучающие устрой-ства, работающие в скважинах на глубине расположения коллектора. Большой объем исследований по использованию электрогидрав-лического эффекта выполнен в Институте импульсных процессов и технологий НАН Украины, где проведены научно-исследовательские работы по изучению стабильности разряда в глубоких скважинах, раз-работаны методики экспериментальной оценки эффективности излу-чающих устройств по амплитуде импульса давления, сообщаемого стенкам разрядной камеры. На экспериментальном производстве ин-ститута изготовлены электроразрядные погружные установки "Скифстенкам разрядной камеры. На экспериментальном производстве ин-ститута изготовлены электроразрядные погружные установки "Скиф-4М", "Скиф-100", "Скиф-140", с помощью которых проведена обра-ботка нефтяных скважин на месторождениях Татарстана и Западной Сибири с целью повышения их дебита. Дальнейшее развитие устрой-ства с электрогидравлическими и взрывными излучателями акустиче-ских импульсов получили в трудах А.А. Щербы и К.В. Дубовенко [1]. Недостатком проведенных работ является направленность их воз-действия на стенки трубы в зоне коллектора с целью ее очистки от

закупоривания илистыми веществами и продуктами бурения. Цель и задачи исследования. В данной работе была поставлена цель, во-первых, изучить остаточный запас нефти в зоне коллектора, получить с помощью геофизических методов наибольший отраженный сигнал от продуктивного пласта путем излучения акустического сигнасигнал от продуктивного пласта путем излучения акустического сигна-ла, как с поверхности земли, так и со скважины. Затем, воздействовать на пласт акустическими импульсами с частотными параметрами, согла-сованными с ним. Если вопросы возбуждения направленного акустиче-ского излучения с поверхности земли изучены довольно широко, то на-правленное излучение со скважины требует дополнительного исследо-вания [3]. Для исследования совместной работы поверхностных и сква-жинных излучателей был разработан сейсморазведочный комплекс, исследование отдельных элементов которого было проведено в лабораторных условиях [9].



ых условиях [э]. Блок-схема комплекса. Блок-схема комплекса приведена на рис. 1. Он состоит из группы электроди-намических поверхностных излучателей 1, расположенных на поверхности земли  $h_{1}$  расположенных на поверхности земли возле скважины, и электрогидравличе-ских скважинных излучателей 2, распо-ложенных вдоль внутренней стенки скважины 3 в зоне коллектора. Каждая группа излучателей срабатывает при по-даче управляющих импульсов от много-канальных многоэлементные генерато-ров 4 и 5 импульсов тока, допускающих задержку каждого канала на время  $\Delta t$ . Микропроцессор 6 устанавливает изме-нение интервала  $\Delta t$  в зависимости от сейсмометрической информации, принятой сейсмостанцией 7 от сейс-моприемников 8.

моприемников 8.

моприемников 8. Работает комплекс следующим образом. С помощью группы из-лучателей 1, изменяя  $\Delta t$  их включения и регулируя амплитуду энер-гии излучения, достигают максимального значения отраженного сиг-нала от нефтенасыщенного пласта. Затем включают многоэлементный генератор импульсов тока 4, позволяющий подавать импульсы с за-держкой  $\Delta t$  включения скважинных излучателей. Сканируя диаграм-мой направленности скважинных излучателей, добиваются усиления отраженного сигнала от исследуемого пласта. При положительной оценке наличия нефти работу излучателей переводят в стационарный режим сейсмоакустического влияния, что дает дополнительный при-ток нефти в коллекторную зону скважины.

Определение параметров акустического импульса одиночного излучателя поверхностного типа и работа группы излучателей в режиме направленного излучения. Конструкция и схема включения электродинамического излучателя подробно описана [6]. При разряде конденсаторной батареи на электродинамический излучатель, состоящий из двух последовательно встречно включенных плоских катушек, или на электродинамический излучатель магнитоимпульсного типа, в котором одна из катушек заменена мембраной из электропроводного материала, позволяет получить широкий спектр акустических колебаний. На поверхности земли в диапазоне 20÷200 Гц, в водонефтяной смеси – 0,1÷6,0 кГц. Возможность изменять параметры разрядной цепи конденсаторной батареи и изменять схемы включения одиночных излучателей позволяют регулировать параметры акустического импульса, изменяя параметры импульса разрядного тока. Так как расчет тока в такой цепи затруднителен из-за большого числа нелинейных элементов, выполнить его можно по упрощенной "свернутой" схеме замещения. Процесс свертывания в данном случае возможен при следующих допущениях: сопротивления и индуктивности катушек излучателя намного превышают собственные индуктивности и сопротивления остальных элементов разрядной цепи и их значением можно пренебречь, длительность процесса разряда батареи намного превышает время пробега электромагнитной волны по кабельной ошиновке и ее можно заменить сосредоточенными параметрами. Тогда уравнение Кирхгофа для разрядной цепи будет иметь вид:

$$\frac{d\Phi}{dt} + R_{\Im} \cdot i(t) + \frac{1}{C_{\Im}} \int_{0}^{t} i(t)dt = 0.$$
<sup>(1)</sup>

Напряжение на конденсаторе уравновешивается падением напряжения на активном сопротивлении контура  $R_{3}i$  и внутренней ЭДС  $d\phi$ 

 $\frac{d\varphi}{dt}$ . Величина  $\varphi$  отражает полное потокосцепление системы катушек

излучателя. Учитывая, что

$$\boldsymbol{\varphi} = \boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{x}, t) = L_{\dot{\mathbf{Y}}}(\boldsymbol{x}) \cdot \boldsymbol{i}(t) \tag{2}$$

и то, что расстояние между катушками является функцией времени, уравнение примет вид:

$$L_{\Im}(x)\frac{di}{dt} + k_{\rm CB}\frac{dx}{dt}i(t) + R_{\Im}i(t) + \frac{1}{C_{\Im}}\int i(t)dt = 0, \qquad (3)$$

где  $k_{\rm CB} = \frac{dL_{\Im}(x)}{dx}$ ; x - изменение расстояния между катушками при

электродинамическом взаимодействии.

Решение уравнения (3) сводится к решению нелинейного интегро-дифференциального уравнения при начальных условиях:

$$i(0) = 0$$
;  $u_0(0) = u_c$ .

Так как частота разрядного тока намного выше частоты собственных колебаний механической системы, то изменением x при определении тока можно пренебречь. Тогда уравнение примет вид:

$$L_{\Im}(x)\frac{di}{dt} + R_{\Im}i(t) + \frac{1}{C_{\Im}}\int_{0}^{t}i(t)dt = v_{0}.$$
 (4)

Решение такого уравнения для случая  $R_{\acute{Y}} < 2\sqrt{L_{\acute{Y}}/C_{\acute{Y}}}$  известно и имеет вид:

$$i(t) = \frac{\upsilon_0}{w L_{\dot{Y}}(x)} e^{-\delta t} \sin wt , \qquad (5)$$

где  $w = \sqrt{\sqrt{\frac{1}{L_{\Im}(x)C_{\Im}}} - \frac{R_{\Im}^2}{4L_{\Im}^2(x)}}; \ \delta = \frac{R_{\Im}}{2L_{\Im}(x)}.$ 

Значения параметрам уравнения (5) определим следующим образом. Так как одиночный излучатель представляет собой систему двух плоских (дисковых) катушек, индуктивность определяется как

$$L = \frac{\mu_0}{8\pi} w^2 \cdot d \cdot k_1, \tag{6}$$

где  $\mu_0$  - магнитная постоянная; w - число витков катушки; d - средний диаметр витка;  $k_1$  - коэффициент, зависящий от отношения  $\rho/d$ ; r - ширина намотки катушки, мм;  $\rho = r/d$ .

Взаимоиндуктивность соосных одинаковых плоских катушек определяется как

$$M = \frac{\mu_0}{\pi} w^2 \cdot d \cdot k_2 , \qquad (7)$$

где  $k_2$  - коэффициент, зависящий от соотношений  $\rho = r/d$  и  $\xi = x/d$ .

Значения коэффициентов для конкретных размеров катушек можно определить по методике, приведенной в [7].

Эквивалентное сопротивление в случае двух плоских катушек  $R_{\ni} = R_1 + R_2 = 2R_1$  и  $R_1 = R_2$  при длительности импульса тока 10÷20

мс для прямоугольного провода можно определить без учета скин-эффекта как

$$R_1 = \rho l/S \,, \tag{8}$$

где  $\rho$  - удельное сопротивление меди, Ом·мм<sup>2</sup>/м; l - длина провода намотки, м; *S* - сечение шины, мм<sup>2</sup>.

Протекание тока по двум последовательно встречно включенным катушкам вызывает импульс силы

$$F = i^2 \left( t \right) \frac{dL_{\mathcal{Y}}}{dx} \,. \tag{9}$$

Если принять, что инертная масса, прижимающая катушки к грунту, намного больше массы подвижной катушки *m*, то уравнение движения этой массы в функции времени

$$m\frac{d^{2}x}{dt^{2}} + \eta\frac{dx}{dt} + kx(t) = \frac{bv_{0}^{2}}{L_{2}^{2}(x_{0})\omega^{2}}e^{-\delta t} - \frac{bv_{0}^{2}}{L_{2}(x)\omega^{2}}e^{-\delta t}\cos\omega t, \qquad (10)$$

где m - масса подвижной катушки с учетом присоединенной массы грунта;  $\eta$  - коэффициент, учитывающий рассеивание излучаемой энергии в виде продольных, поперечных и поверхностных волн сжатия; k - коэффициент жесткости грунта; b - коэффициент, учитывающий изменение эквивалентной индуктивности системы "катушка-катушка" при перемещении подвижной катушки относительно услов-

ной поверхности грунта, 
$$b = \frac{dL_{\mathcal{P}}}{dx}$$
.

Совместное решение уравнений, учитывающих электрические и механические процессы, получим в виде суммы общих и частных решений уравнений (4) и (10):

 $x(t) = C_1 e^{\alpha t} \cos \beta t + C_2 e^{\alpha t} \sin \beta t + C_3 e^{-\alpha t} + e^{-\alpha_1 t} (C_4 \cos 2\omega t + C_5 \sin \omega t),$  (11) где  $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5$  - постоянные коэффициенты, определяемые методом неопределенных коэффициентов.

Получение направленного излучения группы излучателей. С целью определения возможности создания направленного излучения были исследованы групповые источники (от 1 до 4) одиночных излучателей. Существующие теории допускают линейную суперпозицию отдельных волновых полей, когда излучаемая энергия эквивалентна сумме независимых излучателей [3, 8]. Коэффициент направленности излучения группового источника определяется как отношение плотности энергии на градус излучаемой энергии:

$$D(\theta, \varphi, f) = \frac{E(\theta, \varphi, f)}{E(f)/4\pi} .$$
(12)

Для наиболее простого случая двух идентичных излучателей с частотным спектром акустического импульса A(f), находящихся на расстоянии d, плотность излучаемой энергии определяется как

$$E(f) = \frac{16\pi}{\rho c} \left[ \int_{0}^{+\infty} |A(f)|^2 df + \int_{0}^{\infty} |A(f)|^2 \frac{\sin(2\pi f d/c)}{2\pi f d/c} df \right],$$
 (13)

где  $E(\theta, \phi, f)$ ,  $\tilde{E}(f)$  - плотность энергии излучения и ее среднее значение в направлении излучения; A(f) - частотный спектр акустического сигнала электродинамического источника; d - расстояние между излучателями, м; c - скорость распространения акустической продольной волны в среде.

Если излучение колебаний одиночного источника в группе осуществляется с некоторым временным запаздыванием, то в пространстве формируется коническая волна, ограниченная двумя полусферами. В этом случае прожекторная зона акустической волны давления наклонена под углом, равным наклону фронта волны. Строго определенная ориентация сейсмических лучей в пространстве за пределами прожекторной зоны волны предопределяет свойства группового источника по выделению волн с учетом направления их распространения. Благодаря этому свойству можно направлять возбуждаемые колебания в тех направлениях, откуда предусматривается регистрация полезных волн. Экспериментально определено, что при размещении излучателей на дневной поверхности полупространства наиболее эффективные расстояния 10÷15 м, при которых четкость записи и подавление поверхностных волн максимально.

Для получения направленного излучения со скважины необходимо исключить влияние ударного импульса каждого излучателя на срабатывание последующего, т.е. установить расстояние между излучателями по глубине.

Формирование направленного излучения в зоне коллектора. Для составления дифференциальных уравнений колебаний трубы необходимо сделать ряд допущений:

- труба представляется упругим объектом;
- во время подачи ударного импульса ось трубы совершает продольно – угловые колебания, а стенки – упругие колебания;
- закрепление трубы в грунте консольное.

Так как подаваемый ударный импульс однократного действия, то

будем рассматривать затухающие колебания.

Рассмотрим консольно закрепленную трубу, которая под действием внешнего воздействия совершает сложные колебания: продольно - угловые и упругие колебания стенок.

Эти колебания описываются рядом уравнений, при составлении которых необходимо учитывать, что масса трубы и действующее внешнее воздействие распределяются по ее длине.

Продольно-угловые колебания трубы описываются дифференциальным уравнением:

$$I_o \mathcal{U}(t) - \int_0^l m(x) \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} dx = F(x,t) , \qquad (14)$$

где y(x,t) – отклонение точек оси канала трубы от недеформируемого состояния; x – координата соответствующей точки отклонения; **4**(t) – обобщенная координата, характеризующая угловые ускорения трубы; m(x) - погонная масса трубы;  $I_0$  – момент инерции трубы относительно места закрепления; l – длина трубы; F(x, t) – распределенное по длине трубы внешнее возмущение.

Функция *у*(*x*,*t*), входящая в уравнение, удовлетворяет уравнению колебаний упругой балки:

$$m(x) \mathcal{P}(t) + m(x) \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} + EI(x) \frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial x^4} + \zeta EI(x) \frac{\partial^5 y(x,t)}{\partial^4 x \partial t} = F(x,t) , (15)$$

где I(x) – изгибная жесткость трубы; E – модуль продольной упругости 1 рода;  $\varsigma$  – коэффициент внутреннего демпфирования материала трубы;

Функцию y(x,t) можно представить в виде:

$$y(x,t) = \sum_{i=1}^{n} T_i(t) , \qquad (16)$$

где n – число учитываемых форм упругих колебаний ствола;  $T_i(t)$  – амплитуды упругих колебаний стенок трубы.

Подставим (1), (2) и (3):

$$I_{o} \#(t) - \sum_{i=1}^{n} \prod_{l=1}^{n} (t) \int_{0}^{l} m(x) dx = F(x,t);$$
(17)

$$m(x) \mathcal{P}(t) + m(x) \sum_{i=1}^{n} (x) T_{i}^{\mathcal{P}}(t) + EI(x) \sum_{i=1}^{n} (x) T_{i}(t) + \zeta EI(x) \sum_{i=1}^{n} (x) T_{i}^{\mathcal{P}}(t) = F(x, t),$$
(18)

где  $\mathbf{F}_{i}(t)$  - обобщенная координата, характеризующая ускорения стенок трубы;  $\mathbf{F}_{i}(t)$  - обобщенная координата, характеризующая скорости упругих колебаний стенок.

Обе части (18) проинтегрируем в пределах от 0 до 1:

$$\mathbf{P}(t) \int_{0}^{l} m(x) dx + \sum_{i=1}^{n} \mathbf{P}_{i}^{\mathbf{P}}(t) \int_{0}^{l} m(x) dx + E \sum_{i=1}^{n} T_{i}(t) \int_{0}^{l} I(x) dx + \zeta E \sum_{i=1}^{n} \mathbf{P}_{i}^{\mathbf{P}}(t) \int_{0}^{l} I(x) dx = \int_{0}^{l} F(x,t) dx.$$

$$(19)$$

С учетом ортогональности собственных форм упругих колебаний уравнения продольно-угловых и упругих колебаний трубы (14) и (15) принимают вид:

$$I_{o} (t) - P_{j}(t) \sum_{i=1}^{n} \int_{0}^{l} m(x) dx = F(x,t);$$

$$(t) \int_{0}^{l} m(x) dx + P_{j}(t) \int_{0}^{l} m(x) dx + \zeta P_{j}(t) E_{j}^{l} I(x) dx + (20)$$

$$+ T_{j}(t) E_{j}^{l} I(x) dx = \int_{r}^{r+l} F(x,t) dx \quad j = \overline{1,n}.$$

Решение этого уравнения позволило определить длину участка



трубы, на котором происходит затухание колебаний от воздействия одиночного электрогидравлического разряда. При амплитуде ударного импульса близкого к пластовому давлению и длительностью фронта порядка 5 мкс длина колеблющегося участка составляет не более 7 см от центра удара (рис. 2).

При временах задержки  $\Delta t$  между одиночными разрядами от  $10^2$  до  $10^3$  мкс этого расстояния достаточ-

но, чтобы исключить влияние разрядов в распределенной по длине коллектора группе излучателей при формировании направленного воздействия на пласт.

**Выводы.** 1. Рассмотрена возможность создания сейсмоакустического комплекса направленного действия для воздействия на нефтеносный пласт как с поверхности земли, так и со скважины с целью повышения притока нефти в зону коллектора.

2. С целью повышения эффективности акустического воздействия предложено первоначально определить с помощью комплекса остаточные запасы нефти известными методами сейсморазведки, а затем воздействовать на пласт направленным излучением со спектром частот, при котором получен максимальный отраженный сигнал.

3. Показано, что для создания направленного излучения со скважины при длине коллектора 2÷3 м длительность ударного импульса при электрогидравлическом разряде должна быть порядка 7÷10 мкс.

Список литературы: 1. Дубовенко К.В., Курашко Ю.И., Швец И.С., Онищенко Л.И. Разрядно-импульсное оборудование для увеличения дебита нефтяных и водозаборных скважин // Вестник Национального технического университета "ХПИ". Тем. вып. "Электроэнергетика и преобразовательная техника". - Харьков: НТУ "ХПИ". - 2002. - №7. - Т. 1. - С. 96-103. 2. Жекул В.Г., Поклонов С.Г., Трофимова Л.П., Швец И.С. Электроразрядная обработка скважин и пути повышения ее эффективности // Изв. Вузов. Сер. "Нефть и газ". - 2002. - №4. - С. 4-12. 3. Колосов В.М. Применение приповерхностных источников возбуждения при остронаправленном излучении сейсмической энергии в

нижнее полупространство // Использование приповерхностных источников в сейсморазведке. - Саратов, 1987. - С. 32-38. 4. Гурин А.Г. Автоматизированные системы формирования мощных сейсмических сигналов на базе электродинамических источников // Тр. МНТК "Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье", 12-14 мая 1997 г. - Харьков-Мишкольц, 1997. - Ч. 5. - С. 251-253. 5. Гурин А.Г. Мостовой С.П., Ярмак О.Н. и др. Особенности формирования импульса давления в зоне коллектора обсадной колонны нефтяной скважины при действии электрогидравлического разряда // Вестник Национального технического университета "ХПИ". - Харків: НТУ "ХПІ". - 2009. - № 27. - С. 47-54. 6. Видря А.В., Гонтар Ю.Г., Гурин А.Г., Ярмак О.М. Застосування методу електромеханічних аналогій для розрахунку параметрів імпульсу тиску електродинамічного поверхневого випромінювача сейсмічних коливань // Вестник Национального технического университета "ХПИ". - Харків: НТУ "ХПІ". - 2009. - №44. -С. 25-42. 7. Мостовой С.П., Бяков Ю.А., Гурин А.Г. О выборе элементов электродинамических фазированных антенных решеток // Труды НТК "Комплексные геологогеофизические исследования мирового океана", 1988. - С. 67-68. 8. Хораз И.И. Групповые управляемые источники упругих волн в сейсморазведке. - Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1984. - 272 с. 9. Пат. 40339, Україна, МПК Е 21В 43/16. Спосіб інтенсифікації видобутку нафти / А.Г. Гурин, С.П. Мостовий, О.М. Ярмак. - № и2008 08662. Заявлено 01.07.2008. Опубл. 10.04.2009. – Бюл. №7. - 3 с.

Поступила в редколлегию 24.09.10

## УДК 621.313.2

*Б.А. ЕГОРОВ*, канд. техн. наук, доц. НТУ "ХПИ", Харьков *А.М. МАЛЕЕВ*, магистр, НТУ "ХПИ", Харьков

## ПРОБЛЕМА РАСЧЕТА МАГНИТНОГО ПОЛЯ ВЕНТИЛЬНЫХ ИНДУКТОРНО-РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЭТОЙ ПРОБЛЕМЫ

Розглядається проблема розрахунку магнітного поля вентильних індукторнореактивних двигунів у зв'язку з несінусоїдальністю розподілення поля у повітряному зазорі та конфігурацією магнітопровода.

Рассматривается проблема расчета магнитного поля вентильных индукторнореактивных двигателей в связи с несинусоидальностью распределения поля в воздушном зазоре и конфигурацией магнитопровода.

**Введение.** Достоинства вентильных индукторно-реактивных двигателей (ВИРД), которые выделяют его среди остальных электромеханических преобразователей:

– простая конструкция. Ротор и статор выполнены в виде пакетов листового магнитомягкого материала. На роторе ВИРД отсутствуют обмотки и постоянные магниты. Фазные обмотки находятся только на статоре. Для уменьшения трудоемкости катушки обмотки якоря могут изготавливаться отдельно, а затем надеваться на полюсы статора;

– высокая ремонтопригодность. Простота обмотки якоря повышает ремонтопригодность ВИРД, так как для ремонта достаточно сменить вышедшую из строя катушку. Отсутствует механический коммутатор. Управление электромеханическим преобразователем электропривода/генератора осуществляется с помощью высокоэффективных силовых полупроводниковых элементов – IGBT или MOSFET (HEXFET) транзисторов, надежность которых существенно превышает надежность любых механических деталей, например: коллекторов, щеток, подшипников;

– отсутствие постоянных магнитов. ВИРД не содержит постоянных магнитов ни на роторе, ни на статоре, при этом он успешно конкурирует по характеристикам с вентильными электрическими двигателями с постоянными магнитами (ВЭДПМ). В среднем, при одинаковых электрических и весогабаритных характеристиках ВИРД имеет

в 4 раза меньшую стоимость, значительно большую надежность, более широкий диапазон частот вращения, более широкий диапазон рабочих температур. Конструктивно, по сравнению с ВЭДПМ, ВИРД не имеет ограничения по мощности (практически, мощность ВЭДПМ ограничивается пределом около 20-40 кВТ). Вентильные индукторнореактивные электродвигатели/генераторы свободны от всех этих недостатков;

 - отсутствие обмотки. Ротор не имеет обмотки и выполнен в виде пакета листового магнитомягкого материала, например из обычной электротехнической стали;

– малое количество меди. На изготовление ВИРД требуется в среднем 2-3 раза меньше меди, чем для коллекторного электродвигателя такой же мощности, и в 1,3 раза меньше меди, чем для асинхронного электродвигателя. тепловыделение происходит в основном только на статоре, при этом легко обеспечивается герметичная конструкция, воздушное или водяное охлаждение. В рабочем режиме не требуется охлаждение ротора. Для охлаждения ВИРД достаточно использовать наружную поверхность статора. Высокие массогабаритные характеристики. В большинстве случаев ВИРД может быть выполнен с полым ротором. Толщина спинки ротора при этом должна быть не менее половины ширины полюса. Подбором количества полюсов статора и ротора могут быть оптимизированы массогабаритные характеристики электродвигателя/генератора, его мощность при заданном моменте и диапазоне частоты вращения;

– низкая трудоемкость. Простота конструкции ВИРД снижает трудоемкость его изготовления. В сущности, его можно изготовить даже на не специализирующемся в области электромашиностроения промышленном предприятии. Для серийного производства ВИРД требуется обычное механическое оборудование – штампы для изготовления шихтованных сердечников статора и ротора, токарные и фрезерные станки для обработки валов и корпусных деталей. Трудоемкие и сложные в технологическом отношении операции, например изготовление коллектора и щеток коллекторного электродвигателя или заливка клетки ротора асинхронного двигателя, здесь отсутствуют. По предварительным оценкам трудоемкость изготовления ЭМП вентильного реактивного электродвигателя составляет на 70 % меньше трудоемкости изготовления коллекторного и на 40 % меньше трудоемкости изготовления асинхронного электродвигателя;

- *гибкость компоновки*. Простота обмотки якоря и отсутствие обмотки и магнитов на роторе обеспечивает ВИРД высокую гибкость

компоновки

**Проблема**. Проблема расчета магнитного поля ВИРД заключается в том, что невозможно получить значение электромагнитного момента традиционными методами расчета поля. На данном этапе необходимо сначала задаваться значением момента, а потом проверять его либо с помощью системы дифференциальных уравнений, либо с помощью моделирования магнитного поля в программных продуктах типа ELCUT, FEMM, ANSYS.

Магнитное поле в пусковом режиме ВИРД является нестационарным и плоскопараллельным при допущении о невлиянии магнитных полей лобовых частей обмоток на величину момента. Для решения подобных задач целесообразно использовать программный пакет FEMM.

Исходными данными для расчета магнитного поля в ВИРД являются: геометрические размеры поперечного сечения электрической машины; граничные условия на внешней границе модели и на внутренних границах раздела сред; магнитные и электрические свойства материалов и сред; взаимное расположение осей зубцов статора и ротора, способ включения обмоток и величина плотности тока в катушке.

При моделировании магнитных полей ВИРД применяется разноименное включение соседних катушечных обмоток по расточке статора. Из катушечных обмоток формируются фазные обмотки. Количество одновременно работающих фаз определяется вентильным коммутатором ВИРД. Одновременно может подключаться как одна фаза, так и две. Гипотетическим случаем является включение сразу всех фаз – в таком случае электромагнитный момент будет равен 0 при любом угловом положении ротора.

Магнитные потоки и проводимости определяются для двух фиксированных положений ротора – d и q. Величина магнитной проводимости по оси d зависит от насыщения магнитной цепи, а при известной проводимости, а также индуктивности и взаимоиндуктивности обмоток, с помощью теории цепей можно вычислить токи и момент электрического двигателя.

Если традиционная схема магнитного расчета выглядит так:

$$A \Rightarrow B \Rightarrow H \Rightarrow \begin{vmatrix} \hat{O}_J(\Theta, I) \\ F_J \end{vmatrix} \Rightarrow \Lambda_J(\Theta, I) \Rightarrow L(\Theta, I) \Rightarrow \begin{vmatrix} M(\Theta, I) \\ W \end{vmatrix}$$

то для ВИРД схему расчета рекомендуется немного изменить:

$$A \Rightarrow B \Rightarrow H \Rightarrow \begin{vmatrix} M(\Theta, I) \\ W \end{vmatrix} \Rightarrow \begin{vmatrix} \hat{O}_J(\Theta, I) \\ F_J(\Theta, I) \end{vmatrix} \Rightarrow \Lambda_J(\Theta, I) \Rightarrow L(\Theta, I).$$
# Пути решения проблемы.

Оптимизация параметров зубцовой зоны ВИРД выполняется по величине пускового момента, который можно определить непосредственно на основе локальных параметров магнитного поля В и Н. Такой подход сокращает время моделирования и объем вычислительных операций.

После определения локальных параметров магнитного поля в каждой точке внутреннего пространства можно вычислить момент, действующий на статор или ротор, при фиксированном взаимном угловом положении статора и ротора. Для получения распределения момента по углу поворота ротора необходимо выполнить серию расчетов при различных угловых положениях ротора в пределах зубцового деления. Полученная зависимость  $M = f(\theta)$  является кривой синхронизирующего момента.

Математическое описание электромагнитных полей основывается на уравнениях Максвелла, которые отображают общие закономерности, присущие электромагнитному полю в определенной среде и записываются в терминах векторного анализа:

$$\operatorname{rot} H = J + \frac{dD}{dt}, \quad \operatorname{rot} E = -\frac{dB}{dt},$$

$$\operatorname{div} B = 0, \qquad \operatorname{div} D = p$$
(1)

где E = E(x,y,z,t) – напряженность электрического поля, D = D(x,y,z,t) – электрическая индукция, H = H(x,y,z,t) – напряженность магнитного поля, B = B(x,y,z,t) – магнитная индукция, J = объемная плотность тока проводимости, p – удельное электрическое сопротивление среды, функция dD/dt – плотность тока смещения. Векторы напряженности и индукции являются функциями координат и времени.

Своеобразие и физическое представление магнитного поля ВИРД зависят от геометрической конфигурации зубцовой зоны, граничных и начальных условий на линии раздела сред и источников поля. Начальные условия определяются в пределах внутреннего объема двигателя, а граничные – на граничной поверхности, окружающей двигатель.

Применение численно-полевых методов расчета. Как следует из вышеприведенного анализа, для расчета магнитного поля рекомендуется применять численно-полевые методы расчета, на базе которых проводить коррекцию электромагнитного момента. Сетка конечных элементов должна быть неоднородной, с достаточно мелким шагом в местах, где магнитное поле изменяется особенно сильно.

Список литературы: 1. Голландцев Ю.А. Вентильные индукторно-реактивные

двигатели. – СПб.: ГНЦ РФ – ЦНИИ "Электроприбор", 2003. – 148с. **2**. *Кузнецов В.А., Кузьмичев В.А.* Вентильно-индукторные двигатели. – М.: Изд-во МЭИ, 2003. **3**. *Сергеев П.С., ВиноградовН.В., Горяинов Ф.А.* Проектирование электрических машин. – М.: Энергия, 1970.



Малєєв Олексій Михайлович, магістр. Захистив диплом бакалавра за спеціальністю інженера-електромеханіка в Харківському політехнічному інституті за фахом електричні машини і апарати, в 2009 р. Працював на кафедрі "Електричні машини" Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" з 2009 р. по березень 2010. Зараз працює інженером-конструктором 2КО АО СКБ Укрелектромаш.

Наукові інтереси пов'язані з проблемами електромагнітного розрахунку ВИРД, та розрахунком магнітних полів за допомогою ЕОМ.

Егоров Борис Олексійович, доцент, кандидат технічних наук. Захистив диплом інженера та дисертацію кандидата технічних наук в Харківському Політехнічному Інституті за фахом електричні машини відповідно у 1968, 1975 р. У 1980 отримав ступінь доцента. Працює на кафедрі "Електричні машини" Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" з 1968 р.

Наукові інтереси пов'язані з застосуванням комп'ютерної техніки у покращенні параметрів машин постійного струму та з розрахунком за допомогою ЕОМ магнітних полів.

Поступила в редколлегию 18.10.2010



## УДК 621.313.2

# *А.Е. КОЗОРЕЗОВ*, студент, НТУ "ХПИ", Харьков *Б.А. ЕГОРОВ*, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ", Харьков

# ГЕОМЕТРИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ СОПРЯЖЕНИЙ КОЛЛЕКТОРНОГО УЗЛА

Стаття присвячена проблемі розрахунку безпечних сполучень пластини, манжети та натискного фланця у колекторному вузлі.

Статья посвящена проблеме расчета безопасных сопряжений пластины, манжеты и нажимного фланца в коллектором узле.

**Введение.** В современных электрических машинах постоянного тока достаточно широкое применение находят цилиндрические коллекторы арочного типа с металлическим корпусом.

В таких коллекторах давление запрессовки передается комплекту медных пластин только через поверхности конусов трапециидальных ласточкиных хвостов, так как между консолями коллекторных пластин и манжетами делается зазор. Величина зазора и толщина манжеты зависит от величины напряжения электрической машины.

При разработке коллектора достаточно сложно подобрать оптимальное сопряжение коллекторной пластины с миканитовыми манжетами и нажимными конусами в зоне угла 33°, т.е. выбрать зазоры, предохраняющие вершину конуса манжеты от механических повреждений при прессовке коллектора, так как пробой изоляции коллектора на конусе почти всегда происходит в вершине конуса.

Цель работы – разработка методики расчета размеров коллекторного узла электрической машины постоянного тока при заданном напряжении с учетом возможного пробоя изоляции коллектора в вершине конуса манжеты.

Методика размерного расчета коллекторного узла. В данной работе предлагается методика размерного расчета коллекторного узла "пластина – манжета – нажимной фланец" в зависимости от напряжения <u>U</u> электрической машины, что напрямую связанно с толщиной манжеты t, расстоянием межу манжетой и консолью и коллекторными пластинами  $\Delta$ , а также радиусом сопряжения угла 33°, манжеты  $R_M$ , конуса  $R_K$  и пластины  $R_{II}$ .

Расчетная схема расчетного узла приведена на рис. 1. Данные размерного расчета сведены в табл. 1.



Рис. 1.

Таблица 1										
<i>U</i> , B	t	Δ	$R_M$	$R_K$	$R_{\Pi}$					
127-500	1,5	0,5	3,2	2,5	2					
500-700	2	0,75	3,5	2,5	2,5					
700-1200	2	0,75	4	2,5	3					
1200-2000	2.5	1	4.5	2.5	3.5					

Исходным диаметром для размерного расчета коллекторной пластины является диаметр  $\Phi$  точки пересечения угла 3° и 30°, который пересчитывается в  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  в основании хвоста и консоли коллекторной пластины, которые будут использованы при прочностном расчете коллектора.

Основание консоли расположено к горизонтали под углом 3°, ласточкин хвост – под углом 30°. Тогда диаметры  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  усеченного конуса ласточкиного хвоста равны:

$$\Phi_1 = \Phi + 2 \cdot \psi \,; \tag{1}$$

$$\Phi_2 = \Phi_1 - 2g , \qquad (2)$$

где  $g = 1,527 \cdot R_{\Pi}, \psi = 0,127 \cdot R_{\Pi}.$ 

Аналогично методике, принятой для коллекторной пластины, диаметры манжеты по внутреннему радиусу определяются по формулам:

$$\Phi_3 = \Phi_4 + 2 \cdot g_1 ; \tag{4}$$

$$\Phi_4 = \Phi_6 + 2 \cdot f_1, \tag{5}$$

где  $g_1$  – расстояние между точками усеченного конуса манжеты по внутреннему радиусу r,

$$g_1 = 1,527 \cdot (R_M - t);$$
 (6)

 $f_1$  – расстояние между точками усеченного конуса манжеты и нажимного фланца под углом 30°,

$$f_1 = 0,577 \cdot \xi_1 \,. \tag{7}$$

Расстояние между внутренней поверхностью манжеты и наружной поверхностью конуса  $\xi_1$  в зависимости от толщины манжеты и радиусов нажимного фланца  $R_K$  и наружного радиуса манжеты  $R_M$ :

$$\xi_1 = 1,004 + 2,347 \cdot R_K - 2,424 \cdot R_M + 2,424 \cdot t \,. \tag{8}$$

Диаметр  $\Phi_6$  усеченного конуса нажимного фланца по углу 30° определяется соотношением

$$\Phi_6 = \Phi - 2 \cdot f_2 \,, \tag{9}$$

где  $f_2$  – расстояние между точкой пересечения угла 3° и 30° коллекторной пластины и внутренним диаметром усеченного конуса нажимного фланца,

$$f_2 = 0,577 \cdot \xi - \frac{t}{0,866} \,. \tag{10}$$

Диаметры подконсольных частей манжеты по наружному радиусу *R<sub>M</sub>* равны:

$$\Phi_8 = \Phi_3 + 2 \cdot g_3; \tag{11}$$

$$\Phi_9 = \Phi_4 - 2 \cdot g_4 \,, \tag{12}$$

где  $g_3 = 0,949 \cdot tg_4 = 0,577 \cdot t.$ 

Усеченный конус нажимного фланца, сопрягаемый с ласточкиным хвостом пластины, определяется диаметрами  $\Phi_5$ ,  $\Phi_6$ ,  $\Phi_8$ .

Учитывая, что пробой изоляции коллектора на корпус практически всегда происходит в вершине нажимного фланца, в качестве дополнительной меры, предохраняющей вершину конуса, и увеличивающий надежность коллектора против пробоя, в головке нажимного фланца на длине 12 мм предусмотрена проточка под углом 6°, что позволяет увеличить расстояние между нажимным фланцем и манжетой как в осевом, так и в диаметральном направлениях.

$$\Phi_5 = \Phi_6 + 2 \cdot g_2; \tag{13}$$

$$\Phi_7 = \Phi_6 + 2 \cdot g_2', \tag{14}$$

где  $g_2 = 1,478 \cdot R_K g'_2 = 0,633 + 1,478 \cdot R_K$ .

При сопряжении коллекторных пластин, манжет и нажимных фланцев с обмоткодержателем с соблюдением размеров, полученных путем приведенных выше расчетов, реализуются следующие зазоры:

– между внутренним радиусом коллекторной пластины и наружным радиусом манжеты

$$\xi_2 = 1,59 \cdot \Delta + 2,424 \cdot (R_M - R_\Pi);$$
(15)

– между внутренним радиусом манжеты и радиусом наружного фланца

$$\xi_1 = 1,004 + 2,347 \cdot R_K + 2,424 \cdot t - 2,424 \cdot R_M . \tag{16}$$

Для удобства практического использования методики геометрического расчета сопряжения коллекторного узла, формулы расчета сведены в табл. 2. Цифровые коэффициенты, принятые в формулах – значения тригонометрических функций углов 3°, 6° и 30°.

$g = 1,527 \cdot R_{\Pi}$	$f_1 = 0,577 \cdot \xi_1$
$g_1 = 1,527 \cdot \left(R_M - t\right)$	$f_2 = 0,577 \cdot \xi - \frac{t}{0,866}$
$g_2 = 1,478 \cdot R_K$	$\Phi_1 = \Phi + 2 \cdot \psi$
$g'_2 = 0,633 + 1,478 \cdot R_K$	$\Phi_2 = \Phi_1 - 2g$
$g_3 = 0,949 \cdot t$	$\Phi_3 = \Phi_4 + 2 \cdot g_1$
$g_4 = 0,577 \cdot t$	$\Phi_4 = \Phi_6 + 2 \cdot f_1$
$\zeta_0 = 2,424 \cdot R_{\Pi}$	$\Phi_5 = \Phi_6 + 2 \cdot g_2$
$\xi_1 = 1,004 + 2,347 \cdot R_K + 2,424 \cdot t - 2,424 \cdot R_M$	$\Phi_6 = \Phi - 2 \cdot f_2$
$\zeta_2 = 1,59 \cdot \Delta + 2,424 \cdot \left( R_M - R_\Pi \right)$	$\Phi_7 = \Phi_6 + 2 \cdot g_2'$
$\xi = \xi_1 + \xi_2 + t + \xi_0$	$\Phi_8 = \Phi_3 + 2 \cdot g_3$
$\Psi = 0.127 \cdot R_{\Pi}$	$\Phi_9 = \Phi_4 - 2 \cdot g_4$

Таблица 2

Список литературы: 1. Виноградов Н.В. Производство электрических машин. – М.: Энергия, 1970. 2. Шлыгин С.В. Прочностные и размерные расчеты электрических машин. – М.-Л.: ГЭИ, 1963.



Козорезов Олександр Євгенійович, магістр. Захистив диплом бакалавра за спеціальністю інженера-електромеханіка в Харківському політехнічному інституті за фахом електричні машини і апарати, в 2009 р.

Наукові інтереси пов'язані з проблемами розрахунку магнітних полів за допомогою ЕОМ.



Егоров Борис Олексійович, доцент, кандидат технічних наук. Захистив диплом інженера та дисертацію кандидата технічних наук в Харківському Політехнічному Інституті за фахом електричні машини відповідно у 1968 і 1975 р. У 1980 отримав ступінь доцента. Працює на кафедрі "Електричні машини" Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" з 1968 р.

Наукові інтереси пов'язані з застосуванням комп'ютерної техніки у покращенні параметрів машин постійного струму та з розрахунком за допомогою ЕОМ магнітних полів.

Поступила в редколлегию 18.10.2010

# С.П. КОНОГРАЙ, аспирант, ЗНТУ, Запорожье

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВЕРХНИХ СЛОЕВ МАСЛА СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

В статті розглянута можливість та перспективи застосування нейронних мереж для прогнозування температури верхніх шарів масла силового трансформаторного обладнання у режимі експлуатації. Виконано порівняння результатів прогнозування з безпосередніми вимірюваннями.

В статье рассмотрена возможность и перспективы применения нейронных сетей для прогнозирования температуры верхних слоев масла силового трансформаторного оборудования в режиме эксплуатации. Выполнено сравнение результатов прогнозирования с непосредственными измерениями.

Введение. Важнейшими факторами, определяющими темпы старения трансформаторов, а также длительную и кратковременную электрическую прочность их бумажно-масляной изоляционной системы, являются температурный режим и содержание влаги [1]. В настоящее время для расчета тепловых процессов в силовых трансформаторах применяются методики, изложенные в стандарте МЭК 60076-7 [2]. Предлагаемая в стандарте методика расчета температуры верхних слоев масла (BCM) дает только ориентировочные результаты, так как обладает следующими недостатками:

- не учитывает процессы теплопереноса (вязкость масла);

- не учитывает режимы охлаждения трансформатора;

 оперирует коэффициентами, соответствующими только номинальным режимам нагрузки, что обусловливает большие погрешности при выполнении расчетов для условий эксплуатации, отличающихся от стандартных.

Для расчета температуры BCM в стандарте предлагается следующее дифференциальное уравнение:

$$\left[\frac{1+K^2R}{1+R}\right]^x \cdot \Delta \theta_{or} = k_{11}\tau_o \frac{d\theta_o}{dt} + \left(\theta_o - \theta_a\right),\tag{1}$$

где K – коэффициент нагрузки трансформатора, о.е.; R – отношение потерь короткого замыкания к потерям холостого хода;  $\Delta \Theta_{or}$  – превышение температуры BCM над температурой воздуха  $\Theta_a$  при номиналь-

ной нагрузке, К;  $\tau_0$  – тепловая постоянная времени масла, ч; x,  $k_{11}$  – константы, предоставляемые заводами-изготовителями.

Перспективность применения нейронных сетей обусловлена следующими факторами [3]:

 их способностью нейронных сетей воспроизводить сложные нелинейные соотношения;

 их высокой эффективностью работы с большими объемами данных, которые накапливаются за время работы системы непрерывного контроля;

 отсутствием ограничений на функцию их распределения, возможностью обработки разнотипных экспериментальных данных и сохранением работоспособности при наличии пропусков в таблице обучающей выборки.

Цель и задачи исследования. Усовершенствование существующих методов непрерывного контроля технического состояния силового трансформаторного оборудования на основе применения нейронных сетей.

Прогнозирование температуры ВСМ трансформатора в режиме эксплуатации позволит диагностировать техническое состояние его компонентов. Сравнивая спрогнозированную температуру масла с непосредственно измеренной, можно выявить неисправности маслонасосов или вентиляторов системы охлаждения, определить загрязнение радиаторов. Такой прогноз осуществим в случае проведения обучения нейронной сетью непосредственно после ввода в эксплуатацию трансформатора с исправной системой охлаждения [3].

**Результаты исследования**. По своей структуре нейронные сети могут быть сгруппированы в сети прямого распространения, в которых на входы каждого нейрона подаются выходные сигналы нейронов предыдущих слоев, и сети с обратными связями, в которых выходы нейронов последующих слоев подаются на вход предыдущим. Сети прямого распространения являются статическими в том смысле, что на заданный вход они вырабатывают одну совокупность значений, не зависящих от предыдущих состояний сети. Сети с обратными связями являются динамическими, так как в силу обратных связей в них модифицируется вход нейронов, что приводит к изменению состояния сети.

В литературе описаны оптимальные конфигурации нейронных сетей [3, 4], используемые для решения отдельных типов задач. Примеры таких задач приведены в табл. 1.

Исходя из поставленной задачи расчета (прогнозирования) динамики изменения температуры верхних слоев масла в режиме реального времени при различных токовых нагрузках, температурах окружаю-

Таблица 1									
Архитектура	нейронной сети	Решаемые задачи							
Сети с обратными связями	Соревновательные сети	Категоризация внутри класса, сжатие данных, анализ данных							
	Сеть Кохонена	Категоризация, анализ данных							
	Сеть Хопфилда	Ассоциативная память							
	Модели ART	Классификация образов, катего- ризация							
Сети прямого рас-	Персептрон	Классификация образов, аппрок-							
пространения	Сеть радиальных ба- зисных функций	симация функций, предсказание, управление							

щей среды и режимах работы охладителей, были выбраны сети прямого распространения. Основным алгоритмом обучения нейронных сетей прямого распространения является алгоритм обратного распространения ошибки.





Для оптимизации параметров нелинейной модели был выбран алгоритм Левенберга-Марквардта, являющийся наиболее распространенным алгоритмом оптимизации. Он превосходит по производительности метод наискорейшего спуска и другие методы сопряженных градиентов в различных задачах. Алгоритм заключается в последовательном приближении заданных начальных значений параметров к искомому локальному оптимуму [4].

На рис. 1 представлен пример структуры алгоритма обучения нейронной сети прямого распространения с одним скрытым слоем. Общая форма записи математической модели такой нейронной сети для определения температуры ВСМ будет иметь следующий вид:

$$y = \sum_{h=1}^{H} w_{ik} \left\{ f_k^{\text{sig}} \left\{ \sum_{j=1}^{J} w_{k,j} i_j + b_k \right\} + b_h,$$
(2)

где *i<sub>i</sub>* – входные данные нейронной сети; *j* – номер входной перемен-

ной;  $w_{kj}$  – веса связи входа нейрона со скрытым слоем; J – общее количество входных переменных; h – номер нейрона в выходном слое; H – общее количество нейронов в выходном слое.

В качестве активационной функции выходного слоя нейронной сети берется нелинейная функция

$$\operatorname{Sigmoid}(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}},\tag{3}$$

где *x* – взвешенная сумма всех входных переменных и смещений нейронов.

При проведении численного эксперимента использовался программный комплекс MATLAB 7.10, в котором был реализован рассмотренный алгоритм обучения нейронной сети прямого распространения с одним скрытым слоем, в результате применения которой были получены значения спрогнозированной температуры верхних слоев масла.

Для решения поставленной задачи – прогнозирования динамики изменения температуры масла – число *J* входных параметров взято равным 5.

Входными данными являются:

 режим охлаждения (естественная конвекция, принудительная циркуляция воздуха);

- температура окружающей среды;

- величина нагрузки трансформатора;
- интервал времени между измерениями;

- температура масла в предыдущий момент.

На рис. 2 приведены результаты применения аппарата нейронных сетей к прогнозированию температуры масла на основе данных, полученных с ПС 750кВ "Ленинградская" системой непрерывного контроля АТДТН-200000/330/110-У1.

Число *Н* нейронов в скрытом слое сети взято равным 10. Нейронная сеть обучена на 5400 данных за период 15 дней (данные за май 2008г.), а затем использована для расчета температуры ВСМ в последующие моменты, что и отображено на графике.

Из приведенного на рис. З графика ошибки прогнозирования видно, что, несмотря на наличие областей, в которых все еще есть расхождения между рассчитанной при помощи нейронной сети и измеренной температурами масла, нейронная сеть дает результаты с ошибкой не более 5 °C.



Рис. 3.

Накопленный за последние несколько лет практический опыт эксплуатации систем непрерывного контроля SAFE-*T* [5] показывает, что для ряда трансформаторов мы получаем хорошее соответствие результатов расчетов по методике МЭК 60076-7 и непосредственных измерений, а для других расхождение может более 5 °C. При этом значения расхождений имеют нерегулярный характер во времени. Наличие таких случайных колебаний затрудняет использование методики МЭК 60076-7 для контроля эффективности работы системы охлаждения.

Выводы. Представленные данные показывают, что уже в настоящее время применение нейронных сетей для расчета температуры ВСМ дает результаты, достаточные по своей точности (4-5 °C) для применения в системах непрерывного контроля силового трансформаторного оборудования для диагностики технического состояния системы охлаждения.

Одним из преимуществ нейронных сетей при прогнозировании температуры BCM является их независимость, в отличие от существующих современных стандартов МЭК, от параметрических коэффициентов трансформаторов, предоставляемых заводами-изготовителями для каждой выпускаемой единицы оборудования.

Дальнейшая работа по выбору структуры, вида нейронной сети, а также предварительному анализу и фильтрации входных данных для нейронной сети предположительно позволит уменьшить погрешность расчета температуры до 2-3 °C.

Список литературы: 1. Конограй С. П. Применение модели старения твердой изоляции силовых маслонаполненных трансформаторов для их диагностики в режиме эксплуатации / С.П. Конограй // Електротехніка і Електромеханіка. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2010. – № 1. – С. 43-45. 2. ІЕС 60076-7 Еd. 1: Power transformers – Part 7: Loading guide for oil-immersed power transformersю – Vol. 14/512/FDIS, Sept. 2005. 3. Карапетян Н. В. Применение нейронных сетей в аналитических моделях систем мониторинга трансформаторного оборудования / В.А. Туркот, А.А. Филиппов // ЭЛЕКТРО. – 2009. – №6. – С. 15-19. 4. Круглов В. В. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. Учеб. пособие. / Дли М.И., Голунов Р.Ю. – М.: Изд-во физико-математической литературы, 2001. – 224 с. 5. Рассальский А.Н. Результаты внедрения системы непрерывного контроля силових автотрансформаторов на подстанции "Ленинградская" / А.Н. Рассальский, С.П. Конограй, А.А. Сахно, А.Г. Спица, А.А. Гук // Вісник КДПУ імені М. Остроградського. – Кременчук, 2009. – № 3(56), Ч. 1. – С. 150-153.



Конограй Сергей Петрович, аспирант Запорожского национального технического университета. Защитил диплом магистра в Запорожском национальном техническом университете по специальности "Электрические машины и аппараты" в 2006 г. Ведущий специалист отдела Систем мониторинга трансформаторов ООО "Энергоавтоматизация" с 2006г.

Научные интересы связаны с вопросами диагностики технического состояния высоковольтного трансформаторного оборудования под рабочим напряжением в режиме эксплуатации.

Поступила в редакцию 30.09.2010

## УДК 621.3.01

*Б.И. КУЗНЕЦОВ*, д-р техн. наук, проф., зав. отделом, НТЦ МТО НАН Украины, Харьков *А.В. ВОЛОШКО*, аспирант, НТЦ МТО НАН Украины, Харьков *И.В. БОВДУЙ*, аспирант, НТЦ МТО НАН Украины, Харьков *Е.В. ВИНИЧЕНКО*, аспирант, НТЦ МТО НАН Украины, Харьков

## СИНТЕЗ РОБАСТНОГО УПРАВЛЕНИЯ СИНХРОННЫМИ ПРИВОДАМИ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ С УЧЕТОМ ИХ ВЗАИМОСВЯЗИ ЧЕРЕЗ ПРОКАТЫВАЕМЫЙ МЕТАЛЛ

Розроблено метод робастного управління синхронними головними приводами прокатних станів з урахуванням нелінійних моментів тертя між валками та взаємним впливом прокатних валків один на одного у ході прокатки через метал, що прокатується. Наведено приклад динамічних характеристик синтезованої системи.

Разработан метод робастного управления синхронными главными приводами прокатных станов с учетом нелинейных моментов трения между валками взаимным влиянием прокатных валков друг на друга в ходе прокатки через прокатываемый металл. Приведен пример динамических характеристик синтезированной системы.

Введение. Подавляющее большинство главных приводов вновь строящихся и реконструируемых прокатных станов комплектуются синхронными двигателями с частотными преобразователями [1-7]. В частности, на главных приводах Алчевского металлургического комбината установлены синхронные приводы переменного тока. Многие зарубежные фирмы при модернизации прокатных станов также выполняют замену двигателей постоянного тока на двигатели переменного тока.

Постановка проблемы, связь с научными и практическими задачами. Динамические нагрузки в главных линиях прокатных станов опасны не только величиной амплитуд, а в основном тем, что моменты могут проходить через нулевые значения с раскрыванием зазоров приводной линии и большими ударами и нагрузками [8-9]. На прокатных станах с индивидуальными приводами коэффициенты динамичности верхней и нижней приводных линий различны: в менее жесткой верхней линии коэффициент динамичности больше, чем в нижней. Крутящие моменты в шпинделях, как правило, распределяются неравномерно вследствие разности скоростей вращения валков,

различных условий трения на контактных поверхностях между подкатом и валками, различной температуры верхних и нижней поверхностей подката и др.

Анализ публикаций. В работах [10-12] рассмотрены вопросы синтеза систем управления главными приводами с двигателями постоянного тока для математических моделей в виде двух и трехмассовых электромеханических систем. Однако современные главные приводы комплектуются синхронными двигателями с частотными преобразователями [1-7]. Мощные прокатные станы, как правило, выполняют с индивидуальным приводом без шестеренных клетей и с общим приводом, а вращение валкам передается посредством шпинделей от шестеренной клети [8-9]. Расширенный сортамент продукции и соответствующую загруженность оборудования можно обеспечить только с применением новых приводных мощностей. Однако, при проведении модернизации существующих приводных линий в связи с ограниченностью производственного пространства замена оборудования часто затруднительно. Фирма Voestalpine Stahl [1] приняла решение в пользу двигателя переменного тока, обладающего неоспоримыми преимуществами: большей степенью загруженности, более высокой динамикой за счет пониженного момента инерции ротора и почти вдвое большей выходной мощностью при одинаковых требованиях к размеру площадки для установки.

Цель работы – разработка метода синтеза робастного управления главными приводами прокатных станов с синхронными двигателями переменного тока с учетом их взаимного влияния через прокатываемый металл.

Теоретические исследования. На рис. 1 показана схема прокатного стана с индивидуальным приводом валков с синхронными двига-



телями и с учетом их взаимного влияния через прокатываемый металл. Большинство современных регулируемых мощных приводов комплектуются синхронными двигателями с частотными преобразователями.

При векторном управлении синхронными приводами в большинстве систем управления реали-



зован алгоритм прямого управления моментом двигателя [13]. При этом по данным большинства фирм производителей частотных преобразователей [14], время нарастания момента не превышает 2 млс. Время спада момента при таком алгоритме управления вообще принимается нулевым. Поэтому будем предполагать, что в системе используется частотное управление приводными двигателями, реализовано программно-аппаратное прямое управление моментами, а математические модели контуров прямого управления моментами примем в виде апериодических звеньев первого порядка с постоянными времени, равными времени нарастания моментов синхронных двигателей. Тогда уравнения динамики изменения моментов синхронных двигателей примут следующий вид:

$$T_{\mu 1} \frac{dM_{\mu 1}}{dt} + M_{\mu 1} = M_{31};$$
  
$$T_{\mu 2} \frac{dM_{\mu 2}}{dt} + M_{\mu 2} = M_{32}.$$

В этих уравнениях  $T_{\mu 1}$ ,  $T_{\mu 2}$  – постоянные времени частотных преобразователей, характеризующие время нарастания моментов двигателей;  $M_{31}$ ,  $M_{32}$  – заданные значения моментов, поступающие на вход систем прямого управления моментами синхронных двигателей.

Для короткой линии главного привода примем модель в виде двухмассовой системы, которой соответствует система следующих уравнений:

$$J_{\rm B} \frac{d\omega_{\rm B}}{dt} = M_{\rm y} + \beta(\omega_{\rm d} - \omega_{\rm B}) - \beta_{\rm c}\omega_{\rm B} - M_{\rm c};$$
$$\frac{dM_{\rm y}}{dt} = C(\omega_{\rm d} - \omega_{\rm B});$$
$$J_{\rm d} \frac{d\omega_{\rm d}}{dt} = M_{\rm d} - M_{\rm y} - \beta(\omega_{\rm d} - \omega_{\rm B}),$$

где  $\omega_{\rm B}$ ,  $\omega_{\rm A}$  – скорости вращения валка и двигателя;  $J_{\rm B}$ ,  $J_{\rm A}$  – моменты инерции валка и двигателя;  $M_{\rm y}$  – момент упругости; C,  $\beta$  – жесткость и коэффициент внутреннего вязкого трения упругого вала на скручивание.

В этих уравнениях учтено наличие подающего участка в зависимости момента внешнего трения от скорости вращения с жесткостью  $\beta_c$  [15].

Для длинной линии главного привода прокатного стана примем модель в виде трехмассовой системы с моментами инерции двигателя, муфты и валка. Уравнения динамики такой системы примут следующий вид:

$$\begin{split} J_{\rm B} & \frac{d\omega_{\rm B}}{dt} = M_{\rm y2} + \beta_2 (\omega_{\rm M} - \omega_{\rm B}) - \beta_{\rm c} \omega_{\rm B} - M_{\rm c} ; \\ & \frac{dM_{\rm y2}}{dt} = C_2 (\omega_{\rm M} - \omega_{\rm B}) ; \\ J_{\rm p} & \frac{d\omega_{\rm M}}{dt} = M_{\rm y1} + \beta_1 (\omega_{\rm A} - \omega_{\rm p}) - M_{\rm y2} - \beta_2 (\omega_{\rm M} - \omega_{\rm B}) \\ & \frac{dM_{\rm y1}}{dt} = C_1 (\omega_{\rm A} - \omega_{\rm M}) ; \\ & J_{\rm A} & \frac{d\omega_{\rm A}}{dt} = M_{\rm A} - M_{\rm y1} - \beta_1 (\omega_{\rm A} - \omega_{\rm M}) , \end{split}$$

где  $\omega_{\rm B}$ ,  $\omega_{\rm M}$ ,  $\omega_{\rm g}$  – скорости вращения валка, редуктора и двигателя;  $M_{\rm y1}$ ,  $M_{\rm y2}$  – моменты упругости в быстроходном и тихоходном валах;  $C_1, C_2$  и  $\beta_1, \beta_2$  – жесткости и коэффициенты внутреннего вязкого трения в быстроходном и тихоходном валах на скручивание;  $T_3$  – электромагнитная постоянная якорной цепи;  $T_{\mu}$  – постоянная времени тиристорного преобразователя;  $J_{\rm B}, J_{\rm M}, J_{\rm R}$  – моменты инерции валка, муфты и двигателя.

В этих уравнениях также учтено наличие падающего участка в характеристике внешнего трения с наклоном β<sub>c</sub>.

Рассмотрим случай, когда скорости вращения верхнего и нижнего валков не равны друг другу. В этом случае за счет наличия связи через прокатываемый металл возникает перераспределение нагрузок так, что валок, который вращается с большей скоростью, берет на себя большую долю момента прокатки. Скорости вращения валков короткой  $\omega_{\rm B2}$  и длинной  $\omega_{\rm B1}$  линий главного привода прокатного стана различны и их уравнения динамики могут быть записаны в следующем виде (будем обозначать переменные и константы относящееся к длинной линии с индексом 1, а к короткой – с индексом 2):

$$J_{\rm B1} \frac{d\omega_{\rm B1}}{dt} = M_{\rm y12} + \beta_{12} (\omega_{\rm g1} - \omega_{\rm B1}) - \beta_{\rm c1} \omega_{\rm B1} - 0.5M_{\rm c} - \Delta M ;$$

$$J_{B2} \frac{d\omega_{B2}}{dt} = M_{y2} + \beta_2 (\omega_{\mu 2} - \omega_{B2}) - \beta_{c2} \omega_{B2} - 0.5M_c - \Delta M,$$

где изменение момента  $\Delta M$ , вызванное разностью скоростей вращения верхнего и нижнего валков:

$$\Delta M = k \left( \omega_{\rm B1} - \omega_{\rm B2} \right).$$

Тогда эти уравнения динамики примут следующий вид:

$$J_{B1} \frac{d\omega_{B1}}{dt} = M_{y12} + \beta_{12} (\omega_{A1} - \omega_{B1}) - \beta_{c1} \omega_{B1} - 0.5M_c - k\omega_{B1} + k\omega_{B2};$$
  
$$J_{B2} \frac{d\omega_{B2}}{dt} = M_{y2} + \beta_2 (\omega_{A2} - \omega_{B2}) - \beta_{c2} \omega_{B2} - 0.5M_c - k\omega_{B2} + k\omega_{B1}.$$

При захвате металла момент сопротивления изменяется не мгновенно и зависит от условий захвата. Примем модель изменения момента сопротивления в виде апериодического звена первого порядка [16-21].

$$\frac{M_{\rm c}(t)}{dt} = -\frac{1}{a}M_{\rm c}(t) + \frac{1}{a}M(t) ,$$

где M(t) – ступенчатое изменение внешнего воздействия.

На основании этой математической модели рассмотрим построение робастного регулятора. Основное назначение системы управления заключается в поддержании скоростей вращения  $\omega_{B1}$  верхнего и  $\omega_{B2}$  нижнего валков на заданных уровнях  $\omega_{31}$  и  $\omega_{32}$ . Для построения астатического регулятора введем вектор измеряемых координат:  $\mathbf{y}(t) = C_{\mathbf{x}}(t) + D_{\mathbf{u}}(t)$ , компонентами которого являются:  $\mathbf{f}_{\mathbf{y}}(t) = \{\omega_{d1}, \omega_{d2}\}^T$  и вектор задающих воздействий:  $\mathbf{f}_{\mathbf{y}_3}(t) = \{\omega_{31}, \omega_{32}\}^T$ . Введем вектор вспомогательных переменных  $\mathbf{z}(t)$ , связанный с вектором регулируемых координат  $\mathbf{y}(t)$  и вектором задающих воздействий  $\mathbf{y}_3(t)$  уравнением состояния:

$$\frac{d\mathbf{\vec{r}}(t)}{dt} = \mathbf{\vec{r}}_{3}(t) - \mathbf{\vec{y}}(t) \ .$$

Для уравнения состояния расширенной системы, включающей уравнение состояния объекта управления и уравнение состояния вектора вспомогательных переменных рассмотрим стандартную форму уравнения состояния, вектора контролируемых параметров Z(t) и вектора измеряемых переменных y(t), принятой в теории робастного управления [15]:

$$\begin{split} \frac{dx(t)}{dt} &= AX(t) + B_1W_1(t) + B_2U(t); \\ \mathbf{r} & \mathbf{r} & \mathbf{r} & \mathbf{r} \\ Z(t) &= C_1X(t) + D_{11}W_1(t) + D_{12}U(t); \\ \mathbf{r} & \mathbf{r} & \mathbf{r} \\ Y(t) &= C_2X(t) + D_{21}W_1(t) + D_{22}U(t). \end{split}$$

Введем вектор состояния исходной системы  $\overset{\mathbf{h}}{x}(t)$  в следующем виде

$$\mathbf{\hat{r}}_{X(t)} = \begin{cases} \omega_{\rm B1}(t), M_{\rm y12}(t), \omega_{p}(t), M_{\rm y11}(t), \omega_{\rm д1}(t), M_{\rm d1}(t), \\ Z_{1}(t), \omega_{\rm B2}(t), M_{\rm y2}(t), \omega_{\rm d2}(t), M_{\rm d2}(t), Z_{2}(t), M_{\rm c}(t) \end{cases} \end{cases}^{T}$$

Матрица состояния приведена на следующее странице.

<i>A</i> =	$\begin{bmatrix} -\frac{\beta_{c1} - \beta_{12}}{J_{u1}} - \frac{K}{J_{u1}} \\ -\frac{C_{12}}{J_p} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ $	$ \frac{1}{J_{B1}} \\ 0 \\ -\frac{1}{J_p} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0$	$\begin{array}{c} \frac{\beta_{12}}{J_{\text{B1}}} \\ \frac{J_{\text{B1}}}{C_{12}} \\ \frac{-\beta_{11}-\beta_{12}}{J_p} \\ -C_{11} \\ \frac{\beta_{11}}{J_{\lambda 1}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\$	$ \begin{array}{c} 0 \\ \frac{1}{J_{p}} \\ 0 \\ -\frac{1}{J_{\pi 1}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} $	$\begin{array}{c} 0 \\ \frac{\beta_{11}}{J_p} \\ -\frac{\beta_{11}}{J_{\mu 1}} \\ 0 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array}$	$\begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{J_{\pi 1}} \\ -\frac{1}{T_{\rm M1}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array}$	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	$\begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{\beta_{c2} - \beta_2 + K}{J_{B2}} \\ \frac{-C_2}{\beta_2} \\ \frac{\beta_2}{J_{A2}} \end{array}$	$\begin{array}{c} \frac{K}{J_{\rm B1}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ \frac{J_{\rm B2}}{J_{\rm B2}} \\ 0 \\ -\frac{1}{J_{\rm A2}} \end{array}$	$ \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{\beta_2}{J_{B2}} \\ C_2 \\ -\frac{\beta_2}{J_{R2}} \end{array} $	$ \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ J_{A2} \end{array} $	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	$-\frac{1}{J_{B1}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{J_{B2}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\$	
	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	J <sub>π2</sub> 0 0 0	J <sub>д2</sub> 0 0 0	$J_{\mu 2}$ 0 -1 0		0 0 0	$0 \\ -\frac{1}{\alpha}$	

Для синтеза робастного регулятора необходимо определить такой динамический блок, заданный матрицами  $A_p$ ,  $B_p$ ,  $C_p$ ,  $D_p$ , входом которого является измеряемый вектор исходной системы  $\stackrel{\mathbf{I}}{y}(t)$ , а выходом является вектор управления  $\stackrel{\mathbf{I}}{u}(t)$  исходной системы

$$\frac{d\hat{x}_p}{dt} = A_p x_p + B_p y;$$
  
$$\frac{dt}{u} = C_p x_p + D_p y.$$

Подставив в уравнение состояния исходной системы управление, сформированное с помощью регулятора, а в уравнение состояния регулятора подставив управление регулятора в виде вектора измеряемых координат исходной системы, получим следующие уравнения.

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{x}}{dt} &= A\mathbf{x} + B_1\mathbf{w} + B_2 \Big[ C_p \mathbf{x}_p + D_p \big[ C_2 \mathbf{x} + D_{21} \mathbf{w} \big] \Big];\\ \mathbf{x} &= C_1 \mathbf{x} + D_{12} \big[ C_p \mathbf{x}_p + D_p \big[ C_2 \mathbf{x} + D_{21} \mathbf{w} \big] \big];\\ \frac{d\mathbf{x}_p}{dt} &= A_p \mathbf{x}_p + B_p \big[ C_2 \mathbf{x} + D_{21} \mathbf{w} \big].\end{aligned}$$

После преобразования получим

$$\frac{d\bar{x}}{dt} = (A + B_2 D_p C_2) x + B_2 C_p x_p + (B_1 + B_2 D_p D_{21}) w;$$
  
$$\frac{d\bar{x}_p}{dt} = B_p C_2 x + A_p x_p + B_p D_{21} w;$$
  
$$\bar{z} = (C_1 + D_{12} C_2) x + D_{12} C_p x_p + D_{12} D_p D_{21} w.$$

Запишем эти уравнения в блочном виде:

$$\begin{bmatrix} \frac{dx}{dt} \\ \frac{dx_p}{dt} \end{bmatrix} = \left\| \frac{A + B_2 D_p C_2}{B_p C_2} \frac{B_2 C_p}{A_p} \right\| \begin{bmatrix} \mathbf{r} \\ \mathbf{$$

Тогда уравнение состояния исходной системы, замкнутой этим регулятором, в расширенном пространстве состояний  $\mathbf{r}_{x_3}(t) = \{\mathbf{r}_{x_7}(t), \mathbf{r}_{p_7}^T(t)\}^T$  и уравнение вектора контролируемых переменных примут следующий вид:

$$\frac{dx_3}{dt} = A_3 x_3 + B_3 w;$$
  
$$\frac{t}{z} = C_3 x_3 + D_3 w,$$

где соответствующие матрицы равны

$$A_{3} = \left\| \begin{array}{c|c} A + B_{2}D_{p}C_{2} & B_{2}C_{p} \\ \hline B_{p}C_{2} & A_{p} \end{array} \right|; \quad B_{3} = \left\| \begin{array}{c} B_{1} + B_{2}D_{p}D_{21} \\ \hline B_{p}D_{21} \end{array} \right|;,$$
$$C_{3} = \left\| \begin{array}{c} C_{1} + D_{12}C_{2} & D_{12}C_{p} \\ \hline D_{12}C_{p} \end{array} \right|; \quad D_{3} = \left\| D_{12}D_{p}D_{21} \right\|.$$

Синтез регулятора, минимизирующего  $H^{\infty}$ -норму, сводится к нахождению собственных значений матриц Гамильтона по управлению

$$H_{\infty} = \begin{bmatrix} A & \gamma^{-2}B_{1}B_{1}^{T} - B_{2}B_{2}^{T} \\ -C_{1}^{T}C_{1} & -A^{T} \end{bmatrix},$$

и по фильтрации

$$J_{\infty} = \begin{bmatrix} A^{T} & \gamma^{-2}C_{1}^{T}C_{1} - C_{2}^{T}C_{2} \\ -B_{1}B_{1}^{T} & -A \end{bmatrix},$$

что соответствует решению уравнений Риккати по управлению:

$$A^{T}X_{\infty} + X_{\infty}A - X_{\infty} \left( B_{2}B_{2}^{T} - \gamma^{2}B_{1}B_{1}^{T} \right) X_{\infty} + C_{1}^{T}C_{1} = 0$$

и по фильтрации:

$$AY_{\infty} + Y_{\infty}A^{T} - Y_{\infty} \left( C_{2}^{T}C_{2} - \gamma^{2}C_{1}^{T}C_{1} \right) Y_{\infty} + B_{1}B_{1}^{T} = 0.$$

Результаты моделирования. В качестве примера на рис. 2 показаны переходные процессы переменных состояния робастного управления трехмассовой электромеханической системы верхнего валка, а на рис. З показаны переходные процессы переменных состояния робастного управления двухмассовой электромеханической системы нижнего валка в системе управления индивидуальными приводами с синхронными двигателями с учетом взаимного влияния приводов через прокатываемый металл. На рис. 2,а приведены кривые скорости вращения верхнего валка  $\omega_{R1}$ ; б – момента упругости  $M_{v12}$  тихоходного вала; в – скорости вращения редуктора  $\omega_p$ ; г – момента упругости тихоходного вала M<sub>v11</sub>; д – скорости вращения верхнего двигателя ω<sub>d1</sub> и е – момента верхнего двигателя M<sub>d1</sub> трехмассовой электромеханической системы робастного управления верхним валком. На рис. 3,а приведены кривые скорости вращения нижнего валка  $\omega_{B,2}$ ; б – момента упругости вала  $M_{v2}$ ; в – скорости вращения двигателя  $\omega_{d2}$  и г – момента двигателя нижнего валка  $M_{d2}$ , двухмассовой электромеханической системы робастного управления нижнего валка. Сплошной линией показаны переходные процессы с П-регулятором, а пунктирной – с робастным регулятором.

Как следует из сравнения этих переходных процессов при одинаковом быстродействии система с робастным регулятором имеет меньшую колебательность и отсутствие статической ошибки.





Г

в

ISSN 2079-3944. Вісник НТУ ''ХПІ''. 2010. № 55

Выводы и перспективы. Таким образом, разработан метод синтеза робастного управления скоростями вращения верхнего и нижнего валков прокатного стана с синхронными двигателями с учетом взаимного влияния валков друг на друга через прокатываемый металл. Такая система фактически является двухканальной системой, так как имеет два задающих воздействия по скоростям вращения верхнего и нижнего валков. Эти два задающих воздействия могут быть различны, причем в системе имеется взаимное влияние каналов друг на друга через прокатываемый слиток. Чем больше это влияние, тем больше отличаются переходные процессы в системе от переходных процессов в автономных каналах. Однако, если взаимосвязь через прокатываемый металл разрывается, что имеет место в режиме буксования валков, то приводы верхнего и нижнего валков работают автономно, и их переходные процессы соответствуют переходным процессам в автономных каналах регулирования скорости.

Список литературы: 1. Айгнер Х., Фухс А. Модернизация приводов широкополосного стана горячей прокатки фирмы Voestalpine Stahl / Черные металлы. - 2006. - С. 45-47. 2. Джелали М., Мюллер У., Вольфф А., Унгерер В. Современные стратегии регулирования на прокатных станах / Черные металлы. -2001. – №3. С. 72-81. 3. Чжан Лю, Майерль Й., Пихлер Р., Зильберман У. Модернизация широкополосного стана горячей прокатки на заводе SHAGANG / Черные металлы. - 2003. - С. 27-33. 4. Дегнер М., Ратцек У. Разработки в области горячей и холодной прокатки / Черные металлы. - 2006, декабрь. - С. 33-42. 5. Дегнер М., Франк А., Лакингер Х., Маук П.-Й. Третья европейская конференция по прокатке. Актуальные разработки в области горячей и холодной прокатки / Черные металлы. - 2004, апрель. - С. 28-35. 6. Шпис В., Пихлер Р., Айстляйтнер К., Кайнтцель Г., Вольтерс Х. Новое поколение систем автоматизации от фирм производителей металлургического оборудования / Черные металлы. – 2004, март. – С. 38-42. 7. Beck, H.P., Goslar, M.: Optimizing the Control of High-Power Electric Drives. Proceeding of the Fourth IASTED International Conference "Robotics and Manufacturing", 1996. – Р. 329-332. 8. Иванченко Ф.К., Красношапка В.А. Динамика металлургических машин. - М.: Металлургия, 1983. – 295с. 9. Лехов О.С. Динамические нагрузки в линии привода обжимных станов. – М., Машиностроение, 1975. – 184 с. 10. Кузнецов Б.И., Новоселов Б.В., Богаенко И.Н. Проектирование многоканальных систем оптимального управления. // Киев: Техника. – 1993. – 242 с. 11. Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Коломиец В.В. Синтез электромеханических систем со сложными кинематическими цепями. – Харьков: УИПА, 2005. – 511 с. 12. Кузнецов Б.И., Осичев А.В., Чаусов А.О. Оптимальное управление главным приводом блюминга в режиме пробуксовки валков // Техническая электродинамика. - Киев, ИЭД, 2000. – Ч. 6. – С. 23-28. 13. Перельмутер В.М. Прямое управление моментом и током двигателей переменного тока. – Харьков: Основа, 2004. – 210 с. 14. АВВ

Katalog 1990, Sanftalasser Typ DEHE und DEHED Nr. GSST 326590. - 43 p. 15. Moller-Pedersen, Martin Pagh Petersen. Control of Nonlinear Plants. Vol. 1. -Denmark: Technical University, 1995. - 192 р. 16. Кузнецов Б.И., Бовдуй И.В., Волошко А.В., Виниченко Е.В. Математическая модель главных приводов прокатных станов с учетом их взаимосвязи через прокатываемый металл как объекта робастной системы управления / Вестник Национального технического университета "ХПИ". - Харьков: НТУ "ХПИ", - 2009. - №44. - С. 56-61. 17. Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Коломиец В.В., Кузнецова Л.Г. Цифровое нелинейное робастное управление главным электроприводом блюминга в режиме пробуксовки валков / Електромашинобудування та електрообладнання // Міжвідомчий науково-технічний збірник. - Одеса, 2006. - Вип. 66. - С. 107-108. 18. Буряковский С.Г. Экспериментальные исследования процесса буксования валков прокатного стана на действующем электрооборудовании // Механіка та машинобудування. – 2000. – №1. – С. 113-115. 19. Буряковский С.Г., Басов А.В., Богаевский А.Б. Экспериментальные исследования процесса пробуксовки валков прокатного стана на действующем оборудовании // Вестник ХГПУ. – Харьков: ХГПУ, 1999. – № 61. – С. 209-210. 20. Буряковский С.Г., Басов А.В., Богаевский А.Б., Кунченко Т.Ю. Динамические нагрузки в главной линии блюминга. // Вестник ХГПУ. – Харьков: ХГПУ, 2000. – Вып. 113. – С. 240. 21. Буряковский С.Г., Богаевский А.Б., Басов А.В., Кунченко Т.Ю. Демпфирование упругих колебаний исполнительных механизмов средствами электропривода. // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. – Харьков: Основа, 1997. – С. 262-263.

Поступила в редколлегию 15.06.2010

## УДК 624.04: 621.313.04: 534.1

**В.С. ЛУПИКОВ**, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПИ", Харьков **Н.А. ЛЕЛЮК**, стажер-преподаватель, НТУ "ХПИ", Харьков **Е. МВУДЖО**, канд. техн. наук, Университет Яунде, Камерун

## ОСОБЕННОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ОТБРОСА КОНТАКТОВ КОМУТАЦИОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Приведені результати математичного моделювання процесу відскоку рухливого контакту комутаційного електричного апарату для пружнов'язкої моделі удару. Розглянуто особливості моделі та запропоновано рекомендації щодо підвищення точності моделювання.

Приведены результаты математического моделирования процесса отброса подвижного контакта коммутационного электрического аппарата для упруговязкой модели удара. Рассмотрены особенности модели и даны рекомендации по повышению точности моделирования.

Введение. Существующие коммутационные электрические аппараты (ЭА) имеют относительно небольшое собственное потребление электроэнергии, пропорциональное их электрическому сопротивлению. В этом случае рассматривать их энергосбережение вроде бы не имеет смысла. Однако, идеология конструирования ЭА, построенная на выборе элементов проектируемого ЭА с запасом, приводит к тому, что при изготовлении ЭА расходуется неоправданно большая энергия, т.е. растет энергоемкость ЭА. Это зависит не только от технологии изготовления и массовости производства ЭА, а именно от идеологии конструирования "с запасом". В частности, выбор контактов коммутационного ЭА, их износ в процессе эксплуатации, конструкция контактной системы, выбор пружин во многом определяются именно с позиций этой идеологии. Для уменьшения энергоемкости коммутационных ЭА требуется развитие теории и практики проектирования ЭА с более точным учетом параметров, определяющих его характеристики. Тем самым на смену идеология конструирования "с запасом" приходит идеология снижения энергоемкости за счет наукоемкости ЭА.

В коммутационных ЭА при замыкании контактов в большинстве случаев происходит многократный отброс (отскок) подвижных контактов относительно неподвижного. Подвижный контакт движется к

неподвижному контакту с определенной скоростью. Параметры этого движения определяются свойствами контактной системы и связанными с ней элементами конструкции ЭА, в частности контактными и противодействующими пружинами и якорем. При соударении происходит деформация обоих контактов. Различают три вида деформации контактов: упругая, вязкая и пластическая. Упругая деформация приводит к отбросу подвижного контакта от неподвижного на некоторое расстояние от 0,01 до 1 мм и сжимается контактная пружина ЭА. При уравновешивании силы отброса и противодействующей пружины от-брос контакта заканчивается и он начинает возвратное движение, приводящее к повторному замыканию контактов. В целом процесс состоит из многократно повторяющихся замыканий – размыканий контактов ЭА. При каждом отбросе между контактами возникает электрическая дуга, вызывающая их износ.

дуга, вызывающая их износ. В настоящее время используются три модели однократного со-ударения контактов: упругая, упруговязкая и упруговязкопластическая [1-4]. Первые две модели используют аналитические функции для описания процесса отброса контакта, а последняя модель строится с использованием численных методов [3]. Упрощенное представление о физике процесса отброса контактов нашло отражение в "упругой мо-дели" контактов [3-5]. В случае упруговязкой и упруговязкопластиче-ской моделей учитывается деформация контактов, что в принципе повы-шает их точность. Применение современной вычислительной техники открывает возможность построения и исследования спожных матемашает их точность. Применение современной вычислительной техники открывает возможность построения и исследования сложных матема-тических моделей процесса отброса контактов. В принципе наблюда-ется тенденция использования численных методов для получения ре-шений для этих моделей. Однако при этом имеется ряд особенностей, ограничивающих прямое применение численных методов, что связано с использованием одинаковых уравнений для существенно различаю-щихся сред, в которых происходит движение контактов. Выявлению этих особенностей и посвящена данная работа.

Цель работы – математическое моделирование многократного отброса подвижного контакта коммутационного электрического аппарата для упруговязкой модели удара.

## Залачи исслелования:

1. Анализ известных соотношений для упруговязкой модели.

2. Расчет процесса отброса.

гасчет процесса отороса.
 Анализ особенностей численного расчета отброса контактов коммутирующего ЭА с использованием упруговязкой модели.
 Анализ известной упруговязкой модели процесса отброса кон-такта в случае упругого удара. Схема движения подвижного контакта

для упруговязкой модели однократного удара и элементы механической схемы замещения показана на рис. 1. Обозначения на схеме: 1 – подвижный контакт; 2 – неподвижный контакт; m – масса подвижного контакта;  $c_1$ ,  $c_2$  – коэффициенты жесткости контактной пружины и материа-



Рис. 1.

ла контакта соответственно; x -ось, вдоль которой происходит движение контактов; F -сила нажатия пружины в момент соприкосновения подвижного и неподвижного контактов; x(t) -расстояние между подвижным и неподвижным контактами, характеризующее перемещение подвижного контакта относительно неподвижной точки P контакта 2; v(-0), v(+0) -значение вектора скорости подвижного контакта соответственно до и после момента соприкосновения контактов;  $b_1, b_2$  – параметры, характеризующие

свойства демпфирующих элементов, соответственно пружины и контактов. Контакты 1 и 2 показаны в виде полусфер, что позволяет рассматривать процесс их соприкосновения в одной точке *P*. Объемы контактов, подверженные упругой деформации, выделены серым цветом.

подверженные упругой деформации, выделены серым цветом. В отличие от "упругой" модели [5], "упруговязкая" модельучитывает деформацию контактов при соударении в процессе отброса. Время соударения принимается не мгновенным, а отличным от нуля. Процесс первого отброса включает интервал времени t<sub>1</sub> деформации, в течение которого части объемов контактов подвергаются упругой деформации. Возникающая сила упругой деформации препятствует дальнейшему движению подвижного контакта в тело неподвижного контакта после соприкосновения. В некоторый момент времени движение контактов прекращается и под действием этой силы они расходятся.

При составлении уравнений математической модели отброса в этом случае приняты следующие допущения:

движение контактов до и после отброса происходит вдоль одной оси;

- процесс отброса (вибрации) рассматривается без учета удара якоря;

 – упругие свойства контактов и пружин считаются неизменными при многократных соударениях контактов.

В работе [5] приведена "упруговязкая" модель в виде дифференциального уравнения второго порядка, описывающего изменение силы, действующей на точечную массу при движении после однократного упругого

удара о неподвижное тело (начало отсчета времени процесса) и начальных условий, определяющих величины перемещения и скорости:

$$\begin{cases}
m\frac{d^{2}x(t)}{dt^{2}} + b_{1}\frac{dx(t)}{dt} + c_{1}x(t) + \left(b_{2}\frac{dx(t)}{dt} + c_{2}x(t)\right)\delta(t_{1}) = F; \\
x(0) = 0; \\
v(0) = v_{+0}; \\
v_{+0} = -a \cdot v_{-0},
\end{cases}$$
(1)

где  $\delta(t_1)$  – обобщенная функция, равная 1 при x(t) > 0 (контакты сомкнуты и деформируются), и 0 при x(t) < 0 (контакты разомкнуты вследствие отброса);  $t_1$  – момент начала первого отброса подвижного контакта; a –коэффициент восстановления контактного материала.

Как видно из (1), наличие обобщенной функции требует построения решения x(t) дифференциального уравнения с использованием не аналитических, а обобщенных функций [6].Однако, момент времени  $t_1$ , для которого определена функция  $\delta(t_1)$ , является неизвестным параметром и задача его определения является самостоятельной. Другими словами, на множестве обобщенных функций построение решения системы (1) представляет собой сложную математическую задачу.

Выходом из этой ситуации является построение решения для двух смежных интервалов времени:

I интервал –  $0 < t \le t_1$  – замкнутое состояние контактов, деформация;

II интервал –  $t \ge t_1$  – разомкнутое состояние – отброс контактов.

В известной литературе [2] построение решений для этих интервалов проводится независимо друг от друга, что позволяет использовать локальные системы координат с началом отсчета времени процесса в каждой t = 0. Такое дополнительное допущение позволяет упростить запись начальных условий для обоих интервалов. Получаемые в результате решения для x(t) представляются на одном графике, с учетом сдвига на  $t_1$ . Однако, при этом снижается точность моделирования физических процессов, поскольку предполагается, что процессы вибрации контактов на каждом интервале заканчиваются в пределах этих интервалов. На рис. 2 показаны графические зависимости перемещения x(t) и скорости v(t) подвижного контакта, приведенные в [2].

Уравнения модели для замкнутого состояния контактов (деформация). Полагая  $\delta(t_1) = 1$ , система уравнений (1) приобретает вид:



$$\begin{cases} m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + (b_1 + b_2) \frac{dx(t)}{dt} + (c_1 + c_2) x(t) = -F; \\ 0 < t \le t_1; \\ x(0) = 0; \\ v(0) = v_{+0} = -a \cdot v_{-0}. \end{cases}$$
(2)

Решение системы (2) известно [3] и может быть представлено как:  $x(t) = C_0 + C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t}, \qquad (3)$ где  $C_0, C_1, C_2$  – постоянные интегрирования;  $\lambda_1, \lambda_2$  – корни характеристи-

где  $C_0$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  – постоянные интегрирования;  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  – корни характеристического уравнения для дифференциального уравнения системы (1).

С использованием математического пакета Maple [7] аналитические выражения для коэффициентов  $C_0$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  получены в виде:

$$C_{0} = F/(c_{1} + c_{2});$$

$$C_{1} = -\frac{1}{2}\sqrt{(b_{1} + b_{2})^{2} - 4m(c_{1} + c_{2})} \times$$

$$\times \frac{2vam(c_{1} + c_{2}) + F\left(b_{1} + b_{2} + \sqrt{(b_{1} + b_{2})^{2} - 4m(c_{1} + c_{2})}\right)}{(c_{1} + c_{2})(b_{1} + b_{2})^{2} - 4m(c_{1} + c_{2})};$$

$$C_{2} = \frac{1}{2}\sqrt{(b_{1} + b_{2})^{2} - 4m(c_{1} + c_{2})} \times$$

$$\times \frac{2vam(c_{1} + c_{2}) + F\left(b_{1} + b_{2} - \sqrt{(b_{1} + b_{2})^{2} - 4m(c_{1} + c_{2})}\right)}{(c_{1} + c_{2})(b_{1} + b_{2})^{2} - 4m(c_{1} + c_{2})};$$

$$\lambda_{1,2} = -\frac{1}{2m}\left((b_{1} + b_{2})\mathbf{m}\sqrt{(b_{1} + b_{2})^{2} - 4m(c_{1} + c_{2})}\right).$$
(4)

Для определения длительности первого интервала решается урав-

нение x(t) = 0.

Уравнения модели для разомкнутого состояния контактов (отброс). В этом случае  $\delta(t_1) = 0$  и система уравнений (1) преобразуется:

$$\begin{cases} m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + b_1 \frac{dx(t)}{dt} + c_1 x(t) = F; \\ t > t_1; \\ x(t_1) = 0; \\ v_{II}(t_1) = -a v_{I}(t_1), \end{cases}$$
(5)

где  $v_{\rm I}(t_1), v_{\rm II}(t_1)$  – скорость подвижного контакта в конце первого и начале второго интервала первого отброса.

В общем случае решение системы (5) имеет вид (3). Для локальной системы координат коэффициенты  $C_0$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  равны:

 $C_0 = F/c_1;$ 

$$C_{1} = -\frac{1}{2}\sqrt{b_{1}^{2} - 4mc_{1}} \frac{4vamc_{1} + F\left(b_{1} + \sqrt{b_{1}^{2} - 4mc_{1}}\right)}{b_{1}^{2} - 4mc_{1}};$$

$$C_{2} = \frac{1}{2}\sqrt{b_{1}^{2} - 4mc_{1}} \frac{4vamc_{1} + F\left(b_{1} - \sqrt{b_{1}^{2} - 4mc_{1}}\right)}{b_{1}^{2} - 4mc_{1}};$$

$$\lambda_{1,2} = -\frac{1}{2m}\left(b_{1} \mathbf{m}\sqrt{b_{1}^{2} - 4mc_{1}}\right).$$
(6)

Приведенные соотношения (4) и (6) позволяют получить решения систем (2) и (5) в виде аналитических функций.

Получение аналитических выражений для x(t) в общей системе координат с учетом начальных условий для  $x(t_1)$  и  $v(t_1)$  при использовании математического пакета Maple не представляет сложностей. Изза громоздкости это выражение не приводится.

Анализ приведенных соотношений для упруговязкой модели показывает, что решение задачи отброса контакта удается построить с помощью аналитических функций. Недостатком такого подхода является то, что при построении решения использовано допущение о независимости процессов деформации и отброса контактов. Кроме того, решение пригодно только для одиночного отброса, поскольку для последующих отбросов необходимо получить решение на предыдущем интервале.

## Результаты расчета.

Расчет процесса в интервале I замкнутого состояния контак-

*тов.* Численный расчет упруговязкой модели проведен для системы двух контактов с параметрами, использованными для упругой модели [5]. Исходные данные для расчета: m = 0.02 кг, F = 40 H,  $c_1 = 5000$  кг/м,  $c_2 = 9 \cdot 10^{10}$  кг/м, a = 0.7;  $b_1 = 0$ ,  $b_2 = 9563$  H·c/м; начальная скорость первого отброса v(-0) = -1.5 м/с. Для интервала I уравнение модели имеет вид

$$0.02\frac{d^2x(t)}{dt^2} + 9563\frac{dx(t)}{dt} + 9 \cdot 10^{10}x(t) = 40.$$
<sup>(7)</sup>

Решение уравнения (7) для перемещения x(t) подвижного контакта и скорости v(t) представляется в виде аналитических функций:

$$x(t) = 4,982 \cdot 10^{-7} e^{239075t} \sin(2,1078 \cdot 10^{6} t) - -4.444 \cdot 10^{-10} e^{239075t} \cos(2,1078 \cdot 10^{6} t) + 4.444 \cdot 10^{-10}.$$
(8)

$$v(t) = 0.12e^{239075t} \sin\left(2.1078 \cdot 10^6 t\right) - 1.05e^{239075t} \cos\left(2.1078 \cdot 10^6 t\right).$$
(9)

Длительность интервала времени *t*<sub>1</sub> от начала процесса до отброса неподвижного контакта равна

$$t_1 = 1,489 \cdot 10^{-6}, c.$$
 (10)

Графики зависимостей x(t) и v(t) с учетом соотношений (8)-(10) приведены на рис. 3.



Расчет процесса в интервале II первого отброса контактов. Для интервала II уравнение модели имеет вид

$$0.02\frac{d^2x(t)}{dt^2} + 5000x(t) = 40.$$
(11)

Решение уравнения (11) для перемещения  $x_{II}(t)$  и скорости  $v_{II}(t)$  подвижного контакта в локальной системе координат представляется

аналитическими функциями:

$$x_{\rm II}(t) = -1,0298 \cdot 10^{-3} \sin(500t) - 8 \cdot 10^{-3} \cos(500t) + 8 \cdot 10^{-3}.$$
 (12)

$$v_{\rm II}(t) = -0.515\sin(500t) + 4\cos(500t).$$
(13)

Длительность интервала времени  $t_{\Pi}$  в локальной системе координат (от начала отброса неподвижного контакта) равна

$$t_{\rm II} = 1,256 \cdot 10^{-2} \,, {\rm c} \,.$$
 (14)

Графики зависимостей  $x_{II}(t)$  и  $v_{II}(t)$  с учетом соотношений (12)-(14) приведены на рис. 4.

# Анализ особенностей упруговязкой модели.

Первая особенность. Численные расчеты показали, что рассматриваемые интервалы процесса одиночного отброса неподвижного контакта существенно различаются масштабами как по времени, так и по перемещению. Так, временные интервалы I и II отличаются на 4 порядка, а по перемещению – на 5 порядков. В результате при графическом отображении результатов расчета их не удается отобразить "информативно" в едином интервале процесса одиночного отброса, а тем более много кратного отброса контакта. Это связано с тем, что кратковременные интервалы деформации "не видны" на фоне интервалов отбросов. Для графического представления результатов расчета однократного отброса контактов можно воспользоваться "совмещенными разномасштабными" графиками. Они строятся раздельно для положительных и отрицательных перемещений, соответствующих интервалам деформации (I) и отброса (II) с учетом "удобных" для чтения масштабов перемещений и времени. Схема построения таких совмещенных разномасштабных графиков показана на рис. 5.



особенность. Вторая Как показано ранее, модель предполагает построение решение для двух интервалов (I и II), причем параметры интервала отброса (II) существенно зависят от параметров предыдущей деформации (I) контактов. В случае многократного отброса точность модели в основном определяется точностью моделирования деформации неподвижного контакта. Это необходимо



*Третья особенность.* Как видно на ри  $-2 \times 10^{-7}$   $-4 \times 10^{-7}$   $-5 \times 10^{-7}$   $-1 \times 10^{-6}$   $x_{I}(t)$   $x_{II}(t)$   $x_{II}(t)$  $x_{I$ 

учитывать при экспериментальных исследованиях. *Третья особенность*. Как видно на рис. 4, кривая  $x_{II}(t)$  для переме-

щения контакта в интервале отброса вначале имеет пологий участок. Результаты численного моделирование этого участка и предыдущего интервала приведены на рис. 6. Анализ ланных позволяет этих сделать вывод о том, что рассматриваемая модель упруговязкого удара не в полной мере учитывает физические процессы деформации и отброса контактов. Начальные условия для интервала II не учитывают вибрации подвижно-

го и неподвижного контактов. При численном моделировании это привело к тому, что в кривой перемещения для интервала отброса появился участок с отрицательным перемещением, характерным для деформации, причем величина этого перемещения превышает амплитуду деформации подвижного контакта. Учесть вибрацию контактов можно было бы путем усложнения модели, однако этот вопрос требует дополнительных исследований.

Четвертая особенность. Эта особенность связана с возможностью моделирования многократного отброса контакта с использованием численных методов. Учет временных участков или интервалов, в пределах которых амплитуды перемещений отличаются на несколько порядков может быть реализован только при использовании сеток с переменным шагом. Обоснование выбора шага для каждого интервала становится самостоятельной задачей. Проведенные исследования позволяют, что как одно из возможных направлений решения этой задачи, использовать упрощенные модели (упругую и упруговязкую) удара контактов для получения оценок временных интервалов и амплитуд перемещений контактов, поскольку для них известны аналитические соотношения.

Выводы. 1. Проведен анализ известной математической модели процесса однократного отброса подвижного контакта коммутационного электрического аппарата для случая упруговязкогого удара. Установлены основные недостатки этой модели: существенное различие интервалов времени и перемещений контактов при деформации и отбросе, достигающее 4-5 порядков. Для графического представления результатов расчета однократного отброса контактов в этом случае

можно воспользоваться совмещенными графиками, которые строятся раздельно для положительных и отрицательных перемещений в соответствующих масштабах перемещений и времени.

2. Установлено, что при расчете отброса его параметры (перемещение и длительность) существенно зависят от параметров предыдущей деформации, что требует высокой точности расчетов как отброса, так и деформации контактов. При многократном отбросе подвижного контакта точность известной модели в основном определяется точностью моделирования деформации неподвижного контакта. Этот факт необходимо учитывать при экспериментальных исследованиях отброса контактов.

3. При использовании численных методов для расчета многократного отброса контактов на основе сложных моделей (упруговязкого либо упруговязкопластического) удара шаг дискретизации перемещения контакта должен быть переменным и существенно (на 4-5 порядков) отличаться для интервалов деформации и отброса контактов. Для выбора временных интервалов рекомендуется использовать приближенную модель, позволяющую оценить длительности этих интервалов по аналитическим соотношениям.

4. Проведен анализ численного моделирования процесса отброса контактов на основе модели упруговязкого удара, который позволил установить, что эта модель не в полной мере учитывает физические процессы удара. В частности, из-за неучета вибрации неподвижного контакта при расчетах отскока подвижного контакта в кривой его перемещения появляется участок с отрицательным перемещением, характерным для деформации. Для учета вибрации контактов в этом случае необходимо усложнение модели удара.

Список литературы: 1. Яковенко В.Б. Моделирование и расчет вибрационных систем / Уч. пособие. - К.:УМК ВО, 1988. - 232 с. 2. Справочник по расчету и конструированию контактных частей сильноточных электрических аппаратов / Н.М. Афанасьев, В.В. Афанасьев, В.В. Борисов и др.: Под ред. В.В. Афанасьева. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 384 с. 3. Шевченко С.М. Движение и удары в электрических аппаратах автоматического управления. - М.: Энергия, 1979. -144 с. 4. Лелюк Н.А., Лупиков В.С. Модели контактов электрического аппарата при исследовании вибрации // Вестник Национального технического университета "Харьковский политехнический институт". - Харьков: НТУ "ХПИ". -2008. – № 7. – С. 73-81. 5. Лелюк Н.А., Лупиков В.С. Моделирование функции отброса подвижного контакта коммутирующего электрического аппарата для упругой модели вибрации // Вестник Национального технического университета "Харьковский политехнический институт". - Харьков: НТУ "ХПИ". -2010. – № 36. – С. 69-79. **6**. *Владимиров В.С.* Уравнения математической физи-ки. – М.: Наука. Гл. ред. физ. мат. лит., 1971. – 512 с. **7**. *Матросов А.В.* Марle 6. Решение задач высшей математики и механики. - СПб.: БХВ-Петербург, 2001. – 528 c.

Поступила в редколлегию 27.09.2010

## УДК 621.316:532.232

*А.Н. МОРОЗ*, канд. техн. наук, докторант, ХНТУСХ им. Петра Василенка, Харьков *А.Д. ЧЕРЕНКОВ*, доктор техн. наук, проф., ХНТУСХ им. Петра Василенка, Харьков

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СУШИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ ДЛЯ СУШКИ ШЕРСТИ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Наведено результати повнофакторного експерименту по визначению оптимальних параметрів сушильної установки вовни безперервної дії з використанням електромагнітних полів крайвисокочастотного діапазону.

Приводится результаты полнофакторного эксперимента по определению оптимальных параметров сушильной установки шерсти непрерывного действия с использованием электромагнитных полей крайневысокочастотного диапазона.

Введение. Восстановление шерстяной промышленности Украины невозможно без повышения конкурентоспособности предприятий легкой промышленности, занимающихся производством изделий из шерсти, что возможно за счет снижения себестоимости шерстного волокна и повышении его качества. Использование электромагнитной энергии крайневысокочастотного (КВЧ) диапазона при непрерывном процессе сушки шерсти с одновременной интенсивной эвакуацией пара позволит существенно уменьшить потребление энергии для процесса сушки, уменьшить габариты и металлоемкость сушильного оборудования, а также повысить производительность фабрик первичной обработки шерсти.

Важным условием успешного применения электромагнитной энергии КВЧ диапазона при непрерывном способе сушки шерсти является определение оптимальных параметров ЭМ и сушильной установки.

Цель, задание исследования. Определение оптимальных параметров ЭМП при использовании излучений КВЧ диапазона, времени сушки и скорости движения ленточного транспортера в сушильной машине непрерывного действия.

**Многофакторный эксперимент.** Для определения оптимальных параметров ЭМП для сушки влажной шерсти был проведен многофакторный эксперимент. Для проведения экспериментальных исследова-

ний была использована разработанная сушильная установка с дифракционными источниками электромагнитной энергии с частотой 36 ГГц. Излучение осуществлялось пирамидальным рупором, изготовленным из листовой латуни толщиной 2 мм с помощью пайки. Размер раскрыва рупора 30×20 мм (без учета толщины металла). Рупор выводился на стандартное сечение волновода 7,2×3,4 мм [1].

В сушильной камере были установлены два источника электромагнитной энергии с выходной мощностью по 250 Вт. Шерсть, предназначенная для сушки, располагалась на ленточном транспортере шириной 0,6 м и длиной 5 м, в качестве несущей поверхности транспортера используется тефлоновая сетка с размерами ячеек 8×8 мм, так как этот материал прекрасно переносят микроволновое излучение. Такие сетки обладают высокой прочностью на разрыв, гибкостью и практически нерастяжимы, имеют превосходную химическую стойкость и высокую износостойкость, физиологически инертны и обладают антиадгезионными свойствами, что обеспечивает сохранение природных качеств шерсти. Привод транспортера осуществляется асинхронным двигателем АИР80В4 мощностью 1,5 кВт и частотой вращения 1420 об/мин. Для регулирования скорости движения ленты транспортера (от 0 до 0,15 м/с), в зависимости от влажности шерсти, использовался преобразователь частоты VFD015EL43А. Расчетная скорость движения ленты транспортера 0,1 м/с, расчетная толщина слоя шерсти 0,06 м.

Для отсасывания пара, образующегося при воздействии на влажную шерсть электромагнитного излучения КВЧ, используется тягодутьевая машина ВД-2,7 производительность 1100 м<sup>3</sup>/час и полным давлением 1400 Па, потребляемая мощность электродвигателя машины 3 кВт.

Параметры сушильной машины следующие: общая потребляемая мощность 5,1 кВт; частота излучения 36 ГГц; напряжение питания 380 В; частота напряжения питания 50 Гц; высота входящего и выходящего отверстий 70 мм; габаритные размеры (длина × ширина × высота) 5080 × 950 × 1750 мм.

В качестве отклика при экспериментальных исследования принималась влажность сухой шерсти, которая определялась по формуле

$$\varphi_0 = \frac{m_1 - m_2}{m_2} 100\% , \qquad (1)$$

где  $m_1$  – масса влажной шерсти, кг;  $m_2$  – масса сухой шерсти, кг.

В соответствии с ГОСТ влажность сухой шерсти должна составлять 12-19 %, для расчетов принимаем влажность 15 %. Для экспери-
ментов использовалась полутонкая шерсть класса  $60^{\kappa}$  с влажность 60 %. Для взвешивания использовались лабораторные технические весы третьего класса точности с пределом взвешивания 1 кг. Результаты экспериментов приведены в табл. 1.

Интервал варьирования и уровень факторов	Плотность ЭМ энер- гии, поглощаемой влажной шерстью, Дж/(м <sup>3</sup> ·c)	Объем влаж- ной шерсти, м <sup>3</sup>	Время сушки, с
Нулевой уровень $X_i = 0$	4000	0,03	5,5
Интервал варьиро- вания λ <sub>i</sub>	2000	0,01	1,0
Верхний уровень $X_i = +1$	6000	0,04	6,5
Нижний уровень $X_i = -1$	2000	0,02	4,5
Кодовое обозначе- ние	$X_1$	$X_2$	$X_3$

Таблица 1 – Значение факторов и их интервалы варьирования

Для построения плана второго порядка были использованы данные, приведенные в табл. 2 [2].

Число факторов, К	Число точек ядра	Число звездных точек, <i>N</i> <sub>a</sub>	Число нулевых точек, N <sub>0</sub>	Звездные точки, α	Число опытов, N
3	8	6	6	1,682	20

Таблица 2 – Исходные данные для построения плана второго порядка

Предварительно были составлены матрица планирования эксперимента, матрица расчета коэффициентов регрессии, расчет дисперсии и адекватности. После экспериментальных исследований и расчетов было получено уравнение регрессии для сушки шерсти электромагнитной энергией КВЧ диапазона

$$y_{\rm iii} = 20,3 - 7,1 X_1 + 6,8 X_2 - 4,3 X_3 + 0,51 X_1 X_2 + 4,414 X_1 X_3 + 2,95 X_2 X_3 + 6,8 X_1^2 + 5,3 X_2^2 + 5,0 X_3^2.$$
(2)

Проверка значимости коэффициентов регрессии проводилась при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  по критерию Стьюдента [2, 3]. С учетом значимости коэффициентов, уравнение регрессии для сушки шерсти принимает вид уравнения (2). На основе проверки данного уравнения

на адекватность по критерию Фишера [2, 3] сделан вывод, что уравнение адекватно описывает реальный процесс, и, следовательно, позволяет оценить характер влияния каждого из факторов на функцию отклика. Кроме того, стало возможным практическое использование полученной модели для прогнозирования значений выходного параметра Y в области варьирования параметров  $X_i$ .

Оптимальные параметры процесса сушки. Для нахождения оптимальных параметров процесса решена система уравнений, полученных приравниванием к нулю значений градиентов компонентов, вычисленных с помощью выражения

$$\frac{\partial Y}{\partial X_i} = b_i + 2b_{ii}X_i + \sum_{i=1}^n b_{ij}X_j = 0, \qquad (3)$$

где  $X_i$ ,  $X_j$  – кодированное значение фактора, по которому берется производная, и взаимодействующего с ним, соответственно;  $b_i$ ,  $b_{ij}$  – коэффициенты уравнения регрессии.

Для выражения (3) получена следующая система уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial Y}{\partial X_1} &= -7, 1+13, 6X_1 + 0, 51X_2 + 4, 14X_3 = 0; \\ \frac{\partial Y}{\partial X_2} &= 6, 8+0, 51X_1 + 10, 6X_2 + 2, 95X_3 = 0; \\ \frac{\partial Y}{\partial X_3} &= -4, 3+4, 14X_1 + 2, 95X_2 + 10X_3 = 0. \end{aligned}$$
(4)

Решение уравнения регрессии (2) дает следующее значения факторов в оптимальной точке:  $X_{1on}=0,4$ ;  $X_{2on}=-0,8$ ;  $X_{3on}=0,5$ , что соответствует таким значениям натуральных параметров: плотность ЭМ энергии



поглощаемой влажной шерстью 4800 Дж/(м<sup>3</sup>·с); объем влажной шерсти 0,022 м<sup>3</sup>; время сушки 6 секунд (скорость движения транспортера 0,1 м/с). Влажность высушенной шерсти составила не более 15%.

На рис. 1 показаны зависимости влажности шерсти от времени сушки и объемной плотно-

сти электромагнитной энергии. Линия 1 соответствует плотности электромагнитной энергии 5000 Дж/(м<sup>3</sup>·с), линия 2 – плотности 2500

Дж/(м<sup>3</sup>·с).

Экспериментальные исследования показали, что при скорости движения транспортера 0,1 м/с необходим источник электромагнитной энергии 500 Вт с частотой излучения 36 ГГц, который обеспечит скорость сушки влажной шерсти 7,5% за секунду.

**Выводы.** Сушка шерсти, с начальной влажностью 60 % до влажности 15%, в сушильной машине непрерывного действия с дифракционными источниками электромагнитной энергии с частотой 36 ГГц должна осуществляться при следующих параметрах: 2 генератора с выходной мощность по 250 Вт, толщина слоя шерсти 0,06 м, скорость движения транспортера 0,1 м/с.

Список литературы: 1. Мороз А. Н. Обоснование конструктивных параметров и экспериментальные исследования пирамидального рупорного излучателя / А.Н. Мороз, А.Д. Черенков // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства "Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України". – Харків: ХНТУСГ, 2008. – Вип. 73. – Т. 1. – С. 83-85. 2. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / Спиридонов А.А. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с. 3. Винарский М.С. Планирование эксперимента в технологических исследованиях / М.С. Винарский, М.В. Лурье. – К.: Техника, 1975. – 168 с.



Мороз Александр Николаевич, доцент, канд. техн. наук. Закончил Харьковский институт механизации и электрификации сельского хозяйства в 1984 г. по специальности инженер-электрик. Учился в аспирантуре Московского гидромелиоративного института в 1987-1990 гг., там же защитил диссертацию кандидата технических наук в 1991 г. Директор учебно-научного института Энергетики и компьютерных технологий Харьковского национального технического университета сельского хозяйства с 2009 г.

Научные интересы связаны с процессами первичной обработки шерсти с использованием акустических колебаний и электромагнитных волн сверхвысокой частоты.



Черенков Александр Данилович, профессор, доктор техн. наук. Закончил Харьковский политехнический институт в 1967 г. по специальности инженер-радиотехник. Диссертацию доктора технических наук защитил в 2001 г.

Научные интересы связанные с направлениями использования электромагнитных полей в технологических процессах и исследования их влияния на биологические объекты.

Поступила в редколлегию 11.11.2010

# УДК 621.319.4

Б.Г.НАБОКА, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПИ", Харьков *А.В. БЕСПРОЗВАННЫХ*, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПИ", Харьков *Е.С. МОСКВИТИН*, ассистент, НТУ "ХПИ", Харьков *М.В. БУТКО*, гл. специалист, фирма "STEKS", *С.М. БУТКО*, специалист, фирма "STEKS", *А.А. ГОЛОВАНЬ*, нач. службы эксплуатации, "Полтавоблэнерго",

Полтава

# КРИТЕРИИ ПО ТАНГЕНСУ УГЛА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ С БУМАЖНО-ПРОПИТАННОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

Наведено кореляційні залежності між тангенсом кута діелектричних втрат tgð – неруйнівним параметром ізоляції, та угомленою міцністю кабельних паперів на злом – руйнівним параметром ізоляції. Це дозволяє ввести обґрунтовані критерії технічного стану ізоляції кабелів за параметром tgð.

Представлены корреляционные зависимости между тангенсом угла диэлектрических потерь tgδ – неразрушающим параметром изоляции, и усталостной прочностью кабельных бумаг на излом – разрушающим параметром изоляции. Это позволяет ввести обоснованные критерии технического состояния изоляции кабелей по параметру tgδ.

Введение. Физический износ силовых кабелей с бумажномасляной изоляцией (БМИ) напряженим 6-10 кВ городских и областных кабельных сетей находится на уровне 70-80%, а удельная повреждаемость кабельных линий (КЛ) в среднем составляет от 4,5 до 7 случаев на 100 км/год.

Для повышения надежности работы силовых кабелей и кабельных линий применяется система планово-профилактических испытаний.

Техническое состояние изоляции кабелей определяют путем подачи постоянного испытательного напряжения, превышающего номинальное в 6 раз (табл. 1) [1]. В ряде случаев испытания выполняются переменным напряжением промышленной частоты и повышенным напряжением с частотой 0,1 Гц.

Испытание кабелей повышенным постоянным испытательным напряжением не позволяет получить достоверную информацию о

Вид испытательного напряжения	Номинальное напряжение, кВ		е, кВ			
	До	2	3	6	10	20
	1					
Выпрямленное напряжение	2,5	12	18	36	60	175
Переменное напряжение частоты 0,1 Гц спе-				12	18	35
циальной формы (косинусный импульс)						

Таблица 1 – Испытательные напряжения для кабельных линий с БМИ при приеме в эксплуатации и в эксплуатации

реальном техническом состоянии силовых кабелей, а для длительно эксплуатирующихся силовых кабелей часто заканчивается пробоем изоляции. Поэтому такие испытания классифицируют как испытания, разрушающие изоляцию кабелей. Испытания повышенным постоянным напряжением целесообразно проводить при вводе новых КЛ в эксплуатацию, после ремонта кабельных линий, а также при отсутствии возможности применения для диагностики силовых КЛ средств неразрушающего контроля. В остальных случаях техническое состояние изоляции КЛ следует оценивать на основе применения неразрушающей диагностики.

Последние десять лет в Украине и за рубежом ведутся интенсивные работы по совершенствованию неразрушающих методов диагностики изоляции и выпуску предназначенной для этого аппаратуры. Эти методы ориентированы на диагностические испытания силовых кабелей и кабельных линий в эксплуатации. Достоверная диагностика состояния изоляции неразрушающими методами позволяет отказаться от профилактических испытаний изоляции разрушающими методами контроля, которые во многих случаях приводят к уменьшению ресурса, несвоевременному и непредсказуемому пробою изоляции [2-4].

Важным вопросом является оценка результатов диагностики и формулирование заключения. Для этого необходимо иметь критерии оценки по диагностируемым параметрам, которые позволяют оценить техническое состояние изоляции и прогнозировать остаточный ресурс кабеля.

Появление отечественных новых современных цифровых приборов для измерения емкости и тангенса угла диэлектрических потерь (измеритель потерь изоляции ИПИ-10, цифровой мост СА-7100) дает возможность получать интегральные характеристики состояния изоляции кабелей и кабельных линий в целом. Эти приборы работают на промышленной частоте 50 Гц, что связано с исключением резонансных явлений при диагностировании протяженных КЛ. Они имеют относительно низкую стоимость по сравнению с другими диагностиче-

скими системами, высокую надежность, простоту в использовании, помехоустойчивость, малое время испытаний, безопасность, низкие трудозатраты при использовании.

Однако обоснованные критерии оценки по параметру tg8 – тангенсу угла диэлектрических потерь, который можно использовать при проведении диагностических обследований в эксплуатации для оценки технического состояния силовых кабелей энергосистем с БМИ, отсутствуют.

Цель статьи – установление критериев по tgo для оценки технического состояния силовых кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией в эксплуатации.

Оценка состояния силовых кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией. Обоснованные критерии оценки состояния БМИ получены на основе разрушающих механических испытаний в лабораторных условиях. Для оценки технического состояния силовых кабелей с БМИ используется усталостная прочность кабельных бумаг на излом – число двойных перегибов. Этот разрушающий параметр весьма чувствителен к старению. Он меняется в процессе эксплуатации кабелей монотонно: от  $N \ge 2000$  в исходном состоянии до N = 10-50 в состоянии, соответствующем исчерпанию ресурса кабелей с БМИ [5].

Силовые кабели с бумажно-пропитанной изоляцией содержат два вида изоляции – фазную и поясную. В исходном состоянии свойства этих видов изоляции – идентичные. В процессе старения кабелей появляются различия, вызванные деструкцией целлюлозы и миграцией низкомолекулярных полярных продуктов (НМП) ее разложения (воды, фуранов) в более холодную часть кабеля – к оболочке, в поясную изоляцию.

Появляются различия свойств фазной и поясной изоляции – признаки старения кабелей. Для НМП характерно повышенное значение tgô. В результате tgô поясной изоляции увеличивается, а число двойных перегибов до излома – уменьшается.

В готовом кабеле свойства фазной и поясной изоляции отдельно измерить невозможно. При любой схеме обследования электрическое поле попадает как в фазную, так и в поясную изоляцию. Схемы обследований могут быть разными:

 a) A-S; B-S; C-S – "жила – против двух других и оболочки". При этом получают оценку свойств, в основном, фазной изоляции кабеля.

б) А,В,С-О – "три жилы вместе – против оболочки". При этом получают оценку свойств, в основном, поясной изоляции кабеля.

в) А-В; В-С; С-А – одна из фаз относительно другой. Промежуточная схема для получения характеристик межфазного пространства.

Картины векторов напряженности электрического поля при



обследовании трехфазного кабеля приведены на рис. 1 для различных схем: а – "жила-против двух других и оболочки"; б – "две жилы вместе-против третьей и оболочки"; в – "три жилы-против оболочки". Следовательно, измеряются *совокупные* характеристики фазной и поясной изоляции [6].

Для каждой выбранной схемы сканирование структуры изоляции кабелей осуществляется переменным электрическим напряжением. Электрическое поле фокусируется в различных компонентах кабеля – в фазной (схемы A-S; B-S; C-S), поясной (A,B,C-O) изоляции, в межфазном пространстве (A-B; B-C; C-A) (рис. 1) [3].

В исходном состоянии (для нового кабеля) уровень tgб для всех компонентов изоляции (фазной и поясной) практически одинаков и составляет около 0,3-0,4 % на частоте 50 Гц. Интегральные функции распределения тангенсов углов диэлектрических потерь изоляционных промежутков приведены на рис. 2 относительно нового (1) и состаренного (2) кабелей Полтавоблэнерго: 1 – ААБ-3х120-10 кВ; 2 – ААБ-3х120-10 кВ.





го (ААБ-3х120-10 кВ) из 29 силовых кабелей с БМИ "Полтавоблэнерго" (ПСТ Жовтнева 110/35/10кВ, РП-2,РУ-6кВ яч. 26, КЛ-6кВ до ТП-115) в натурных условиях на частоте 50 Гц.

Для поясной изоляции (промежуток A,B,C – О) tgб составляет 0,85%, а фазной изоляции (промежутки A-S; B-S; C-S) – 0,81%. Для межфазного пространства (промежутки A-B; B-C; C-A) еще меньше – 0,73%.

Таким образом, кабель имеет все признаки старения изоляции: повышенные значения tg\delta. Причем поясная изоляция состарена в большей степени, чем фазная. Возникает вопрос, какая часть ресурса изоляции исчерпана к данному моменту?

Анализ характеристик изоляции. Ответ на поставленный вопрос дают результаты испытаний усталостных характеристик изоляционных лент, выполненных в лабораторных условиях (рис. 3) на коротких отрезках кабелей энергосистем, полученных во время ремонтных работ.

В исходном состоянии для кабельных бумаг число двойных перегибов, выдерживаемых на излом, должно превышать 2000: N > 2000. Интегральные функции распределения усталостной прочности на излом полосок поясной и фазной изоляции кабеля AAБ-3x120-10 кВ показаны на рис. 4. Для данного кабеля, как видно на рис. 4, имеем:

а) для фазной изоляции – в среднем  $N_f = 2270$ ;

б) для поясной изоляции – в среднем  $N_p = 530$ .



Критическое значение параметра N, при котором ресурс бумажно-масляной изоляции можно считать исчерпанным, составляет  $N \approx 10$ . Следовательно, фазная изоляция практически не состарилась, а поясная – исчерпала почти три четверти своего ресурса:

 $(2000 - 530)/(2000 - 10) = 1470/1990 \approx 0.74.$ 

На рис. 5 показана корреляционная зависимость между усталостной прочностью фазной и поясной изоляции кабеля AAБ-3x120-10 кВ и тангенсом угла диэлектрических потерь (параметры N и tgδ). Для параметра N характерен большой разброс в отличие от параметра tgδ. Экстраполируя зависимость tg $\delta(N)$  в область критических значений параметра  $N \approx 10$ , получаем оценку критического значения тангенса угла диэлектрических потерь: tg $\delta \approx 1\%$ .

Как показывают результаты усталостных испытаний кабельных бумаг на излом, можно ввести следующую градацию состояний изоляции:

а) 0,4% и меньше – нормальное состояние изоляции;

б) 0,4 – 0,6% – есть начальные признаки старения изоляции;

в) 0,6 – 0,8% – умеренное старение изоляции (соответствующее, исчерпанию около три четверти ресурса);

г) 0,8 – 2% – критическое состояние изоляции, требующее ремонта линии;

д) свыше 2% – опасное состояние, которое может привести к тепловому пробою кабеля.

На рис. 6 приведены результаты обследований кабельных линий "Полтавэнерго" (по состоянию на май 2009 г.) с концевыми разделками с допустимыми границами по tgδ в виде функций tg $\delta(C)$ , где C – электрическая емкость кабкльной трассы: а – часть кабелей; б – все кабели.



Рис. 6.

На рис. 6 видно, что кабели находятся на разных уровнях старения. Выше выделенной линии 0,8% попали кабели: № 4, № 4v (после ремонта) и № 8 (при напряжении 2 кВ). Примыкает к этой области

также кабель № 17. В указанных кабелях явно проявляется старение изоляции. Далее следует кабели №№9, 16, 20 и 22. Кабель №4 имеет наибольшую длину. Поэтому его характеристики расположились в правой части диаграммы (в области емкостей 100 – 1000 нФ). Тангенс угла диэлектрических потерь измерялся при напряжениях 2 кВ (отмечено символом **b**), 5 кВ (**g**) и 8 кВ (**r**).

Увеличение tgδ с ростом напряжения связано, обычно, с активизацией воздушных включений, которые есть в муфтах или самом кабеле. В данном случае при напряжении 8 кВ уровень tgδ для поясной изоляции составляет 1,5 %, а для межфазной – 2 %. Воздушных включений в межфазной изоляции, вероятно, больше, чем в поясной, в которой при повышении напряжения начинаются ионизационные процессы – частичные разряды. На рис. 7 показана структура БМИ (а) и следы частичных разрядов (б) между слоями бумаги силового кабеля: 1 – слои бумаги; 2 – масляные прослойки (диэлектрические клинья); 3 – воздушные включения. После ремонта уровень tgδ понизился, но остался в области (от 0,6 до 0,8 %), которая рассматривается как область умеренно состаренной изоляции.



Рис. 7.

Относительно высокий уровень tgδ данного кабеля может быть результатом теплового старения изоляции фаз в течение почти 60-летней эксплуатации.

Из всех 29 обследованных кабелей "Полтавоблэнерго" с бумажномасляной изоляцией не оказалось ни одного, изоляция которого была бы состарена до предельного состояния (когда tgδ возрастает свыше 3-4 %, а число двойных перегибов на излом снижается от исходного 2000 до 10-50. Поэтому все эти кабели могут успешно эксплуатироваться и в дальнейшем.

Для кабелей, имеющих уровень tgδ выше 0,8%, необходимо проводить повторные измерения через год. Быстрая деградация какого-

либо кабеля отразится на росте его тангенса угла диэлектрических потерь. Своевременное обнаружение этого процесса позволит предсказать момент приближающегося пробоя.

**Выводы.** Установленные детальные характеристики изоляции каждого кабеля и границы отбраковки по tgδ могут быть использованы в качестве рекомендательных при диагностике силовых кабелей напряжением 6-10 кВ энергосистем.

Список литературы: 1. Норми випробувань силових кабельних ліній напругою до 500 кВ – К.: "КВЩ". – 2009. – 50 с. 2. Привалов И.Н. Неразрушающая диагностика силовых кабельных линий номинальным напряжением 6-35 кВ // Электротехнический рынок. – 2008. – № 2. 3. Кадомская К.П., Качесов В.Е., Лавров Ю.А., Овсянников А.Г., Сахно В.В. Диагностика и мониторинг кабельных сетей среднего напряжения // Электротехника. – 2000. – № 11. – С. 48-51. 4. Канискин В.А., Коцур С.А., Привалов И.Н. Кабели 10 кВ с бумажнопропитанной изоляцией. Неразрушающий метод диагностики / Новости электротехники. – 2005. – № 5 (35). 5. Москвитин Е.С. Оценка технического состояния высоковольтных кабелей с бумажно-масляной изоляцией по числу двойных перегибов // Вестник Национального технического университета "ХПИ". – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2006. – № 34. – С. 34-40. 6. Набока Б.Г., Беспрозванных А.В., Москвитин Е.С. // Электричество, 2010. – №1. – С. 48-54. 7. Вдовико В.П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования. – Новосибирск: Наука, 2007.

Поступила в редколлегию 22.07.2010

# УДК 621.313.181

**В.В. НАНИЙ**, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ", Харьков **А.Г. МИРОШНИЧЕНКО**, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ", Харьков **В.Д. ЮХИМЧУК,** канд. техн. наук, проф., НТУ "ХПИ", Харьков **А.А. ДУНЕВ,** аспирант, НТУ "ХПИ", Харьков **А.М. МАСЛЕННИКОВ,** аспирант, НТУ "ХПИ", Харьков **А.В. ЕГОРОВ,** аспирант, НТУ "ХПИ", Харьков **Д.В. ПОТОЦКИЙ**, ассистент, НТУ "ХПИ", Харьков

# АСПЕКТЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИСПЫТАНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ С КАТЯЩИМСЯ РОТОРОМ

Розглянуто експериментальні дослідження динамічних характеристик двигуна з ротором, що котиться, (ДРК) на базі восьми- і шестипазової конструкції машини. Отримано картини розподілу магнітного поля двигуна з урахуванням нерівномірності його повітряного проміжку для різних типів магнітопровода і приведено їх порівняльний аналіз.

Рассмотрены экспериментальные исследования динамических характеристик двигателя с катящимся ротором (ДКР) на базе восьми- и шестипазовой конструкции машины. Получены картины распределения магнитного поля двигателя с учетом неравномерности его воздушного зазора для разных типов магнитопровода и приведен их сравнительный анализ.

Введение. Двигатели с катящимся ротором – это тихоходные высокомоментные двигатели, принцип действия которых основан на обкатывании ротора по расточке статора под действием силы одностороннего магнитного притяжения, созданного обмоткой статора. Ротор обкатывается по расточке статора, эксцентрично его оси. Благодаря высокому выходному моменту и низкой частоте вращения, двигатели с катящимся ротором могут успешно применяться везде в промышленности, где необходима плавная регулировка поворота рабочего органа при высоком моменте, в основном в качестве безредукторных приводов, благодаря его низким массогабаритным показателям по сравнению с мотор-редукторами.

Цель, задание исследования: провести сравнительный анализ двигателей с катящимся ротором для шести- и восьмипазовой конструкции ДКР при одинаковых токах питания и получить картины магнитного поля для этих типов машин.

Теоретические исследования. Принцип действия двигателя с ка-

тящимся ротором базируется на создании в машине силы одностороннего магнитного притяжения. В общем случае результирующая сила  $Q_0$  притяжения ротора к статору имеет следующий вид [1]:

$$Q_0 = k \cdot d_r \cdot l_s \cdot k_z \cdot B_{0m}^2, \qquad (1)$$

где k – коэффициент пропорциональности, зависящий от схемы обмотки и способа ее питания;  $d_r$  – диаметр ротора;  $l_s$  – активная длина сердечника ротора;  $k_z$  – относительная ширина зубца;  $B_{0m}$  – максимальное значение индукции в воздушном зазоре.

Из (1) следует, что сила прямо пропорциональна квадрату магнитной индукции.

Вращающий момент *M<sub>r</sub>* на валу также зависит от геометрических параметров машины

$$M_r = k \cdot d_r^2 \cdot l_s \cdot k_z \cdot B_{0m}^2 \cdot \sin \theta , \qquad (2)$$

где  $\theta$  – угол нагрузки.

Таким образом, задача заключается в правильном определении распределения магнитной индукции в двигателе.

Рекомендации к проектированию. С этой целью были проведены исследования с применением программного пакета Ansoft Maxwell для шести- и восьмипазового ДКР с Ш-образной конструкцией магнитопровода статора и массивным цилиндрическим ротором.

Для решения задачи необходимо оговорить, что ДКР запитывался от преобразователя частоты, который питал обмотку двигателя дискретными прямоугольными импульсами тока. Двигатель испытывался на разных частотах питания. В шестипазовой конструкции одновременно работали три катушки, в восьмипазовой – четыре. При трех и пяти катушечном питании в восьмипазовой машине момент уменьшался на 10-15%. Наилучшие показатели момента получались при питании одновременно четырех катушек, так как при пяти катушечном питании в восьмипазовом ДКР дополнительно возникала составляющая тормозного момента, которая пагубно влияла на выходной результат.

В восьмипазовой модели ДКР в пазы укладывался провод диаметром 0,45 мм и подавался ток 3 А на катушку, в то время как в шестипазовой конструкции укладывался провод с 0,27 мм в диаметре и подавался ток меньше: 0,7 А на 300 витков в обоих случаях.

Конструктивно эти два вида ДКР почти не отличаются друг от друга, за исключением лишь разности внутренних и внешних диаметров ротора и статора: для шестипазового ДКР она составила 0,16 мм а

## для восьмипазового – 0,3 мм.

Результаты распределения картины магнитного поля для шести-



Рис. 1.

пазовой конструкции при питании обмоток током 0,7 А и воздушным зазором 0,16 мм приведены на рис.1 (вид сбоку). С помощью полученной картины распределения магнитного поля удалось оптимизировать размеры отдельных элементов активной части машины. И в результате восьмипазовый полученный образец ДРК имеет на 20-25 % меньше массогабаритные показатели и на 20 % более высокий вращающий момент.

Картины распределение магнитного поля в роторе для восьмипазовой конструкции

ДКР при питании обмоток током 3 A и максимальным воздушным зазором 1 мм и 0,3 мм приведены на рис. 2 и рис. 3 соответственно (вид сбоку).





ISSN 2079-3944. Вісник НТУ "ХПІ". 2010. № 55

Как видно на рис. 2 и рис. 3, магнитная индукция под крайними рабочими полюсом машины в роторе для восьмипазового ДКР неоднозначна. Так в ДКР с воздушным зазором 1 мм, индукция в крайнем запитанном полюсе машины изменялась от 1,66 Тл до 1,91 Тл, что вызвано чувствительностью к неравномерности воздушного зазора (рис. 2).

В ДКР с воздушным зазором 0,3 мм индукция составила 1,91 Тл под всем полюсом, что говорит о большей силе одностороннего магнитного притяжения, по сравнению с предыдущим диаметром ротора (рис. 3).

Максимальный момент для восьмипазового ДКР при частоте 1 Гц составил 150 Н<sup>м</sup> при воздушном зазоре 1 мм и токе 3 А, а при воздушном зазоре 0,3 мм и том же токе, составил 170 Н<sup>м</sup>, вследствие уменьшения воздушного зазора и увеличении индукции под крайними рабочими полюсами машины.

**Результаты экспериментальных исследований.** Так же в результате экспериментальных исследований были получены следующие зависимости. На рис. 4 и рис. 5 показаны зависимость M = f(I) при разных частотах питания двигателя, для шести- и восьмипазового ДКР соответственно.



Как видно из графиков, восьмипазовый ДРК (рис. 5) при частотах 6 Гц и 9 Гц стартовал только лишь при токе 2,0 и 2,5 А. Это связано с тем, что при таком токе силы одностороннего магнитного притяжения не достаточно, чтобы увлечь ротор во вращение на таких частотах. И для ее увеличения силу тока приходится поднимать [2].

**Выводы**. Полученные результаты дают возможность оптимизировать геометрические размеры активной части машины с последующим увеличением вращающего момента.

Список литературы: 1. Борзяк Ю.Г., Зайков М.А., Наний В.П. Электродвигатели с катящимся ротором. – Киев, Техника, 1982. 2. Бертинов А.И., Варлей В.В. Электрические машины с катящимся ротором. Энергия, – Москва, 1969.













Наний Виталий Викторович, доцент, кандидат технических наук.

Закончил в 1980 г. Харьковский политехнический институт по специальности "Электрические машины". В 1987 г. защитил диссертацию в Харьковском политехническом. На данный момент работает в НТУ "ХПИ" на должности доцента кафедры электрических машин. Научные интересы связаны с исследованием и совершенствованием двигателей с катящимся ротором.

Юхимчук Владимир Данилович, профессор, кандидат технических наук. Закончил в 1968 г. Харьковский политехнический институт по специальности "Электрические машины и аппараты". В 1980 г. защитил диссертацию в Харьковском политехническом институте. Работает в НТУ "ХПИ" на должности профессора кафедры электрических машин.

Научные интересы связаны с исследованием двигателей постоянного тока и их коммутации.

**Мирошниченко Анатолий Георгиевич**, доцент, кандидат технических наук. Закончил в 1972 г. Харьковский политехнический институт по специальности "Электрические машины и аппараты". Доцент кафедры "Электрических машин".

Научные интересы связаны с разработкой и исследованием двигателей с катящимся ротором и сверхпроводниковых электрических машин.

Дунев Алексей Александрович, аспирант кафедры электрических машин. В 2009 г. защитил диплом магистра в Харьковском политехническом институте по специальности "Электрические машины и аппараты". Ассистент кафедры электрических машин с 2009 г.

Научные интересы связаны с исследованием двигателей с катящимся ротором.

Масленников Андрей Михайлович, аспирант. В 2008 г. закончил Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт" по специальности "Электрические машины и аппараты". Научные интересы связаны с исследование двигателей с катящимся ротором для автоматизированного безредукторного электропривода.

Егоров Андрей Владимирович, аспирант. В 2009 г. закончил Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт" по специальности "Электрические машины и аппараты".Научные интересы связаны с исследованием двигателей с катящимся ротором.



Потоцкий Дмитрий Васильевич, ассистент кафедры "Электрических машин". В 2009 г. закончил Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт" по специальности "Электрические машины и аппараты". Научные интересы связаны с исследованием возможности применения наноматериалов в электрических машинах.

Надійшла до редколегії 25.10.2010

# УДК 621.318.3

## И.А. НЕСТЕРЕНКО, аспирант, ВНУ им. В. Даля, Луганск

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИСТЕМ БАРАБАННЫХ СЕПАРАТОРОВ

Досліджено можливість цільового синтезу відкритих багатополюсних електромагнітних систем барабанних сепараторів за критеріями оптимальності: мінімальна вага та мінімальна споживаєма потужність в усталеному тепловому режимі. Отримано рівняння що пов'язують функцію цілі і параметри електромагнітної системи.

Исследована возможность целевого синтеза открытых многополюсных электромагнитных систем барабанных сепараторов по критериям оптимальности: минимальный вес активных материалов, минимальная потребляемая мощность в установившемся тепловом режиме. Получены уравнения оптимальных связей функции цели и параметров электромагнитной системы.

Введение. Барабанные сепараторы предназначены для разделения зернистых и порошковых сильномагнитных материалов по магнитным свойствам. На рис. 1 изображена электромагнитная система барабанного сепаратора для мокрой сепарации. Электромагнитная система создает интенсивное магнитное поле в рабочей зоне сепаратора. Исходный материал содержит магнитную и не магнитную фракции, который транспортируется в рабочую зону сепаратора, и ней происходит разделение магнитной и немагнитной фракции. Магнитная фракция попадает в бункер для магнитной фракции, а немагнитная попадает в хвосты, которые уходят в отвал. Электромагнитная система барабанного сепаратора металлоемкая и состоит из магнитопровода и намагничивающих катушек. Магнитопрвод изготавливают из ферромагнитной стали, катушки наматывают из медного или алюминиевого обмоточного провода. Эти материалы составляют основные затраты производителя при изготовлении барабанного сепаратора.

Цель исследования. Исследовать возможность на стадии проектирования электромагнитной системы барабанного сепаратора получение заданных технических характеристик при минимальном весе магнитопровода и катушек.

Описание электромагнитной системы. Электромагнитные системы с большим объемом рабочего магнитного поля получили назва-



ние открытых электромагнитных систем. При синтезе открытых электромагнитных систем исходными величинами служат: произведение напряженности и градиента напряженности магнитного поля  $f_0$  на заданном расстоянии от поверхности полюсов, минимально допустимая ширина Z и угол α охвата рабочей зоны на одну пару полюсов, габаритный размер электромагнитной системы по диаметру D и длине L, напряжение питающей сети U. На рис. 1 изображен эскиз электромагнитной системы барабанного сепаратора и потокораспределение в локальных областях поля: область блока

электромагнитной системы Z, которая расположена между двумя половинами полюсных наконечников и область крайнего полюса  $Z_1$ , которая расположена между половиной полюсного наконечника и наконечником крайнего полюса. На рис. 1 обозначены: 1 –полюсный наконечник блока; 2 – сектор сердечника; 3 – сердечник катушки; 4 – катушка; 5 – боковина крайнего полюса; 6 – полюсный наконечник крайнего полюса; 7 – ярмо.

Для реальной электромагнитной системы барабанного сепаратора можно составить систему независимых уравнений связи для намагничивающих сил (н. с.) [1], которая имеет вид

$$F = F_U + F_{\theta} + F_{H} + F_{\phi} , \qquad (1)$$

где *F* – н.с. одной катушки.

**Расчет электромагнитной системы.** Расчет удобно вести на один полюс из-за симметрии магнитной системы. Каждая н.с.  $F_U$ ,  $F_{\theta}$ ,  $F_{H}$  и  $F_{\phi}$  определяется на основе анализа отдельных характерных физических процессов, протекающих в электромагнитной системе. Найдем значения н.с.  $F_U$ ,  $F_{\theta}$ ,  $F_{H}$  и  $F_{\phi}$  в расчете на один полюс, выраженные через ряд параметров магнитной системы.

Величина н.с. *F*<sub>U</sub> определяется из анализа баланса напряжений на входе электромагнитной системы

$$F_U = \frac{US_{\pi}}{\pi \rho_0 (1 + \alpha_{\tau} \theta) (D + b_0 + \Delta)},$$
(2)

где U – напряжение сети;  $S_{\Pi}$  – сечение голого провода;  $\rho_0$  – удельное сопротивление материала провода при температуре 20 °C;  $\alpha_{\rm T}$  – температурный коэффициент сопротивления материала провода;  $\theta$  – температура перегрева обмотки, °C; D – диаметр сердечника;  $b_0$  – толщина обмотки;  $\Delta$ – суммарная толщина изоляции и каркаса катушки (рис. 1).

Величина н.с. *F*<sub>0</sub> находится из анализа теплового баланса электромагнитной системы в установившемся тепловом режиме

$$F_{\theta} = \sqrt{\frac{2P_{yA}WS_{\Pi}\left(WS_{\Pi} + b_0^2 k_3\right)}{\rho_0 b_0 k_3 (1 + \alpha_{T} \theta)}},$$
(3)

где W – число витков катушки;  $k_3$  – коэффициент заполнения материалом провода окна намотки;  $P_{ya}$  – удельная мощность рассеяния с поверхности катушки в установившемся тепловом режиме, при температуре перегрева  $\theta$ .

Величина н.с. *F*<sub>H</sub> определяется из анализа распределения произведения напряженности и градиента напряженности магнитного поля в рабочем воздушном пространстве между полюсами

$$F_{\rm H} = \frac{1}{2} \left( \sqrt{\frac{f_0 Z^3}{f_0}}_{*} + \sum_{i=1}^m U_{{\rm M.}ci} \right)$$
(4)

где Z – суммарная ширина полюсов и воздушного зазора (рис. 1);  $U_{\text{м.ci}}$  – падение магнитного напряжения на участке стали магнитной цепи. Здесь  $f_0$  и  $f_0$  находится из уравнений

$$f_0 = H \nabla H$$
;  $f_0 = H_{\bullet} \nabla H_{\bullet}$ ;  $H_{\bullet} = H Z / U_{\rm ME}$ ;  $f_0 = \frac{U^2}{Z^3} H \nabla H_{*}$ ,

где H – напряженность магнитного поля [8];  $\nabla$  – оператор Гамильтона;  $U_{\text{MB}}$  – магнитное напряжение между полюсами.

Намагничивающая сила  $F_{\Phi}$  находится из анализа магнитной цепи рис. 1 и должна быть равна сумме падений магнитного напряжения в воздушном зазоре и стали

$$F_{\Phi} = \frac{1}{2} \left( \frac{\pi D_C^2 B_{\rm cp}}{4G_{\rm b}} + \sum_{i=1}^m U_{\rm M.ci} \right)$$
(5)

где  $B_{\rm CP}$  – среднее значение магнитной индукции в сердечнике;  $G_{\rm b}$  – магнитная проводимость воздушного промежутка блока электромагнитной системы в расчете на один полюс[7].

Полный расчет симметричной половины предполагает расчет области блока и расчет области крайнего полюса

На примере симметричной половины области блока электромагнитной системы (рис. 1) составим схему замещения (рис. 2), которая учитывает магнитное сопротивление стали магнитопровода и потоки рассеяния. На рис. 2 изображена схема замещения симметричной половины блока магнитной системы.



Рис. 2.

Сумма падений магнитного напряжения вдоль направления средней силовой линии магнитного потока (рис.2) определится из выражения

$$\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{m} U_{\text{M.ci}} = \Phi_0(R_J + R_{c1}) + 2\sum_{i=2}^{n} \Phi_i R_{ci} , \quad (6)$$

где  $R_{c1}$ ,  $R_{ci}$ ,  $R_J$  – соответственно магнитные сопротивления сектора, участка сердечника и ярма, обтекаемого потоком  $\Phi_0$ . Для расчета магнитных сопротивлений используется усредненная кривая намаг-

используется усредненная кривая намагничивания, для ст. 3 [2] в диапазоне B = 0,5 - 2T:

$$H = A_1 \cdot B \cdot \left(A_2 + B^{A_3}\right),\tag{7}$$

где H и B – напряженность и индукция в стали, соответственно A/M и Tл; $A_1 = 102, A_2 = 9,95, A_3 = 8$ . С учетом исходных данных и уравнения (7) решение системы уравнений (1) позволяет определить основные параметры магнитопровода и катушки  $D_C, D_J, h_0, b_0, W$ .

При оптимальном проектировании дополнительно вводится ряд экономических показателей (целевых функций)

 $\Im_*(p_i)$  и ограничений  $D_*(p_i)$  [1, 3], где  $p_i(i -$ мерный вектор) – неоднородная совокупность, включающая геометрические параметры системы, обмоточные данные катушек, характеристики используемых материалов и др.

Экономические показатели. Наиболее важными экономическими показателями открытых электромагнитных систем являются объем, масса, стоимость активных материалов и потребляемая мощность в установившемся тепловом режиме.

В безразмерной форме экономические показатели запишутся в следующем виде [6]:

$$V_{*} = V/Z^{3} = (V_{0}+V_{C})/Z^{3};$$
 (8)

$$m = m/\gamma Z^{3} = (\gamma_{0} V_{0}/\gamma_{C} + V_{C})/Z^{3};$$
(9)

$$C_{*}^{T} = CT / (\gamma_{\rm C} \Pi_{\rm C} Z^{3}) = (\gamma_{\rm 0} V_{\rm 0} \Pi_{\rm 0} / (\gamma_{\rm C} \Pi_{\rm C}) + V_{\rm C}) / Z^{3};$$
(10)

$$P_* = P / (R_{\rm T} \theta Z^2), \qquad (11)$$

где V, m, CT, P – соответственно объем, масса, стоимость активных материалов и потребляемая мощность электромагнитной системой в установившемся тепловом режиме;  $\gamma_c$ ,  $\gamma_0$  – плотность стали и материала провода; Ц<sub>c</sub>, Ц<sub>0</sub> – цена единицы массы стали и провода;  $R_{\rm T}$  – коэффициент теплоотдачи;  $\theta$  – температура перегрева катушки в установившемся тепловом режиме;  $V_0$ ,  $V_c$  – объемы материалов провода и стали.

В процессе расчетов могут возникнуть варианты электромагнитной системы, не представляющие практического интереса. Система количественных ограничений  $D_*(p_i)$  должна исключить из рассмотрения эти варианты расчетов.

Для проведения экстремальных исследований составляют исходную систему уравнений

$$\frac{d \mathcal{P}}{dp_i} = 0; \quad \underset{*}{D(p_i)[\rangle, =, \langle ]p_i,}$$

где [>, =, <] – система количественных ограничений в виде равенств и неравенств. Система количественных ограничений имеет вид:

$$B_{\tilde{h}\tilde{\delta}} \leq A_{\tilde{a}}; \ (D_{C} - b) \leq q \leq (Z - D_{C}); \ 3.2 < Z/q < 7;$$

$$h_{C} \leq h_{\tilde{A}\tilde{f}\tilde{I}}; \ 6 < l/q < 10;$$

$$120^{0} \leq \alpha \leq 206^{0}; \ D/2 \leq h_{C} \leq \frac{D}{2} - h_{2};$$

$$(D - 2d)/2 > (2h_{2} + 2d + h_{C}); \ (2Z_{1} + 2Z) \leq L,$$
(12)

где  $B_{\rm I}$  – допустимая индукция в наиболее насыщенной части магнитопровода; q – воздушный зазор между полюсами; Z – межцентровое

расстояние между сердечниками;  $Z_1$  – ширина участка электромагнитной системы между сердечником и крайним полюсом; L – расчетный габаритный размер электромагнитной системы по длине.

Точное аналитическое решение задачи определения глобального экстремума целевой функции по уравнениям (8), (11) не представляется возможным, поэтому для поиска экстремума целесообразно применять



Рис. 3.

численные методы, например, метод деформируемого многогранника [3]. В отличие от [3] этот метод использовался с ограничениями в виде равенств и неравенств, что достигается дополнением программы блоком проверки переменного параметра на соответствие заданному диапазону и блоком присвоения конца или начала диапазона соответствующей переменной, если величина ее выходит за пределы диапазона после операций растяжения, сжатия, отражения и редукции.

Переменные параметры варьируются в диапазонах:  $X_1 = l/q = 6 \div 10,21; X_2 = Z/q = 3,2 \div 7; X_4 = y/Z = 0,25.$ 

Первоначально задавались значения начального симплекса  $X_{1(0)}$  [6;7,4;0;10,21];  $X_{2(0)}$  [3,2; 4,5;5;6];  $X_{4(0)}$  [0,25]. На рис.3 изображена блок-схема вычисления функции цели. Для каждой вершины начального симплекса вычисляется функция цели по блок-схеме рис. 3. Останов ЦВМ по команде "СТОП" при вычислении функции цели означает, что при заданных диапазонах переменных и исходных данных не существует варианта электромагнитной системы, имеющего практический интерес.

Исходные данные для электромагнитного барабанного сепаратора ЭБМ-80/170А:  $L_{\rm max} = 1,7$  м,  $f_0 = 10^3$  кА<sup>2</sup>/м<sup>3</sup> [5],  $B_{\rm cp} = 1,57$  Т, Z = 0,432 м, d = 0,03 м, D = 0,8 м  $D_J = 0,18$  м. Для получения заданной загрузки магнитопровода, диаметр сердечника катушки варьировался в диапазоне  $D_{\rm C} = 0,26 - 0,3$  м.



Результаты расчетов на ЦВМ представлены на рис. 4, а, б в виде семейства изолиний целевых функций а – m = const, 6 - P = const. Ква-

зиоптимальная область на рис. 4,а,б заштрихована.

Анализ результатов расчета показывает, что минимальные значения целевых функций  $P_{\min}$ ,  $m_{\min}$  существенно зависят от величин  $X_1 = l/q$ ,  $X_2 = Z/q$ . Наблюдаются частные экстремумы (минимумы) целевых функций по переменной  $X_2$ . Рост переменной  $X_1$  приводит к монотонному увеличению минимальных значений целевых функций. Экстремум по переменной  $X_2$  обусловлен тем, что при малых значениях  $X_2$  увеличивается воздушный зазор между полюсами, следовательно, увеличивается магнитное сопротивление воздушного зазора. Для поддержания заданного  $f_0 = H g \operatorname{rad} H$  необходимо увеличить м.д.с. катушки,

а это приводит к увеличению массы и мощности катушки. При больших значениях  $X_2$  чрезмерно уменьшается воздушный зазор между полюсами, следовательно, потоки выпучивания чрезмерно уменьшаются и соответственно уменьшается величина  $f_0 = H \operatorname{grad} H$ . Для под-

держания заданного  $f_0 = H \operatorname{grad} H$  необходимо увеличить м.д.с. ка-

тушки, а это приводит к увеличению массы и мощности катушки. Таким образом, по  $X_2$  существует минимум по критериям оптимальности  $P_{*}$  min,  $m_{\min}$  для всех исследованных  $X_1$  при значениях  $X_2$ =5,5-6,0. При

минимизации массы активных материалов полученную зависимость

оптимальных значений  $m(X_2)$ , можно представить аппроксимирующей формулой

$$m = \sqrt[4]{X_1} \left( 1,45X_2 - 0,3925X_2^2 + 0,030348X_2^3 \right).$$
(13)

Из уравнения (13) найдем минимум целевой функции  $m_{\min}$ . Для этого продифференцируем (13) по  $X_2$  и приравняем производную нулю, получим

$$\frac{m}{*}_{\frac{1}{2}} = \sqrt[4]{X_1} \left( 1,45 - 0,785X_2 + 0,091X_2^2 \right) = 0.$$
 (14)

Оптимальная величина  $X_2$  при минимизации целевой функции  $m_{\min}$  для данного электромагнитного сепаратора ЭБМ-80/170А опрезелится решением квадратного уравнения (14)  $X_2$ =5,94.

При минимизации мощности полученную зависимость оптимальных значений  $P(X_2)$ , можно представить аппроксимирующей формулой

$$P = 1 + 0.3593X_1 - 1.93382X_2 + 0.16815X_2^2.$$
(15)

Из уравнения (15) найдем минимум целевой функции  $P_*$  min. Для этого продифференцируем (15) по  $X_2$  и приравняем производную нулю, получим

$$\frac{P}{\frac{*}{dX_2}} = -1,93382X_2 + 0,16815X_2 = 0.$$
 (16)

Оптимальная величина  $X_2$  при минимизации целевой функции  $P_{*}$  min для данного электромагнитного сепаратора ЭБМ-80/170А определится решением уравнения (16)  $X_2$ =5,75.

## Выводы:

1. Анализ результатов расчета показывает, что минимальные значения целевых функций  $P_{*\min}$ ,  $m_{\min}$  существенно зависят от величин  $X_1 = l/q$ ,  $X_2 = Z/q$ . Наблюдаются частные экстремумы (минимумы) целевых функций по переменной  $X_2$ . Рост переменной  $X_1$  приводит к монотонному увеличению минимальных значений целевых функций.

2. Полученные оптимальные значения X<sub>2</sub> при минимизации целе-

вых функций  $P_{*}$  min,  $m_{min}$  не противоречивы и находятся в диапазоне

## 5,5-6,0.

3. Учитывая, что затраты на активные материалы разовые, а затраты на электроэнергию эксплуатационные, то предпочтение следует отдавать функции цели  $P_{\rm min}$ .

Список литературы: 1. Любчик М.А. Расчет и проектирование электромагнитов постоянного и переменного тока. - М.: Госэнергоиздат, 1959. - 224 с. 2. Панасенков М.А. Электромагнитные расчеты устройств с нелинейными распределенными параметрами. – М.: Энергия, 1971. – 216 с. 3. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. Пер. с англ. И.М. Быховской, Б.Т. Вавилова. Под редакцией М.Л. Быховского. - М.: Мир, 1975. - 535 с. 4. Frey K. Anwendungen der Konformen Abbildung auf praktische Probleme des Elektromaschienenbaues, 1925. 5. Деркач В.Г., Колычев П.А. Специальные методы обогащения полезных ископаемых. М.: Металлургиздат, 1956. – 344 с. 6. Буль Б.К., Карташян В.О., Нестеренко А.П. Проектирование оптимальных электромагнитных систем подвесных железоотделителей // Электротехника. -1981. – №4. – С. 54-57. 7. Нестеренко И.А. Нестеренко А.П. Усовершенствование математической модели для расчета магнитной проводимости блока магнитной системы барабанного сепаратора // Вісник СНУ. – Луганск: СНУ. – 2008. – №7. – Ч. 1. 8. Нестеренко И.А., Нестеренко А.П., Середа Е.А. Аналитический расчет напряженности магнитного поля блока магнитной системы барабанного сепаратора // Вісник СНУ. – Луганск: СНУ. – 2008. – №8.



Нестеренко Игорь Александрович, 1963 года рождения, г Луганск.

В 1985 году закончил Луганский машиностроительный институт по специальности "Электрические машины и аппараты". Аспирант кафедры "Электромеханика" Восточноукраинского национального университета

Поступила в редколлегию 1.11.2010

## УДК 621.3.048.1

## А.А. САХНО, аспирант ЗНТУ, Запорожье

# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА 330-750 КВ С БУМАЖНО-МАСЛЯНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ КОНДЕНСАТОРНОГО ТИПА

В статті розглянуто результати розробки математичної моделі прогнозу залишкового ресурсу трансформаторів струму 330-750 кВ з конденсаторною ізоляцією. Модель основується на теоретичному законі розподілу Гомпертцу та моделі пропорційних інтенсивностей Коксу, для використання у складі систем безперервного контролю характеристик головної ізоляції.

В статье описаны результаты разработки математической модели прогноза остаточного ресурса трансформаторов тока 330-750 кВ с бумажно-масляной изоляцией конденсаторного типа. Модель основывается на теоретическом законе распределения Гомпертца и модели пропорциональных интенсивностей Кокса, для применения в системах непрерывного контроля.

Введение. Прогнозирование остаточного ресурса высоковольтного оборудования является частью решения важнейшей задачи повышения технической устойчивости электрических машин и аппаратов и электротехнических комплексов в целом и имеет важное практическое значение. Проблема прогноза и оценки текущего остаточного ресурса (ОР) стала актуальна в связи со старением парка электрооборудования. В Украине, на подстанциях 220 кВ и выше, около 50 % оборудования отработало свой номинальный ресурс, темпы замены оборудования соизмеримы с темпами его старения, однако, основная часть этого оборудования имеет достаточно высокие коэффициенты запаса прочности. Поэтому встает вопрос об оценке реального ресурса аппарата и прогноза его показателей надежности на ближайшие периоды для планирования технического обслуживания и капитальных расходов. Важной задачей является снижение эксплуатационных расходов на оборудование за счет перехода от устаревшей системы технического обслуживания и ремонтов (ТОиР) к системе обслуживания по реальному техническому состоянию. Внедрение непрерывной автоматизированной диагностики и прогноза ОР является важным этапом в создании интеллектуальных электроэнергетических систем и "необслуживаемых" подстанций. В данной статье авторами представлены основные

результаты разработки модели прогноза ОР измерительных трансформаторов тока 330-750 кВ с бумажно-масляной изоляцией конденсаторного типа (БМКИ).

Исследователи, сделавшие немалый вклад в развитие теории моделирования надежности электрооборудования, как правило, используют в своих работах экспоненциальные модели и модели на основе закона распределения Вейбулла для определения эксплуатационной вероятности безотказной работы [1, с. 53, 2, с. 57]. Основным его свойством является то, что вероятность безотказной работы не зависит от событий, произошедших с оборудованием в предыдущем периоде работы, а зависит только от рассматриваемого интервала времени. Такой подход не совсем корректен. Вопросы о недостатках классических моделей, в связи с отсутствием в них учета влияния эксплуатационных факторов на оборудование, поднимаются современными отечественными и зарубежными авторами [3, 4]. Вопросы прогнозирования остаточного ресурса ТТ в эксплуатации не достаточно исследовались учеными, в основном существующие работы посвящены прогнозу ресурса силового трансформаторного оборудования, как наиболее дорогостоящего или прогнозу ОР электротехнического оборудования в целом [5]. Недостатком многих моделей является отсутствие учета влияния режимов эксплуатации и то, что они не позволяют дать количественную оценку остаточному ресурсу ТТ.

Цель и задачи исследования. Усовершенствование существующей системы диагностики на основе разработки методики непрерывной диагностики и прогноза остаточного ресурса основной изоляции высоковольтных ТТ под рабочим напряжением, для современных микропроцессорных систем автоматизированного непрерывного контроля состояния высоковольтных ТТ, с целью выявления текущих неисправностей и прогнозирования их состояния, для повышения технической устойчивости электротехнических систем, обеспечения возможности перехода к системе ТОиР по реальному техническому состоянию оборудования и создания «необслуживаемых» подстанций и интеллектуальных электроэнергетических сетей.

Моделирование остаточного ресурса измерительных трансформаторов тока. Для создания адекватных моделей прогноза ОР ТТ требуются базы данных измерений всех значимых диагностических параметров и отказов по статистически значимой выборке ТТ, причем базы должны вестись автоматически для исключения ошибок и влияния человеческого фактора. На данный момент такие базы данных отсутствуют, поэтому их создание в будущем позволит существенно

уточнить разработанную. В проделанной работе использовалась база данных периодического контроля состояния всех ТТ 330-750 кВ одной их энергосистем (ЭС) Украины. В базе, сотрудниками службы диагностики ЭС, собиралась информация о ТТ установленных начиная с 1963 года при этом данные о диагностике в базу вводились только с 1989 года, причем для некоторых единиц эта дата может быть более поздняя. В базе присутствуют только данные о ТТ которые были в эксплуатации по состоянию на 2001 год, база заканчивается 2008-м годом. Таким образом, отсутствуют сведения:

 о трансформаторах, которые были установлены и отказали до 2001 года;

– диагностическая информация о TT до 1989 года (на некоторых TT год может колебаться);

 о находящихся в эксплуатации трансформаторах тока по состоянию на 2008 г. и полученные после 2008 года.

Согласно математической терминологии такие данные называются ограниченные слева и цензурированные справа. Объем выборки составлял 565 единиц ТТ 330-750 кВ. При этом ТТ были разбиты на 5 групп (табл. 1). Двухкаскадные ТТ (рымовидные 750 кВ) – рассматриваются при расчетах как два трансформатора.

таотінда т	1 Jup and 0	211011111	, ipjill lie	( and a larger a la	emon bi	neepiai i
Код группы	Описание группы	Сред. длит. эксплуатации, лет	Стандарт. отклон. сред. длит. эксплуа- тетим тет	ных наблюде- той тоде-	Кол-во ценз- ванных на- блюлений	Bcero
Tog	$SF_6$	0.5	1.112	8	14	22
Tfrm_n	$P^1 - H^2$	34.0	6.773	10	19	29
Tfrm_g	$P - \Gamma^3$	20.0	7.369	7	312	319
tfum_g	$y^4 - \Gamma$	16.0	7.377	5	97	102
tfum_n	У – Н	35.0	8.624	28	65	93
Всего		21.0	9.848	58	507	565

Таблица 1 – Характеристика групп исследуемой выборки ТТ

Примечания:

1 – рымовидная вторичная обмотка, 2 – негерметичный, 3 – герметичный, 4 – U-образная первичная обмотка, SF<sub>6</sub> – элегазовая основная изоляция.

В 57 наблюдениях, что составляет около 10 % от всей выборки, отсутствовали значения некоторых ковариат, и они были замещены медианой значений, полученных от TT с полными данными. Отказами

считались авария аппарата или его отбраковка и отказ от дальнейшей эксплуатации по причинам неудовлетворительных результатов "оффлайн" диагностики. Группа TT с элегазовой изоляцией (tog) малочисленна и опыт эксплуатации данного типа TT статистически не значителен, это связано с тем, что элегазовые TT только начали использоваться для опытной эксплуатации в начале 2000-х годов в отечественных сетях, поэтому данная группа TT не будет участвовать в дальнейших расчетах по построению модели прогноза. Таким образом модель ограничивается только TT 330-750 кВ с БМКИ. Все расчеты по обработке экспериментальных данных выполнялись в пакете STATISTICA 6.0 с использованием модуля Survival Analysis.

Прогнозировании времени отказа. При прогнозировании времени отказа особую актуальность приобретает выяснение того, являются ли выбранные в гипотезе диагностические критерии связанными с временами эксплуатации трансформаторов тока. При наличии такой зависимости рассчитывается подходящая математическая модель и оценивается значения ее параметров. Такую модель проблематично строить при помощи классической множественной регрессии по нескольким причинам. Во-первых, времена жизни не являются нормально распределенными. Во-вторых, имеется проблема с цензурированными, т.е. незавершенными наблюдениями, т.е. с теми отказ или отбраковка которых не произошла до 2008 года. Проделанные в работе ораковка которых не произошла до 2008 года. Проделанные в расоте расчеты по каждой группе TT подтверждают, что наиболее точно эм-пирическим данным соответствует теоретическое распределение ин-тенсивностей отказов Гомпертца и Вейбулла. Закон Гомпертца-Мейкема позволяет учесть влияние на надежность оборудования как случайных факторов, так и "износовых" явлений [6]. Закон Вейбулла предполагает, что все TT на начальном этапе эксплуатации находятся в идеальном состоянии, однако это не так, вследствие несовершенства производства, основная изоляция ТТ с БМКИ всегда имеет ряд дефектов, которые усиливаются под воздействием времени и эксплуатацитов, которые усиливаются под воздеиствием времени и эксплуатаци-онных воздействий поэтому. При построении модели, отказы, произо-шедшие по причине форс-мажорных обстоятельств (буря, взрыв со-седнего оборудования), а также по вине человеческого фактора не учитывались как отказы. Они носят случайный характер, учесть который в прогнозе не возможно, поэтому из закона Гомперца-Мейкема выпадает слагаемая отвечающая за случайные обстоятельства, и остается чистый закон Гомпертца. В обоих законах распределения Гом-пертца и Вейбулла интенсивность отказов может увеличиваться и уменьшаться с течением времени, а также частным случаем обоих за-

конов является экспоненциальная модель распределения, поэтому они во многом схожи.

В работе предлагается использовать модель пропорциональных интенсивностей Кокса, это наиболее общая регрессионная модель, поскольку она не связана с предположениями относительно распределения времени выживания. Модель предполагает, что процесс износа ресурса происходит независимо от эксплуатационных воздействий. Далее предполагается, что вероятность отказа в любой момент времени рассчитывается из значения, зависящего от времени (процесса старения) и коэффициента (зависящего от параметров воздействия на ТТ). Модель некумулятивная, т.к. рассчитывает мгновенный риск отказа [8]. В случае с ТТ, модель не должна быть кумулятивной, т.к. диагностические критерии введенные в модель являются кумулятивной оценкой текущего состояния изоляции отражая в себе весь период эксплуатации ТТ. Расчет ОР, т.е. прогноз времени отказа, базируется на предположении, что дальнейший износ ресурса будет происходить только из-за старения. После аварийного воздействия, значения критериев изменяются, при этом значения ОР должно пересчитываться, поэтому модель должна применяться только в составе системы непрерывного контроля характеристик основной изоляции ТТ. Так как стандартная ошибка оценки функции вероятности безотказной работы (ВБР) на порядки ниже самой оценки, то именно функция ВБР используется для прогностических целей. Предложенная модель предполагает, что функция ВБР имеет некоторый уровень, являющийся функцией независимых переменных. В ходе проведенной систематизации литературных источников и оценки возможности контроля в процессе эксплуатации, были выбраны следующие критерии, в качестве независимых переменных: тангенс угла диэлектрических потерь основной изоляции (tgб1), изменение емкости основной изоляции ( $\Delta C_1$ ), изменение tg $\delta_1$  ( $\Delta$  tg $\delta_1$ ), скорость изменения tg $\delta_1$  ( $v_1$  tg $\delta_1$ ), коэффициент температурной зависимости tg $\delta_1$  ( $\alpha$ ). Таким образом выдвигается гипотеза о связи  $tg\delta_1$ ,  $\Delta C_1$ ,  $\Delta tg\delta_1$ ,  $\nu tg\delta_1$ ,  $\alpha$  и количества лет в эксплуатации ( $t_e$ ) с ОР ( $R_o$ ) изоляции трансформаторов тока 330-750 кВ. При этом все диагностические критерии являются прогностическими для долгосрочного прогноза вероятности отказа TT. Параметр  $\Delta C_1$  является мгновенным признаком частичного отказа и служит прогнозом предстоящего взрыва TT, его связь с отказом аппарата установлена и в подтверждении не нуждается.

Модель для расчета мгновенной ВБР может быть и записана в следующем виде:

 $S(t, (tg\delta_1, \Delta tg\delta_1, v_tg\delta_1, \alpha)) =$ 

$$= S_0(t)^{\exp(b1 \cdot tg\delta 1 + b2 \cdot \Delta tg\delta 2 + b3 \cdot v_- tg\delta 3 + b4 \cdot \alpha)}$$
(1)

где  $S(t, (tg\delta_1, \Delta tg\delta_1, v tg\delta_1, \alpha))$  – результирующая интенсивность, при заданных для соответствующего наблюдения значениях ковариат,  $S_0(t)$ - базовая функция интенсивности, она равна интенсивности в случае, когда все независимые переменные равны нулю.

Для оценки адекватности модели вычисляется значение критерия как функции логарифма правдоподобия для модели со всеми оцененными параметрами  $(L_1)$  и логарифма правдоподобия модели, в которой все ковариаты обращаются в 0 ( $L_0$ ). Если величина  $\chi^2$  статистически значима (уровень значимости *p*<0,05), отвергается нулевая гипотеза и принимается, что независимые переменные значимо влияют на время жизни. Так как анализ стратифицированный (выборка ТТ разбита на группы по конструктивному признаку), то в ходе анализа проверяется гипотеза о том, что одна и та же регрессия является подходящей для разных групп ТТ, то есть зависимость между выживаемостью и регрессорами одна и та же для разных групп данных [9, с. 546]. Программа Statistica рассчитывает модель по итерационному методу оценивая параметры, которые максимизирует логарифмическую функцию правдоподобия регрессионной модели посредством метода Ньютона-Рафсона [9, с. 556].

Таблица 2 – Результаты оценки модели				
Параметр	Значение			
Кол-во наблюдений	543			
Цензурированных	495 (91.16%)			
Полных	48 (8.84%)			
L <sub>1</sub>	-159,909			
L <sub>0</sub>	-181,368			
$\chi^2$ (Null model - final solution)	42,91737			
Число степеней свободы	4			
Уровень значимости (р)	0,000001			

В работе [3] предлагается оценка уровня достоверности модели Кокса, по формуле:

$$R^2 = 1 - \exp(\frac{2}{N} \cdot (L_0 - L_1)),$$

где N – число периодов времени при расчете модели, N = 44.

Подставив  $R^2 = 0.62$ , модель Кокса применима к исследуемым данным [3].

Из табл. 2 видно, что значение  $\gamma^2$  (Chi-Square) статистически зна-

### ISSN 2079-3944. Bichuk HTY ''XΠI''. 2010. № 55

чимо (уровень значимости 0,000001, что существенно меньше 0,05), поэтому можно сделать вывод, что некоторые диагностические критерии связаны с выживаемостью ТТ.

В табл. 3 приведены результаты расчета модели:

– Веtа – приведены оценки параметров (коэффициенты при соответствующих переменных в регрессионном уравнении),

- SE – стандартные ошибки,

– значения *t*-критерия, (отношение соответствующих элементов первого и второго столбца), значимыми считаются параметры с *t* > 2.0.

-p – уровень значимости (значимы при p < 0.05).

Выдвинутая гипотеза подтверждается.

	Beta	SE	t-value	р
tgδ1	4,09973	1,141208	3,592444	0,000328
v_tgð1	8,26857	3,992332	2,071114	0,038356
α	23,52839	8,749141	2,689223	0,007166
$\Delta$ tg $\delta$ 1	2,21677	1,039463	2,132611	0,032964

Таблица 3 – Результаты расчета модели

Согласно формуле (1) необходимо получить базовую функцию ВБР для каждой группы. Рассчитывается в модуле Survival Analysis пакета STATISTICA 6.0 по методу наименьших квадратов с разными весами, выбираются данные с весами, кривая которых наиболее точно соответствует эмпирическим данным. Полученные данные аппроксимировались для автоматизации модели.

Для определения ОР ТТ при помощи полученной модели рассчитывается вероятность безотказной работы для каждого ТТ в исследуемой выборке. Модель предполагает, что ковариаты одинаково влияют на остаточный ресурс ТТ разных групп и, что каждая группа имеет свою базовую функцию ВБР зависящую от времени. В модели, при определении отклонений от базового ВБР, используется средние значения  $tg\delta_1 = 0,32$  и  $\alpha=0,01$ , так как эти ковариаты не равняются нулю, даже у новых ТТ с БМКИ, при отрицательных отклонениях значения  $tg\delta_1$  принимается равным нулю т.к. такое отклонение от среднего не свидетельствует о лучшем состоянии ТТ чем базового. Для расчета остаточного ресурса выбирается следующее граничное значение функции ВБР по группам: tfrm\_g: 0,73, tfrm\_n: 0,26, tfum\_g: 0,64, tfum\_n: 0,36. Значения, являются средним между нижними границами доверительных интервалов для усеченных и полных наблюдений по каждой группе, т.к. имеющиеся данные – данные по периодическому

контролю, и решение о выводе ТТ принимались с учетом того, что ТТ может отказать до следующего контроля, в то время как на самом деле может отказать до следующего контроля, в то время как на самом деле он будет продолжать безотказную работу со снижением вероятности безотказности. Выбор таких граничных значений допустим только при непрерывном контроле, когда ОР будет корректироваться в реальном масштабе времени. Таким образом, получается, что оборудование мо-жет продолжать свою эксплуатацию, если ВБР его на прогнозируемом жет продолжать свою эксплуатацию, если ВЬР его на прогнозируемом интервале менее указанных значений и оборудование отбраковывает-ся, если вероятность отказов более этих значений. Эти величины могут быть уточнены при получении достаточного опыта в эксплуатации подобных систем или нормативными документами в конкретных энер-госистемах. Далее используя разработанную модель производился расчет ОР для анализируемой выборки из 543 трансформаторов тока. Анализ случаев прогноза высокого ОР показал, что модель не может Анализ случаев прогноза высокого ОР показал, что модель не может адекватно предсказать ресурс ТТ выведенных по причине: течи масла (повреждения фарфоровой покрышки) и низкого сопротивления по-следних слоев изоляции (можно зафиксировать непрерывным измере-нием проводимости изоляции или методом предложенным в [10], по-сле накопления опыта его использования).

Характер-ка состояния	Отказ.,шт.	Усеч., шт.
Отработали ресурс	24	20
ОР на грани отработки	5	17
ОР от 5 до 10 лет	1	49
ОР более 10-ти лет	18	409
Всего	48	495

Таблица 4. Прогноз по группе отказавших ТТ

Система правильно отбраковывала ТТ с повышенным tgδ<sub>1</sub> основной изоляции с повышенным tgδ масла, с повышенным газо- влаго-содержанием масла. По данным прогноза, в энергосистеме работает 7% (37 шт.) ТТ требующих обследования. Выводы. Ухудшение технического состояния основной изоляции ТТ происходит непрерывно, как при работе в номинальных, так и в аварийных и недогруженных режимах. Разработанная модель учитывает, что процесс износа происходит в разных режимах работы с разной интенсивностью. В работе был осуществлен выбор диагностических критериев выдвинута гипотеза о их связи с показателями надежности ТТ. Рассчитаны функции вероятности безотказной работы на основе распределения по закону Гомпертца, который наиболее точно соответствует эмпирическим данным, что было подтверждено в рабо-

ISSN 2079-3944. Bichuk HTY ''XΠI''. 2010. № 55

те. Впервые, разработана модель количественной оценки остаточного ресурса ТТ. Модель предполагает расчет остаточного ресурса при сохранении значений ковариат во всем прогнозируемом периоде, поэтому ее применение возможно только в составе СНК изоляции ТТ.

Список информационных источников. 1. Гук Ю.Б. Теория надежности в электроэнергетике: Учеб. пособие для вузов / Гук Ю.Б. – Л.: Энергоатомиздат. – 1990. -208 с. 2. Фокин Ю.А. Оценка надежности систем энергоснабжения / Фокин Ю.А. Туфанов В.А. // М.: Энергоатомиздат. – 1981. – 224 с. 3. Li Z. Failure event prediction using the Cox proportional hazard model driven by frequent failure signatures / Zhiguo Li, Shiyu Zhou, Suresh Choubey, Crispian Sievenpiper // IIE Transactions. - 2007. -Vol. 39. - Issue 3. - Р. 303 - 315. 4. Андреев Д.А. Совершенствование методов расчета эксплуатационной надежности электрооборудования электростанций и подстанций: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.14.02 "Электростанции и электроэнергетические системы" / Д.А. Андреев. – Иваново, 2006. – 23 с. 5. Hong Y. Prediction of remaining life of power transformers based on left truncated and right censored lifetime data / Y.Hong, W.Q.Meeker J.D. McCalley // Annals of Applied Statistics. - 2009. - Vol. 3. - No. 2. - Р. 857-879. 6. Смородов Е.А. Методы повышения надежности и эффективности технологического и энергетического оборудования в процессе добычи и транспорта нефти и газа: автореф. дис. ... доктора техн. наук: спец. 05.02.13 "Машины, агрегаты и процессы", 05.26.03 "Пожарная и промышленная безопасность" (нефтегазовая отрасль) / Е.А. Смородов. – Уфа, 2004. – 47 с. 7. Bartlev W.H. Analysis of Transformer Failures / William H. Bartley // Int. Association of Engineering Insurers 36th Annual Conference, Stockholm, 2003. – Режим доступа: www.bplglobal.net/eng/ knowledge-center/download.aspx?id=191. 8. Cox D.R. Regression Models and Life-Tables / D.R. Cox // Journal of the Royal Statistical Society. Series В (Methodological). - 1972. - Vol. 34. - No. 2. - Р. 187-220. 9. Боровиков В. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере: Для профессионалов. 2-е изд. / Боровиков В. – СПб.: Питер, 2003. – 688 с. 10. Яцейко А.Я. Діагностика ізоляції високовольтних трансформаторів струму під робочою напругою: автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец.: 05.14.02 – "Електричні станції, мережі і системи" / Яцейко А.Я. – К., 2008. – 18 с.



Сахно Александр Анатольевич, аспирант ЗНТУ. Защитил диплом инженера в ЗНТУ по специальности электрические машины и аппараты в 2004 г. Ведущий специалист отдела АСУТП ООО "Энергоавтоматизация" с 2005 г.

Научные интересы связаны с проблемами диагностики состояния высоковольтных аппаратов под рабочим напряжением в режиме эксплуатации.

Поступила в редколлегию 30.09.2010

# УДК 621.313

**В.І.** ТКАЧУК, д-р техн. наук, проф., Національний університет "Львівська політехніка", Львів

*І.Є. БІЛЯКОВСЬКИЙ*, канд. техн. наук, доц., Національний університет "Львівська політехніка", Львів

# ЕЛЕКТРОПРИВОД КОЛІС ВУЗЬКОКОЛІЙНОГО ТРАМВАЮ НА БАЗІ ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГУНА

Запропоновано електропривод коліс трамваю з вузькою колією на базі вентильного реактивного двигуна з ємнісними накопичувачами енергії, який за енергетичними показниками не поступається тяговим колекторним двигунам, за вищої надійності і меншого об'єму активної частини

Предложен электропривод колес трамвая с узкой колеей на базе вентильного реактивного двигателя с емкостными накопителями энергии, который по энергетическим показателям не уступает тяговым коллекторным двигателям, при высшей надежности и меньшем объеме активной части

Вступ. Одним із проявів світової тенденції розвитку виробництва високотехнологічної електротехнічної продукції є певні успіхи в галузі створення нового покоління регульованих електроприводів із використанням вентильних електродвигунів (ВД). Такі електроприводи випускають нині практично усі провідні електротехнічні компанії. Пропозиція на ринку ВЛ характеризується широким діапазоном потужностей - від одиниць ват до сотень кіловат, для усіх галузей промисловості. При цьому фахівці вважають, що ВД нині є найбільш перспективними з посеред інших типів двигунів, які застосовуються у сучасних регульованих електроприводах малої й середньої потужності, що пояснюється низкою відомих конструктивних і техніко-експлуатаційних переваг порівняно з існуючими типами електричних машин. Найістотніші з них – безконтактність і відсутність вузлів, які вимагають обслуговування, підвищені експлуатаційний ресурс і надійність ВД порівняно з двигунами постійного струму та асинхронними двигунами з фазним ротором. Високі швидкодія та енергетичні показники ВД незначно змінюються за зміни навантаження та під час коливань напруги мережі, у той час як в асинхронних двигунах коефіцієнт віддачі помітно залежить від зміни напруги і навантаження, що особливо приваблює розробників електроприводів широкого кола застосування, зокрема, для транспортних засобів [5].

Стан проблеми. При використанні постійних магнітів для збу-

дження ВД виникають певні проблеми: по-перше, відносно висока вартість якісних магнітів; по-друге, намагніченість обмежує значення максимальної густини магнітного потоку і тому дешевші феритові магніти через низьку намагніченість не дозволяють отримати великий момент; по-третє, з погляду застосування в електроприводі транспортних засобів істотне значення має вигляд механічної характеристики двигуна, яка в цьому випадку є надто "жорсткою". В той же час електромеханічний перетворювач ВД може бути виконаним із пасивним вторинним елементом [1]. При цьому забезпечуються достатньо рівномірна частота обертання у режимі самокомутації, а механічна характеристика має вигляд "тягової", як в серієсних двигунів постійного струму

двигунів постійного струму.

двигунів постійного струму. З іншого боку, останнім часом у світі помітне відродження інте-ресу до трамваю, зумовлене можливістю за допомогою сучасних тех-нічних рішень максимально збільшити пропускну здатність трамвай-них маршрутів. Однак, в окремих містах України, в тому числі й у Львові, ширина трамвайної колії – 1000 мм, і проходить вона вузькими вулицями з поворотами малого радіусу та підйомами і спусками. Зга-дані обставини, поряд із сучасними тенденціями розвитку техніки, сприяли появі проекту трамваю, який окрім вузької колісної бази мав би й низьку посадку. Серед ряду переваг – низький рівень підлоги, який дозволяє з мінімальним часом здійснювати посадку–висадку без-посередньо з тротуару та забезпечує реальну можливість повноцінного користування для інвалідів у візках. Очевидно, постає актуальна зада-ча розроблення відповідного електроприводу для такого трамваю. **Задачі досліджень.** Проект трамваю передбачає зовнішнє розта-шування чотирьох двигунів для приводу коліс у блоці з редуктором і

шування чотирьох двигунів для приводу коліс у блоці з редуктором і гальмівним механізмом, що можливо завдяки вузькій колії. Запропоно-



вані варіанти розташування двигу-нів наведено на рис.1.

нів наведено на рис.1.
 Для приводу коліс трамваю запропоновано вентильний реактивний двигун (ВРД) з ємнісними накопичувачами енергії (СНЕ), що, як відомо [1], складається з електромеханічного перетворювача (ЕМП), давача положення ротора (ДПР) та
 електронного комутатора (ЕК). ЕК можуть бути використані для регулювання частоти обертання, моменту тощо, тому до базової структури доцільно ще застосувати систему керування (СК). Електромеханічний перетворювач та давач положення ротора зазвичай об'єднують в один
конструктивний вузол, а комутатор і систему керування в інший.

Схема електронного комутатора. На відміну від ВРД із відомими електронними перетворювачами, які мають невисокі енергетичні показники та, відповідно, обмежене застосування, для ВРД із ЄНЕ кафедрою електричних машин та апаратів Львівської політехніки запропоновано схеми ЕК, (наприклад, рис. 2), застосування яких дозволяє одночасно використати





Рис. 2.

мічні втрати на перемикання транзистора перетворювача внаслідок перехоплення струму вимикання транзистора колом заряду конденсатора [1].

енергію, запасену в еле-

якоря ЕМП, обмежити

напруги транзисторного ключа комугатора до допустимого рівня та

значно зменшити дина-

полі

зворотної

ктромагнітному

наростання

У ВРД застосована псевдо *U*-подібна конструкція статора (рис. 3) з практично відсутніми електромагнітними зв'язками між секціями, що підвищує стійкість роботи електронних компонентів та енергетичні показники завдяки меншій, порівняно з класичною констру-

кцією, довжині магнітних силових ліній, а отже, і втратам в сталі.

В індукторних машинах електромеханічне перетворення енергії здійснюється за рахунок модуляції параметрів машини. У машинах із ненасиченим магнітним колом енергія, яка запасається у магнітному полі дорівнює енергії, яка перетворюється у механічну, а тому й коефіцієнт віддачі ВД із ЕМП індукторного типу та однопівперіодним комутатором традиційного виконання навіть нехтуючи тепловими втратами у машині не може перевищувати 50%. Тому для покращення енергетичних показників ВД з пасивним

Тому для покращення енергетичних показників ВД з пасивним ротором необхідно використовувати енергію, яка запасена у магнітному полі обмотки якоря, для форсування струму секції. Задача створення ВД на базі простої, технологічної індукторної машини зводиться до створення таких схемних рішень, які б дозволили використовувати накопичену у магнітному полі секції якірної обмотки енергію для виконання корисної роботи. На рис.2. показано одну зі схем транзисторних комутаторів із послідовними ємнісними накопичувачами, а принцип роботи даної схеми наведений в [1].

Розрахунки та експериментальні дослідження показують, що застосування схем з ємнісними накопичувачами енергії у ВД з пасивним ротором покращують його коефіцієнт віддачі у 1.7-1.8 рази порівняно з схемою зі стабілітронним захистом від перенапруг на силових ключах комутатора.

Згідно з проектом, електропривод повинен забезпечити наступні технічні параметри трамваю: прискорення та максимальна швидкість руху на горизонтальній дільниці – 1,4 м/c<sup>2</sup> та 70 км/год відповідно; максимальний кут підйому – 8° [4]. Розміри двигуна не повинні виходити за межі 500 мм за довжиною та 600 мм – за шириною.

Проектування двигуна проведено за використання розробленої на кафедрі електування двигуна проведено за використання розробленої на кафедрі електування (АСП) вентильних реактивних двигунів із накопичувачами енергії [2]. Система складається з головної програми, 16-ти підпрограм та файлів даних, має відкриту структуру та дає змогу здійснювати розширення та модернізацію під час розвитку завдань проектування та дослідження ВРД з СНЕ. Підсистема готує необхідні вхідні дані для проведення досліджень електроприводу на базі ВД із ЄНЕ в підсистемі автоматизованого дослідження вентильних реактивних двигунів [3]. Для забезпечення можливості синтезу двигунів вищих потужностей та напруг в АСП заздалегідь було внесено відповідні зміни.

Скільки методики проектування традиційних типів електричних машин (асинхронних, синхронних, постійного струму) базуються на виборі величин електромагнітних навантажень (індукції у повітряному проміжку і окремих частинах магнітопроводу, лінійного навантаження, густини струму тощо), досвід вибору яких обмежений, вказані величини потребують відповідних уточнень. Тому, використовуючи теорію електромеханічного перетворення енергії у ВРД з ємнісними накопичувачами енергії, а також порівняльний аналіз моменту і електромагнітних навантажень ВРД з буферами енергії з колекторними двигунами постійного струму, в [1] наведено вирази для розрахунку геометричних розмірів магнітопроводу ВРД з пасивним ротором класичної та псевдо-*U*-подібної конструкції. Однак, внаслідок відсутності досвіду проектування вентильних двигунів з пасивним ротором, не можна також скористатись прийнятим в практиці проектування традиційних типів електричних машин методом, коли за даними спроектованих машин аналогічної або близької конструкції та потужності попередньо задаються рекомендованими значеннями електромагнітних навантажень та інших незалежних змінних. Тому, вибір значень незалежних параметрів під час проектування двигунів такого типу здійснюється, опираючись на результати досліджень, проведених на кафедрі "Електричні машини та апарати".



За критерій оптимальності вибраного варіанту двигуна слугувала механічна характеристика та максимальний момент, який зможе розвинути двигун. В результаті проектування отримано двигун, фрагмент поперечного перетину якого наведено на рис. 4, з наступними даними:

Мінімальна напруга живлення – 550 В; корисна потужність – 34 кВт; частота обертання, 1500 об/хв; коефіцієнт віддачі – 75,4%; момент навантаження – 250 Нм; ємність конденсатора – 2,5 мкФ.

Двигун досліджено з використанням розробленої на кафедрі автоматизованої підсистеми дослідження ВРД з ємнісними буферами енергії [4], вхідними даними для якої є розрахований за допомогою програми проектування файл вихідних



даних. Було проведено кілька варіантів симуляції роботи ВРД у пускових та квазіусталених режимах роботи, при навантажувальних моментах – максимальному 250 Нм (рух трамваю з максимальним прискоренням), та 20 Нм (рух з максимальною швидкістю на горизонтальній дільниці).

Отримана механічна характеристика спроектованого дви-

гуна показана на рис.5. За результатами дослідження двигуна уточнено динамічні показники трамваю.

Висновки. Розроблений ВРД з ЄНЕ для приводу коліс вузькоколійного трамваю, який за найважливішими показниками не поступається тяговим колекторним двигунам. Для проектування двигуна використано модернізовану для таких задач та протестовану систему проектування, яка складається з комплексу програмних модулів, кожний з яких виконує певний етап розрахунку: розрахунок геометрії машини, розрахунок обмоткових даних, розрахунок магнітного кола тощо. Інформаційне забезпечення підсистеми складається з бази даних, у яку входять характеристики намагнічення електротехнічних сталей різних марок, а також довідникова інформація, яку підсистема надає користувачу в інтерактивному діалоговому режимі роботи. Двигун має геометричні розміри, які дозволяють монтувати його зовні колісного

візка разом з редуктором і гальмом та забезпечує необхідні динамічні характеристики під час рушання, розгону та руху трамваю при підйомі на заданий кут.

Результати дослідження з використанням відповідної автоматизованої системи показують, що електропривод на базі спроектованого двигуна забезпечує на горизонтальній ділянці необхідну швидкість трамваю 75 км/год. Потужність, яку розвиває двигун на одиницю ваги трамваю (тону), становить близько 7 кВт/т, що приблизно відповідає сучасним трамваям, які випускаються зарубіжними та вітчизняними виробниками. Розраховане прискорення при русі трамваю по рівній ділянці та повному завантаженні пасажирами становить:  $a=1,7 \text{ м/c}^2$ , тоді, як у аналогічних трамваїв прискорення знаходиться у межах 1,1-1,5. Максимальний кут нахилу, під яким трамвай зможе рухатись вгору без прискорення з швидкістю 30 км/год, становить 10,4°, проти 8°, як вказано у більшості технічних вимог до трамваїв.

Список літератури: 1. *Ткачук В.* Електромеханотроніка: – Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2006. – 440 с. 2. *Ткачук В.І., Гайдук В.Г., Каша Л.В.* Автоматизована система проектування вентильних реактивних двигунів // Вісник Національного університету "Львівська політехніка": Тем. вип. "Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика". – 2003. – №471. – С. 50-64. 3. *Ткачук В.І.* Підсистема автоматизованого дослідження вентильних реактивних двигунів // Технічна електродинаміка. 1998. – С. 180 - 187. 4. *Бондаревский Д.И., Черток М. С., Пономарев А. А.* Трамвайные вагоны РВЗ-6М2 и КТМ-5М3. М.: Изд-во "Транспорт", 1975 – 315 с. 5. http://www.electroprivod.org.ua/auther.html.



**Ткачук Василь Іванович,** професор, доктор технічних наук. В 1972 р. закінчив Львівський політехнічний інститут за спеціальністю електропривод і автоматизація промислових установок. В 1987 р. захистив кандидатську дисертацію в Уральському політехнічному інституті за спеціальністю електричні машини. Вчене звання доцента присуджено в 1990 р. В 1999 р. в Державному університеті "Львівська політехніка" захистив докторську дисертацію за спеціальністю електричні машини і апарати. В 2001 р. присвоєно вчене звання професора кафедри електричних машин. Завідувач кафедри "Електричні машини та апарати", віце-директор Інституту енергетики і систем керування Національного університету "Львівська політехніка".

Наукові інтереси пов'язані з проблемами створення сучасних високоефективних електроприводів на базі вентильних двигунів, систем автоматизованого їх проектування та дослідження.



Біляковський Ігор Євгенович, доцент, кандидат технічних наук. В 1980 р. закінчив Львівський політехнічний інститут за спеціальністю електричні машини. В 1996 р. захистив кандидатську дисертацію в Львівському політехнічному інституті за спеціальністю електричні машини. Вчене звання доцента присуджено в 1999 р. З 1997 р. доцент кафедри електричних машин та апаратів Національного університету "Львівська політехніка".

Наукові інтереси пов'язані з проблемами дослідження та проектування спеціальних електричних машин та систем керування спеціальними електричними машинами.

Надійшла до редколегії 12.10.2010

## УДК 621.316

# *А.А. ЧЕПЕЛЮК*, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ", Харьков *В.Л. ЕМЕЛЬЯНОВ*, ст. преп., НТУ "ХПИ", Харьков

## АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ СХЕМ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИЧЕСКОГО ВКЛЮЧЕНИЯ РЕЗЕРВА НАПРЯЖЕНИЕМ 0,4 кВ

Проведено аналіз конструктивних схем пристроїв автоматичного ввімкнення резерву напругою 0,4 кВ. Визначені перспективні шляхи удосконалення систем АВР з використанням вітчизняної елементної бази.

Проведен анализ конструктивных схем устройств автоматического включения резерва напряжением 0,4 кВ. Определены перспективные пути усовершенствования устройств АВР с использованием отечественной элементной базы.

Введение. Устройства автоматического включения резерва (АВР) широко используются в системах гарантированного электроснабжения на промышленных предприятиях, объектах связи и транспорта, медицинских учреждениях для обеспечения надежности электроснабжения потребителей 1-й и 2-й категории и выполняют функцию переключения потребителей между основным и резервным источниками питания, в случае появления неисправности или недопустимом отклонении параметров сети в одном из них [1]. В зависимости от категории предприятия при использовании систем резервного электропитания, имеются два либо три источника питания. В первом случае это два независимых силовых ввода от различных трансформаторных подстанций или от трансформаторной подстанции и автономного источника, например дизельной электростанции (генератора), а во втором к двум силовым вводам от различных трансформаторных подстанций добавляется автономный источник.

В последнее время в Украине наблюдается увеличивающийся спрос на ABP напряжением 0,4 кВ, что объясняется повышенными требованиями современных электроприемников к надежности своего электроснабжения. Стремясь удовлетворить спрос на указанные устройства, целый ряд отечественных производителей электрощитового оборудования освоил выпуск разнообразных устройств ABP электромеханического типа с номинальными токами от 10 до 6300 A [5-8 и др.] различного функционального назначения (устройства ABP на вво-

де, двойной ABP на вводе, секционный и сетевой ABP). Указанные устройства ABP могут быть классифицированы: по режиму приоритетов вводов ABP (устройства ABP с фиксированным, переменным и без приоритета одного из вводов); по количеству срабатываний ABP (устройства ABP однократного и многократного действия); по выдержке времени при срабатывании ABP (устройства ABP без выдержки, с фиксированной выдержкой времени или автоматически меняющейся в зависимости от вида повреждения выдержкой времени срабатывания) и др. [2-5 и др.].

**Цель работы** – технико-экономический анализ конструктивных схем устройств ABP сложившегося в Украине рынка таких устройств и выработка рекомендаций по усовершенствованию устройств ABP с использованием отечественной элементной базы.

Вне зависимости от функционального назначения, конструктивно электромеханическое устройство АВР может быть представлено в виде системы управления и силовых коммутационных аппаратов, обеспечивающих переключение источников питания. Для защиты отводящих линий от коротких замыканий и токовых перегрузок в системах АВР устанавливаются соответствующие аппараты защиты (автоматические выключатели или предохранители).

Схемы и конструктивные реализации систем управления АВР. Схемы управления современных АВР могут быть выполнены на релейной элементной базе или с использованием систем микропроцессорного управления.

Системы управления ABP, выполненные на релейной элементной базе [3-5], в зависимости от назначения ABP могут выполнять контроль питающих напряжений, обеспечивать (при необходимости) требуемые выдержки времени при переключении в случае отклонения питающего напряжения рабочего (в данный момент времени) ввода от нормы, выдавать, в случае аварийных ситуаций в питающих линиях, команды силовым коммутирующим аппаратам на переключение вводов, а также обнаруживать аварийные режимы в линиях электроприемников и выдавать команды на их отключение (без переключения на другой ввод). В состав таких систем, как правило, входят реле контроля трехфазного напряжения, реле времени, промежуточные реле.

другой ввод). В состав таких систем, как правыю, входат реле контроля трехфазного напряжения, реле времени, промежуточные реле. Помимо указанных выше функций, микропроцессорные системы управления позволяют также контролировать частоту и фазу обоих источников и разрешать переключение только в том случае, если фазовый сдвиг не превышает допустимый. Кроме того, микропроцессорные системы управления АВР позволяют измерять в цифровом виде не только величину напряжения и тока в каждой фазе, но и другие необ-

ходимые параметры (реактивную составляющую тока, средние значения напряжения и тока, соз ф, К-фактор, активную и реактивную мощности, количество потребленной электроэнергии в кВт-ч, перекос фаз в %), а также подсчитывать количество переключений и составлять протокол переключений в реальном масштабе времени. Такие системы управления содержат жидкокристаллические или светодиодные информационные панели, на которые при необходимости выводится указанная информация и, как правило, имеют возможность подключения к коммуникационному порту персонального компьютера непосредственно либо через телефонную линию. В совокупности со специальным программным обеспечением это позволяет дистанционно управлять и контролировать состояние устройства АВР. Несколько таких переключателей АВР, расположенных в разных местах, могут объединяться в сеть и управляться оператором с одного компьютера.

Такие системы управления управляют силовыми коммутационными аппаратами и выпускаются в виде отдельных блоков - контроллеров систем ABP в модульном или щитовом исполнениях (серии ATK, RGAM, RGK производства Lovato electric; серии MX150, MX250, ADin, AE Plus, B Plus 3ATS производства General Electric; серии ATS021, ATS022 производства ABB; серия БУАВР производства НПП "ВЭЛ" (Украина) и др.), а, также, встроенными в конструкции переключателей ABP (серии ATyS M, ATyS 3, ATyS 6 производства Socomec; серии OMD200, OMD300, OMD800 производства ABB и др.), что обеспечивает меньшие габариты устройств ABP. Микропроцессорные системы управления ABP, выполненные в виде отдельных блоков – контроллеров систем ABP являются более универсальными, поскольку они не привязаны к конструкциям коммутационных аппаратов конкретных производителей.

Анализируя представленные на украинском рынке микропроцессорные системы управления устройствами ABP, следует отметить, что большинство из них – зарубежного производства. Вместе с тем, некоторые отечественные производители предлагают контроллеры систем ABP собственной разработки и производства, выполненные на импортной элементной базе, которые выгодно отличаются от импортных аналогов контроллеров систем ABP ценой.

Силовые коммутационные аппараты ABP. Производители устройств ABP, предлагают различные типы устройств ABP, где в качестве силовых коммутационных аппаратов используются контакторы, автоматические выключатели и выключатели нагрузки с электромагнитными или с мотор-приводами, выключатели нагрузки с моторприводом, а также специальные двухпозиционные переключатели для

АВР. Каждое из таких технических решений имеет свою область применения, ограниченную техническими характеристиками коммутационных аппаратов (минимальное время переключения, категория применения, диапазон номинальных токов и др.). В устройствах АВР на базе автоматических выключателей для реализации дистанционного (автоматического) управления такими

В устройствах АВР на базе автоматических выключателей для реализации дистанционного (автоматического) управления такими выключателями, они должны быть оснащены приводным включающим механизмом (электромагнитным или мотор-приводом), независимым расцепителем (для отключения), должны содержать вспомогательные контакты, с помощью которых может быть реализована электрическая блокировка выключателей, а также должны иметь механическую блокировку (рычажную или тросовую), исключающую возможность одновременного включения выключателей, что может привести к серьезным авариям в системах электроснабжения. Следует отметить, что в системах АВР, где, в качестве коммута-

Следует отметить, что в системах ABP, где, в качестве коммутационных аппаратов, применяются автоматические выключатели со стационарным набором расцепителей, эти аппараты будут выполнять не совсем свойственную им в ABP функцию – защиту цепей от аварийных режимов (коротких замыканий и токовых перегрузок). Это чревато тем, что при срабатывании одного из таких выключателей по причине короткого замыкания или токовой перегрузки в отводящей линии на эту аварийную линию другим выключателем будет переключен резервный ввод. Поэтому применение таких выключателей является оправданным лишь при наличии в них вспомогательных контактов, сигнализирующих не только о состоянии выключателя (включен или выключен), но и об его аварийном срабатывании, что позволит системе управления заблокировать от включения другой выключатель.

Устранение указанного выше недостатка достигается за счет применения в системах ABP, в качестве коммутационных аппаратов, выключателей нагрузки, созданных на базе вышеупомянутых автоматических выключателей.

ческих выключателеи. Анализ рынка ABP на базе автоматических выключателей в Украине свидетельствует о том, что широкого применения в системах электроснабжения с токами до 630 А такие ABP не находят. Это может объясняться их более высокой стоимостью в указанном диапазоне токов по сравнению с другими силовыми коммутационными аппаратами. ABP на базе автоматических выключателей более широко представлены в диапазоне больших токов (от 630 до 6300 А). Как правило, такие выключатели имеют микропроцессорное управление, что позволяет их легко настраивать на работу в системах ABP, и возможность реализации механической блокировки с одним или двумя аналогичными вы-

ключателями.

Некоторые производители предлагают устройства ABP на номинальные токи от десятков до 3150 A, в которых, в качестве коммутационных аппаратов, применяются переключатели нагрузки с моторприводом известных зарубежных производителей (Socomec, ABB, Gawe Electro SA и др.) с возможностью ручного переключения вводов. ABP с такими переключателями позволяют вести переключение под нагрузкой категории применения не выше AC22, AC23 и время их переключения достигает 2 с, что существенно ограничивает их применение.

Всемирно известная фирма ASCO (США), представленная на рынке Украины, выпускает широчайший ассортимент Automatic Transfer Switch (ATS) с микропроцессорным управлением на токи от 30 до 4000 A, являющиеся аналогом отечественных ABP, где, в качестве коммутационных аппаратов, использует специальные двухпозиционные переключатели перекидного типа с механическим удержанием и внутренней блокировкой, управляемые электромагнитом постоянного тока соленоидного типа, работающего в импульсном режиме (в моменты переключения вводов). Указанные переключатели выпускаются в двух-, трех- и четырех полюсном исполнениях и в них предусмотрена возможность ручного переключения вводов. Минимальное время переключения между сетями в таких устройств 0,2-0,3 с.

Практически все производители устройств ABP на рынке Украины предлагают устройства ABP на базе контакторов (магнитных пускателей), как с релейным, так и с микропроцессорным управлением, выполненные на отечественной и зарубежной элементной базе. Среди электромеханических систем ABP такие системы обладают наибольшим быстродействием (минимальное время переключения между сетями в таких устройств 0,1-0,3 с). Номинальный ток контакторов зарубежного производства достигает 2050 А (прямоходовые контакторы) и 4000 А (контакторы поворотного типа). Номинальный ток устройств ABP на отечественной элементной базе (контакторы серий КТ6, ПМЛ) ограничен 630 А, в виду отсутствия в Украине производства контакторов на большие токи. Категория применения контакторов - AC3.

Существенным недостатком устройств ABP на контакторной элементной базе является то, что катушки электромагнитов контакторов потребляют электроэнергию при включенном ABP, что приводит к дополнительным затратам при эксплуатации указанных устройств. Так, например, при работе в круглосуточном режиме устройства ABP на базе контакторов серии ПМЛ с номинальным током 160 А потребление электроэнергии контактором в год составит более 400 кВА-час (при номинальной мощности катушки электромагнита 46±8 ВА). Частично ука-

занный недостаток устраняется за счет применения контакторов с по-ниженным энергопотреблением, в которых используется форсированное управление электромагнитом (включение обмотки электромагнита пеуправление электромагнитом (включение обмотки электромагнита пе-ременного тока контактора через выпрямитель и подключение после притягивания якоря последовательно с обмоткой добавочного сопро-тивления, включение пусковой и удерживающей обмоток и др.). Энергосберегающие системы ABP на базе контакторов, в которых

отсутствует энергопотребление обмотками электромагнитов во включенном состоянии, могут быть реализованы за счет применения контакторов зарубежного производства с магнитной защелкой (серия AM производства ABB и др.). При включении такого электромагнита по-стоянный магнит намагничивается, после чего включающая обмотка обесточивается, а удержание якоря в притянутом состоянии осуществляется за счет магнитного поля постоянного магнита. Отключение такого электромагнита происходит при включении отключающей обмотки, создающей магнитный поток отключения, направленный встречно потоку постоянного магнита.

потоку постоянного магнита. Поскольку, в настоящее время, в Украине отсутствует серийное производство контакторов с магнитной защелкой, отдельные произво-дители устройств ABP, в частности ассоциация "Спецэнергоподряд" (Киев) [14], дорабатывают серийно выпускающиеся в Украине контак-торы (магнитные пускатели) путем установки в магнитопровод при-водного электромагнита контактора постоянных магнитов [15]. Такая доработка требует также наличия в электромагните двух обмоток (для включения и отключения электромагнита), что существенно повышает стоимость таких контакторов.

Устройствам АВР, реализованным на базе зарубежных электриче-

устроиствам АВР, реализованным на оазе заруоежных электриче-ских аппаратов, как правило, характерна более высокая стоимость, по сравнению с устройствами АВР на отечественной элементной базе. Выводы. На основе проведенного технического анализа конст-руктивных схем устройств АВР напряжением 0,4 кВ и сложившегося в Украине рынка этих устройств можно сделать следующие выводы. 1. В связи с тем, что срок эксплуатации устройств АВР в зависи-

пости от элементной базы, на которой они реализованы, составляет не более 15-30 лет, в Украине, на большинстве существующих объектов с ABP, в настоящее время и последующие годы будет актуальным во-прос модернизации действующих устройств ABP.

В виду отсутствия производства в Украине практически всего ряда силовых коммутационных аппаратов, применяемых в системах ABP (за исключением контакторов на номинальные токи до 630 A), практически весь сегмент рынка электромеханических устройств ABP

в Украине занят коммутационными аппаратами ведущих зарубежных производителей.

3. Учитывая возрастающий спрос на электромеханические устройства АВР на украинском рынке, в Украине целесообразной является разработка новых силовых коммутационных аппаратов и контроллеров для систем АВР, с учетом проанализированных в данной работе передовых достижений ведущих мировых производителей. В первую очередь такие разработки целесообразно проводить для диапазона токов до 630 А, поскольку в Украине в значительной части устройств АВР, требующих в настоящее или ближайшее время модернизации, номинальные токи не превышают указанного значения.

4. Повышение конкурентоспособности систем ABP на базе отечественных контакторов возможно при освоении в Украине серийного производства контакторов с магнитными защелками.

5. В Украине снижения энергопотребления устройств АВР на базе контакторов с управлением переменным током, срок эксплуатации которых еще не подходит к завершению, можно достичь путем доработки схем управления контакторами (включения обмотки электромагнита контактора через выпрямитель и добавочное сопротивление, подключаемое последовательно с обмоткой после включения электромагнита). Для определения целесообразности таких доработок требуется проведение дополнительных исследований.

Список литературы: 1. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ) – Харків: Індустрія, 2007. – 416 с. 2. Беркович М.А., Комаров А.Н., Семенов В.А. Основы автоматики энергосистем. – М.: Энергоиздат, 1981. – 432 с. 3. Козлов В.Д. Устройства АВР // Электропанорама. – 2001. – №2. – С. 6. 4. Федоров С.Д., Облакевич С.В. Основные технические решения при проектировании систем гарантированного электроснабжения // Электропанорама. - 2001. - №2. 5. http://elektrosvit.com.ua/wpcontent/uploads/truc5.pdf. 6. http://sofit.com.ua/services/proizvodstvo\_nizkovoltnyh raspredelitelnyh\_ustrojstv/ustrojstva\_avarijnogo\_vvoda\_rezerva\_avr/. 7. http://www. com.ua/avr\_v5\_21.html. 8. <u>http://darex.dp.ua/ru/low-voltage/ustroystva-</u> robotix. avtomaticheskogo-pereklyuchateli-ASCO.pdf. **10.** <u>http://www.gedigitalenergy.com/</u> PowerQuality/ATS Home.htm. 11. http://www.socomec.com/ presentation-atys-m-3\_en.html. 12. http:// www.ge-industry.ru/i shop/system panels/avr. 13. http:// www.abb.ua/search.aspx?q =omd300&abbcontext=products. 14. Лысенко С.М. Энергосберегающий ABP на магнитных пускателях // Электропанорама. – 2001. – № 9, 15. Бабич Н.С. Патент №27664 от 15.09.00. Бюллетень №4. 2000.

Поступила в редколлегию 29.06.10

## УДК 621.313

*М.В. ЧЕРНЯВСЬКА*, канд. техн. наук, доц., ХНАМГ, Харків *А.І. КУЗНЕЦОВ*, канд. техн. наук, доц., ХНАМГ, Харків *І.Т. КАРПАЛЮК*, канд. техн. наук, доц., ХНАМГ, Харків *М.Л. ГЛЄБОВА*, канд. техн. наук, доц., ХНАМГ, Харків

## РОЗРАХУНОК ДОДАТКОВИХ ВИТРАТ ТА ПУЛЬСАЦІЙ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО МОМЕНТУ ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГУНА ЗМІННОГО СТРУМУ

Показано, що традиційна заміна реальної форми кривої фазного струму на трапецоїдну у вентильного двигуна (ВД) не завжди коректна при дослідженні додаткових втрат і пульсацій електромагнітного моменту ВД. Проведено порівняльний аналіз додаткових втрат.

Показано, что традиционная замена реальной формы кривой фазного тока на трапециидальную для вентильного двигателя (ВД) не всегда корректная при исследовании дополнительных потерь и пульсаций электромагнитного момента ВД. Проведен сравнительный анализ дополнительных потерь.

Вступ. Потреба в електроприводах середньої і великої потужності із широким і плавним діапазоном регулювання частоти обертання на сучасному етапі розвитку не може бути забезпечена повною мірою за рахунок традиційних машин постійного струму (МПС), де щітковоколекторний вузол накладає серйозні обмеження на граничні значення потужності, частоти обертання, напруги. У цьому зв'язку розробка і дослідження вентильного двигуна (ВД) із поліпшеними характеристиками, що мають рівноцінні з МПС технічні характеристики, але більш надійні при менших експлуатаційних витратах, є актуальною задачею.

Освоєна і розроблена математична модель ВД, яка представлена сукупністю декількох самостійних блоків, об'єднаних формальнологічними зв'язками, та реалізована у вигляді програмного комплексу [1, 2, 3], дає можливість при аналізі режимів роботи ВД із природною комутацією тиристорів інвертора враховувати реальну форму кривої струму джерела живлення, активний опір якірної обмотки СМ, насичення магнітопроводу, пульсацій в кривій струму.

Дослідження додаткових втрат і пульсацій електромагнітного моменту у ВД різного виконання і визначає їхній вплив на технікоекономічні показники цих двигунів.

Мета статті – дослідження додаткових втрат (ДВ) і пульсації

електромагнітного моменту ВД змінного струму з 3-х і 6-ти фазною обмоткою якоря (ВДЗ і ВД6).

Вищі гармоніки струму ВД. У ВД наявність вищих гармонік у струмі якірного кола приводить до неоднозначного зростання ДВ. При цьому вони можуть досягти рівня 20-30% від основних втрат, значно знижуючи коефіцієнт корисної дії привода.

Дана систематизація ДВ, найбільш істотних для вентильних двигунів. Зокрема були розглянуті наступні види ДВ:

 в обмотці статора (обумовлені витісненням струму в провідниках якоря; циркуляційними струмами; вищими гармоніками робочого струму; вихровими і контурними струмами від зовнішнього поля):

$$Q_m = \frac{m}{2} r_1 \sum_{\mu=1,5,7} I_{m\mu}^2 K_{a\mu} - \frac{m}{2} r_1 I_{m1}^2 , \qquad (1)$$

де  $K_{a\mu} = \phi(\xi) - \frac{n_c^2 - 1}{3} \Psi(\xi)$  – коефіцієнт збільшення опору обмотки;  $\phi(\xi)$ ,  $\Psi(\xi)$  – визначені функції приведеної висоти провідників, що заповнюють паз статора;  $\mu$  – номер гармоніки струму;

- в демпферній обмотці від v-ої просторової хвилі MPC статора

$$Q_{qmv} = 2ph_g K^2 I_{\mu\nu n}^2 R_{2\nu} , \qquad (2)$$

де  $2ph_g$  – повне число демпферних стержнів на 2p полюсів,  $R_{2v}$  – активний опір стержня; K – коефіцієнт, що ураховує параметри стержнів та пазів і визначається за допомогою відповідних формул і заздалегідь підготовлених графіків;

– в обмотці збудження з урахуванням коефіцієнту витіснення струму  $K_{fv}$ 

$$Q_{f\mu\nu} = \frac{1}{2} I_{f\mu\nu}^2 r_f K_{f\nu}$$
(3)

 поверхневі втрати (виникають внаслідок переміщення вищих гармонік поля і індукованих ними струмів у відносно тонких поверхневих шарах статора (1) і ротора(2))

$$Q_{n2} = \sum_{\nu 2} Q_{n2\nu}; \quad Q_{n1} = \sum_{\nu 1} Q_{n1\nu}$$
 (4)

$$Q_{n2\nu} = K_2 K_{\text{ofp}\,2} \frac{\Delta_2 \sqrt{\pi \gamma_2}}{2\sqrt{\mu_2}} \frac{\tau}{\nu_2} f_{\nu 2}^{1,2} B_{\nu 1}^2 K_{a2} * \left( z_2 b_{z2} l_{t2} K_{Fl2} \right)$$
(5)

$$Q_{n1\nu} = K_1 K_{\text{obp1}} \frac{\Delta_1 \sqrt{\pi \gamma 1}}{2\sqrt{\mu_1}} \frac{\tau}{\nu_1} f_{\nu_1}^{1,2} B_{\nu_2}^2 K_{a1} * (z_1 b_{z1} l_{t1} K_{Fl1})_2$$
(6)

де  $K_{0,0}$  – коефіцієнти, що залежать від якості обробки поверхні статора або ротора;  $\Delta_{1,2}$  – товщина листа осердя;  $K_{1,2}$  – коефіцієнт збільшення втрат з-за наявності пазів;  $Z_{1,2}$ ,  $t_{1,2}$  – число пазів та їхній крок;  $b_{z1,2}$  – ширина зубців;  $l_{t1,2}$  – активна довжина осердь та коефіцієнт їх заповнення сталлю;  $B_{v1,2}$  – амплітуди пульсацій магнітної індукції.

пульсаційні втрати (обумовлені зміною у часі потоку вищих просторових гармонік поля, що проникають в зубцеву зону статора і ротора)

$$Q_{ZI,2\nu} = \sum_{\nu} K_{\text{obp}} \frac{\pi^2 \Delta^2}{6\rho} f_{1,2\nu}^2 B_{1,2\nu}^2 Z_{1,2} h_{Z1,2} l_{Fe} b_{Z1,2} K_l$$
(7)

де  $K_l$  – коефіцієнт, що ураховує нерівномірність поля по товщині Д листа стали магнітопроводу за рахунок вихрових струмів;  $\rho$  – питомий опір.

Аналіз отриманих результатів ДВ з розрахунку і досліду показав, що у ВД великої потужності доцільно застосовувати шестифазну обмотку, що істотно поліпшує форму поля у повітряному проміжку за рахунок виключення з МРС статорної обмотки ряду просторових гармонік, що позитивно позначається на величинах ДВ і електромагнітного моменту. Залежності втрат збудження і поверхневих втрат ротора приведена на рис. 1 при живленні струмом від тиристорного перетворювача (ТП) – сполошна лінія та синусоїдальним струмом – пунктир.

Для ВД найбільше значення мають ДВ в роторі від вищих гармонік MPC статора. Зменшення цих втрат можливе вибором величини укорочення кроку обмотки, що з цього погляду для трифазного ВД доцільно приймати в діапазоні  $\beta = 0,8 \div 0,83$ , а для шестифазного –  $\beta = 0,9 \div 0,92$ .

Одну з ілюстрацій цього подано на рис.2 при різних числах пазів q на полюс и фазу: 1 - m = 3,  $q = \infty$ ; 2 - m = 6,  $q = \infty$ ; 3 - m = 6, q = 2. Для зниження пульсаційних втрат від зубцевих гармонік небажано,



Конструкція і параметри демпферних контурів у шестифазному виконанні ВД повинні визначатися з позиції зменшення й оптимального розподілу додаткових втрат, при цьому за рахунок



ISSN 2079-3944. Вісник НТУ "ХПІ". 2010. № 55



а

зменшення активних опорів демпферної обмотки і клинів може бути досягнутий позитивний ефект.

Одною з вимог, що диктуються за умовами експлуатації, при формуванні ВД, тобто виборі типів двигуна і перетворювача, параметрів системи керування і регулювання, є забезпечення заданих віброакустичних показників і надійності. Актуальність

даного питання пов'язана з тим, що, в порівнянні з іншими типами регульованих електроприводів, принцип роботи ВД зв'язаний з появою, найчастіше значних змінних складових в електромагнітному моменті виконавчого двигуна.

Приведемо вираз для визначення електромагнітного моменту ВД. Так для ВДЗ формула сумарного електромагнітного моменту на часовому інтервалі

$$\begin{pmatrix} 0 \le \omega t \le \frac{\pi}{3} - \gamma_k \end{pmatrix} \text{ має вигляд:} \\ m_{\mathcal{P}M}(t) = m_a(t) + m_b(t) = \frac{2}{\sqrt{3}} * \frac{E_m^{''}I_d}{\omega} \cos\left(\omega t - \delta - \frac{\pi}{6}\right)$$
(8)  
на часовому відрізку $\left(\frac{\pi}{3} - \gamma_k \le \omega t \le \frac{\pi}{3}\right)$  $m_{\mathcal{P}M}(t) = m_a(t) + m_b(t) + m_c(t) =$ 

$$=\frac{2}{\sqrt{3}}*\frac{E_m''I_d}{\omega}\left[\left(\frac{\pi}{3\gamma_k}-\frac{\omega t}{\gamma_k}\right)*\cos\left(\omega t-\delta-\frac{\pi}{6}\right)+\sin(\omega t-\delta)\right]$$
(9)

де  $E_m^{''} = 2\pi f \Phi W K_w$  – ЕРС у обмотці якоря;  $\gamma_k$  – кут комутації.

Висновки. Дискретність системи живлення СМ, несинусоїдність зміни в часі струмів у її обмотках і просторовому розподілі робочого потоку визначають характер зміни електромагнітного моменту. При цьому істотне значення мають параметри окремих елементів системи, структура її компонування і режими роботи електропривода. Як показує досвід досліджень різних типів ВД, не тільки для кількісної, але і якісної оцінки впливу зазначених факторів на характер зміни електромагнітного моменту необхідно враховувати як процеси в окремих елементах системи ВД, так і їхній взаємний вплив.

Список літератури: 1. Волчуков Н.П., Элксинс В.Я., Фаран А.Ш. Особенности протекания процессов в вентильных двигателях различного исполнения // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". – Харків, 2001. – №12. – С. 311-312. 2. Русаков А.М., Соломин А.Н., Окунеева Н.А., Шатова И.В. Математическая модель электромагнитных процессов в вентильном двигателе // Вестник МЭИ. – 2007. – № 3. – С. 33-40. 3. Чернявская М.В., Глебова М.Л., Карпалюк И.Т. Описание математической модели вентильного двигателя с использованием модульного принципа // Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб. – К.: Техніка, 2009. – Вып. 88. – С. 223-232.



Чернявська Маргарита Василівна, доцент, кандидат технічних наук. Захистила диплом інженера електричні машини та апарати, дисертацію кандидата технічних наук в Харківському політехнічному інституті за фахом електричні машини відповідно в 1962, 1974 роках. Доцент кафедри "Інформаційні системи і технологій в міському господарстві" Харківської національної академії міського господарства. Наукові інтереси пов'язані з проблемами електричних машини



Кузнецов Анатолій Іванович, доцент, кандидат технічних наук. Захистив диплом інженера в Харківському інституті інженерів комунального будівництва за фахом світлотехніка та джерела світла, дисертацію кандидата технічних наук в Харківському політехнічному інституті за фахом електричні машини та апарати відповідно в 1972, 1985 роках. Завідувач кафедрою "Інформаційні системи і технологій в міському господарстві" Харківської національної академії міського господарства з 2004 р.

Наукові інтереси пов'язані з проблемами електричних машин



Карпалюк Ігор Тимофійович, доцент, кандидат технічних наук. Захистив диплом інженера і дисертацію кандидата технічних наук в Харківському державному інституті інженерів комунального господарства за фахом світлотехніка та джерела світла відповідно в 1993, 1997 роках. Доцент кафедри "Інформаційні системи і технологій в міському господарстві" Харківської національної академії міського господарства.

Наукові інтереси: енергонезалежність технічних систем, винахідництво



Глєбова Марина Леонідівна, доцент, кандидат технічних наук. Захистила диплом інженера в Харківському державному інституті інженерів комунального господарства за фахом електроспоживання та освітлення міст, дисертацію кандидата технічних наук в Національному технічному університеті Харківський політехнічний інститут за фахом електричні машини та апарати відповідно в 1983, 2001 роках. Доцент кафедри "Теоретичної та загальної електротехніки" Харківської національної академії міського господарства.

Надійшла до редколегії 17.09.2010

## УДК 621.311

*С.Ю. ШЕВЧЕНКО*, канд. техн. наук, проф., НТУ "ХПИ", Харьков *А.И. ГАНУС*, канд. техн. наук, Харьковолэнерго *Н.А. САВЧЕНКО*, аспирант, НТУ "ХПИ", Харьков

## КРАТКОСРОЧНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Приведено аналіз основних завдань короткострокового прогнозування електроспоживання промислових підприємств. Показано можливі підходи до вибору методики короткострокового прогнозування електроспоживання промислових підприємств.

Приведен анализ основных задач краткосрочного прогнозирования электропотребления промышленных предприятий. Показаны возможные подходы к выбору методики краткосрочного прогнозирования электропотребления промышленных предприятий.

**Введение.** Для крупных промышленных предприятий одним из основных путей для снижения затрат на покупку электрической энергии в ситуации реформирования электроэнергетики является выход на оптовый рынок электрической энергии (ОРЭ).

Несмотря на предпринимаемые многочисленные частные попытки прогнозирования электропотребления предприятий на сутки вперед, в целом данная задача еще не решена. В большой степени данная ситуация обусловлена отсутствием учета особенностей промышленных предприятий, а также отсутствием исходных данных. Также краткосрочное прогнозирование затруднено для предприятий с часто изменяющейся нагрузкой.

Цель работы – поиск путей краткосрочного прогнозирования электропотребления предприятий.

Анализ публикаций. В качестве основной задачи краткосрочного прогнозирования предприятия была определена необходимость совпадения заявленного и фактического потребления предприятия с погрешностью не более двух процентов, что позволяет предприятию не нести убытков от штрафов за ошибочный заказ мощности.

На данном этапе развития краткосрочного прогнозирования нагрузки предлагается большое количество методов и моделей. Основными из них являются – методы математической статистики, обработки данных, регрессионного анализа, нейронных сетей, нечеткой логи-

ки, гибридных систем, теории баз данных, технологии построения реляционных баз данных [1].

Наибольшую точность прогноза дают системы, построенные на основе искусственного интеллекта. Точность прогноза, основанного на применении методов искусственного интеллекта, зависит от имеющихся исходных данных, определяющих архитектуру сети, степени достоверности данных и требуемого периода прогнозирования. Перспективным является также применение гибридных сетей[2].

Процесс прогнозирования нагрузки может состоять из следующих этапов: подбор архитектуры нечеткой нейронной сети; выбор обучающих и тестовых данных; тренинг сети; тестирование сети на контрольном множестве данных; использование сети в качестве средства прогнозирования; возможное дообучение [4].

Методы прогнрозирования. Для краткосрочного прогнозирования нагрузки промышленного предприятия необходимыми исходными данными являются данные статистической отчетности по суточному электропотреблению, данные по выпуску продукции на анализируемый, а также прогнозируемый период, данные за субботу, воскресенье, понедельник и остальные дни, либо за рабочие и выходные дни. Для высокой достоверности используемых данных на исследуемом предприятии изначально должна быть внедрена высокоточная и многофункциональная автоматизированная система контроля и управления энергохозяйством (АСУЭ). АСУЭ предприятия позволяет осуществлять все функции диспетчеризации и управления работой объектов энергоснабжения по обеспечению предприятия требуемой энергией, планирование, нормирование и анализ режимов энергоснабжения и энергопотребления основным оборудованием технологических и энергетических производств. АСУЭ осуществляет коммерческий и технический учет и контроль энергопотребления подразделениями предприятия.

Ния подразделениями предприятия. В качестве нейронного эмулятора объекта может быть выбрана гибридная технология адаптивной нейро-нечеткой системы заключений (Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System – ANFIS), обладающая, по сравнению с другими методами, высокой скоростью обучения, простотой алгоритма и оптимальной проработанностью программного обеспечения в системе математического моделирования MatLAB и показывающая более точные результаты прогнозирования во многих областях науки и производства, в том числе и в энергетике.

чения, простотой алгоритма и оптимальной проработанностью программного обеспечения в системе математического моделирования MatLAB и показывающая более точные результаты прогнозирования во многих областях науки и производства, в том числе и в энергетике. Выбор адаптивной нейро-нечеткой системы обусловлен высокими показателями точности прогнозирования. Средняя ошибка прогнозирования этого метода для рабочих дней составила 2,5 %, а для выходных дней – 1,5 %.Наибольшей ошибкой прогнозирования среди сравниваемых методов обладает регрессионный анализ, – 3,5 % для

рабочих дней и 3,0 % для выходных дней. Для нейронной сети средняя ошибка прогнозирования составила 2,9 % – рабочие дни и 2,1 % – выходные дни.

Таким образом, полученные результаты говорят о применимости методов искусственного интеллекта (нечеткие нейронные сети) для прогнозирования электрической нагрузки. Поэтому дальнейшие исследования нечетких нейронных сетей являются необходимыми и могут быть связаны с более точной и тонкой настройкой структуры сети, изменением числа входных переменных.

Этапы прогнозирования. Прогнозирование нагрузки предприятия можно разбить на несколько этапов[3]. *Первый этап* представляет собой прогнозирование нагрузки на сутки вперед по группе точек поставки (ГТП). Требуемая точность такого прогнозирования зависит от возможности регулирования потребления мощности технологическими установками и агрегатами, запитанными через прогнозируемую ГТП. Регулирование должно осуществляться в процессе работы и без нарушения ведения технологического процесса. Необходимо также произвести анализ экономической стороны возможного изменения режимов работы оборудования с целью сравнения убытков от выхода за 2%-ный интервал от заявленной мощности с убытками от изменения ведения технологического процесса, если они приводят к недовыпуску продукции или иным убыткам. *Второй этап* прогнозирования связан с оперативным прогнозированием электропотребления по группе точек поставки, по которой возможно превышение заказанной потребляемой мощности.

**Выводы.** Таким образом, обеспечение качественного почасового прогноза на сутки вперед требует проведения последовательно краткосрочного прогнозирования, оперативного прогнозирования и изменения загрузки агрегатов и установок с использованием планирования на каждый прогнозируемый временной интервал.

Список литературы: 1 Шумилова Г.П., Готман Н.Э., Старцева Т.Б. Прогнозирование нагрузки ЭЭС на базе новых информационных технологий.– Екатеринбург: УрО РАН. – 2002. 2. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / Пер. с польского И.Д. Рудинского. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 344 с. 3. Мозгалин А.В. Методика обеспечения точного почасового прогнозирования электропотребления промышленных предприятий на сутки вперед. – Вестник МЭИ. – 2007. – № 2. 4. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс, 2-е издание.: Пер. с англ. / С. Хайкин. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2006. – 1104 с.

Поступила в редколлегию 28.09.2010

# УДК 621.039.624

**В.Б. ЮФЕРОВ,** д-р техн. наук, нач. отдела ННЦ "ХФТИ", Харьков **А.М. ЕГОРОВ,** д-р физ.-мат. наук, директор ННЦ "ХФТИ", Харьков **С.В. ШАРЫЙ**, м.н.с., ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", Харьков **О.С. ДРУЙ**, руководитель группы, ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", Харьков **В.О. ИЛЬИЧЕВА**, вед. инженер-исследователь, ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", Харьков **М.О. ШВЕЦ,** инженер-исследователь, ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", Харьков **Т.И. ТКАЧЕВА,** мл. науч.сотр., ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", Харьков **А.С. СВИЧКАРЬ,** мл. науч.сотр., ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", Харьков А.С. СВИЧКАРЬ, мл. науч.сотр., ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", ХАТИ", Харьков А.С. СВИЧКАРЬ, мл. науч.сотр., ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", ХАТИ", Харьков А.С. СВИЧКАРЬ, мл. науч.сотр., ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", Харьков А.С. СВИЧКАРЬ, мл. науч.сотр., ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", Харьков А.С. СВИЧКАРЬ, МЛ. НАУЧ.СОТР., ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", ХАТИ", ХАТЬ КОВ

С.Н. ХИЖНЯК, инженер, ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", Харьков

# МАГНИТОПЛАЗМЕННАЯ РЕГЕНЕРАЦИЯ ОЯТ

Проведено огляд та аналіз існуючих методів розділення речовини відповідно до переробки відпрацьованого ядерного палива. Оцінена продуктивність сепараторів. Наведені результати досліджень на установці ДІС-1, що призначена для розділення речовини на масові групи з плазмового стану.

Проведен обзор и анализ существующих методов разделения вещества применительно к переработке отработанного ядерного топлива. Оценена производительность сепараторов. Приведены результаты исследований на установке ДИС-1, предназначенной для разделения вещества на массовые группы из плазменного состояния.

Введение. В Украине около 60% электроэнергии вырабатывается на атомных станциях (АЭС), и за год образуется более 300 тонн отработанного ядерного топлива (ОЯТ), которое отправляют на "вечное хранение". При этом большое количество топлива остается неиспользованным. Крупной научно-технической проблемой является утилизация ОЯТ, которая не решена еще ни в одной стране. Поэтому целесообразно рассмотреть вопросы регенерации ОЯТ, то есть возможности удаления из ОЯТ ~20% продуктов деления урана. Из-за высокой активности ОЯТ и возможного загрязнения больших площадей проводить восстановление ОЯТ в тех же системах, на которых осуществлялось обогащение урана, опасно. Использование физических методов сепарации, в частно-

сти электромагнитного, с высоким коэффициентом обогащения, является предпочтительным с точки зрения защиты окружающей среды от радиоактивных загрязнений. Действительно, для переработки 300 т урана в год электромагнитным методом необходимо устройство или устройства с суммарным постоянным током ~4 кА. Т.е. только на создание пучка будет затрачено 4,3·10<sup>8</sup> кВт·ч (при энергии ионов 30 кэВ). При этом тепловая производительность реактора составляет 7·10<sup>11</sup> кВт·ч и электрическая (КПД=20%) –1,4·10<sup>11</sup> кВт·ч.

Однако, традиционные электромагнитные сепараторы мало производительны и энергоемки.

**Цель работы** – подтверждение принципов, положенных в основу разработанного метода электромагнитной плазменной переработки ОЯТ.

Характеристика электромагнитной плазменной технологии. Основными достоинствами электромагнитной плазменной технологии переработки ОЯТ являются:

– разделение на фракции в безводной форме, в то время как при радиохимической переработке 1 т ОЯТ образует 7,5 т твердых и 2200 т жидких радиоактивных отходов (РАО), т.е. обеспечивается отсутствие вторичных отходов и не увеличивается масса;

– переработка требует только электроэнергии без ввода дополнительных реагентов;

 – достаточно высокая чистота фракций может быть обеспечена в одном цикле;

– обработка ОЯТ происходит внутри замкнутых объемов, что уменьшает возможность неконтролируемых потерь компонентов ОЯТ.

Заметим, что физические принципы, на основе которых предполагается развить плазменную технологию обработки ОЯТ, частично теоретически обоснованы и частично подтверждены экспериментально на нерадиоактивных материалах. Однако для практической реализации метода необходимо проведение большого объема технологических экспериментов.

Схема классического сепаратора. Электромагнитный метод разделения изотопов получил свое начало в 20-х годах прошлого столетия (Астон, Демпстер) и к середине 50-х годов был доведен до совершенства в США и СССР при разработке атомной программы для военных целей. Физические принципы, лежащие в основе метода достаточно просты [1]. Для магнитной сепарации исходное вещество (или смесь) необходимо испарить, далее эффективно ионизовать, стремясь получить однозарядные ионы, ускорить максимально возможную их часть и сформировать ионный пучок. Разделение по массам происхо-

дит при движении предварительно ускоренных в электрическом поле заряженных частиц – ионов пучка – в поперечном магнитном поле. Если электрическое поле *E* перпендикулярно магнитному *H*, и магнитное поле однородно, а все частицы прошли одинаковую разность потенциалов, т.е. приобрели одинаковую энергию, то частицы движутся по круговым траекториям, их движение описывается уравнением:  $mv^2/R=vHe/c$ , где *m* – масса частицы, *v* – скорость движения частицы, *R* – радиус траектории частицы, (Ларморовский радиус), *H* – напряженность магнитного поля, *e* – заряд электрона, *c* – скорость света. *R* =1,44  $10^2(M\mathcal{A}_i)^{1/2} H^1$  см, а.е.м., эВ, Э), для ионов водорода (*M*=1) *R* =1,44  $10^2(T_i)^{1/2} H^1$ . В результате ионы, прошедшие магнитное поле, разделяются по массам. Схема электромагнитного сепаратора (в плане) представлена на рис. 1 (1 – источник; 2 – газоразрядная камера; 3, 4, 5 – электроды; 6, 7 – "приемный карман"; 8 – реперные электроды).



Для однолучевой установки С-2 (РНЦ "Курчатовский институт") с токами пучка 5-15 мА, производительность для M=200 составляет 50 мг/ч. Так как производительность сепаратора зависит от массы элемента, то при экстраполяции для M=240 производительность оказывается 58.5 мг/ч. Энергозатраты сепаратора С-2 таковы: магнитное поле  $W_{\rm магн}=14$  кВт, ускорение ионов  $W_{\rm yck}=0.9$  кВт, ионизация  $W_{\rm u}=1.3$  кВт, вакуумная система  $W_{\rm вак}=7.8$  кВт, охлаждение  $W_{\rm охл}=1$  кВт. Таким образом, суммарные энергозатраты равны 25 кВт, из них на ускорение и создание плазмы – 2,4 кВт.

Оценка производительности классических сепараторов. Производительность классических сепараторов может быть определена на основании известной формулы Ленгмюра:  $j=AV^{3/2} \cdot d^2 \cdot m^{-1/2}$ , которую можно переписать в виде  $j=5,4 \cdot 10^{-8}V^{1.5} \cdot d^2 \cdot M^{0.5}$ , где j – плотность тока (A/cm<sup>2</sup>), V – вытягивающее напряжение (B), d – ускоряющий зазор (см), M – атомный вес (a.е.м.). На рис. 2 приведена зависимость плотности эмиссионного

тока источника от величины атомного веса M и его производительность в величинах г/ч. При напряженности электрического поля около  $10^5$  В/см, d = 0,3...0,4 см,  $j \approx 2,7 \cdot M^{0,5} = 1,75 \cdot 10^{-1}$  А/см<sup>2</sup>, и при площадях отверстия эмиссии ионного источника S = 3...5 см<sup>2</sup> ионный ток находится на уровне 0,45...0,85 А на один ионный луч по ионам урана.

В табл. 1 представлены величины приложенных напряжений V на вытягивающем ионы зазоре d, полученные из формулы Ленгмюра при  $j = \text{const} = 1,75 \cdot 10^{-1} \text{ A/cm}^2$  (при вытягивающих напряжениях от 30 до 0,5 кВ). Величины дебаевских радиусов экранирования, рассчитанные по формуле  $r_d = 6,9 \cdot (T/n)^{0.5}$  (K, см<sup>-3</sup>), для трех значений плотности плазмы ( $10^{10} \text{ см}^{-3}$ ,  $10^{11} \text{ см}^{-3}$ ,  $10^{12} \text{ см}^{-3}$ ) с температурой 35 000 K (3 эВ) соответственно равны 0,013 см, 0,004 см и 0,0012 см.

Таблица 1 – Величины приложенных напряжений V и соответствующие им значения ускоряющего зазора d

<i>V</i> , кВ	30	20	10	5	1.0	0.5
<i>d</i> , см	0,322	0,238	0,141	0,084	0,025	0,015

Как видно, при вытягивающих напряжениях на уровне 0,5 кВ (низкое значение вытягивающего напряжения предпочтительно для уменьшения энергозатрат), величины ускоряющих зазоров соизмеримы с дебаевским радиусом, что, во-первых, делает невозможной работу такого устройства, во-вторых, объемный заряд расфокусирует пучок ионов такой плотности в вакууме.

Следует отметить, что стабильная работа сепараторов при приведенных выше плотностях ионных пучков приводит к необходимости компенсировать положительный объемный заряд этих пучков, транспортируемых в вакууме и магнитном поле на расстояние около 3-5 м. Эта компенсация производится электронами, образующимися при ионизации остаточного газа в области ионных траекторий в анализирующем магнитном поле. При этом медленные ионы уходят на стенки камеры, а электроны осциллируют в области прохождения ионного пучка. Одновременно с этим потери на перезарядку должны быть минимальными, поэтому оптимальными вакуумными условиями оказывается давление в сепарационной камере на уровне 2-10·10<sup>-6</sup> Торр. Как следует из вышесказанного, получение пучков величиной около 4 кА оказывается значительной технической проблемой и потребует около  $10^4$  ионных лучей или общую эмиссионную поверхность в 2,5 м<sup>2</sup>.

Физические принципы, технико-экономические показатели, тенденции развития, технические особенности. Разрешить эти

сложности возможно посредством увеличения площади сбора ионов S, плазменной компенсации объемного заряда пучков ионов, уменьшения величины V и d в формуле Ленгмюра и уменьшения потерь ионов топлива на перезарядку. Прямо в многокомпонентной плазме нужно селективно ускорять требуемые ионы, формировать потоки – пучки – и собирать их, отделяя от остальной ионной компоненты. Для этого необходимо использовать "сепараторы нового поколения", отличающиеся от классического сепаратора по принципу работы.

К сепараторам нового поколения, по нашему мнению, надо отнести работы [2, 3]. Сами авторы работ не употребляли этих понятий: "сепараторы нового поколения", "новые методы ускорения" и т.д. Эксперименты проводились на установке, принципиальная схема которой представлена на рис. 3: пеннинговский разряд в магнитной конфигурации с колоколообразным полем. На рис. 3 цифрами обозначено: 1 – вакуумная камера, 2 – соленоиды магнитной системы, 3,6 – отражательные электроды (катоды), 4 – накаливаемый катод, 5 – анод, 7 – масс-спектрометр и его вакуумная камера. Анод 5 и отражательные



Рис. 3.

электроды 3, 6 составляют ячейку Пеннинга. Диаметры анодного цилиндра и отражательных электродов – 80 мм. Длина анода  $l_a$  и отражательных электродов  $l_0$ равны 125 мм и 60 мм соответственно. Зазор 8 между анодным и отра-

жательным электродом – 40 мм.  $E_r$  в зазоре  $\delta$  может быть оценено как  $E_r \cong 0.3 U_a/\delta$ , где  $U_a$  – потенциал анода, изменявшийся в диапазоне 0..2 кВ. Продольное магнитное поле изменялось от 0 до 3 кЭ.

Для повышения эффективности ионизации рабочего вещества при низком начальном давлении применялся накаливаемый катод 4. Начальное давление газа  $2\div 3\cdot 10^{-6}\div 7\cdot 10^{-4}$  мм. рт. ст. При этом плотность плазмы достигала  $4\cdot 10^9 \div 5\cdot 10^{10}$  см<sup>-3</sup>.

Электрическое поле в системе задается разностью потенциалов между анодом и отражательными электродами. При этом радиальное распределение напряженности электрического поля  $E_r$  в присутствии плазмы существенно отличается от распределения  $E_r$  в вакууме (без плазмы).

В комбинированных полях *E* и *H*, используемых в плазме, скорость вращения компонентов можно определить из уравнения движения:

$$-\frac{V_{\varphi\alpha}}{r}^{2} = \frac{e_{\alpha}}{m_{\alpha}}E + V_{\varphi\alpha}\omega_{E\alpha} - \frac{1}{\omega_{\alpha}u_{\alpha}}\left(\frac{\partial P_{\alpha}}{\partial r}\right),$$
(1)

где  $V_{\phi\alpha}$  – скорость частиц сорта  $\alpha = e, i; P_{\alpha} = n_{\alpha} T_{\alpha}$ .

Таким образом, скорость вращения  $V\phi^{(e)} = -cE/H$  (без учета центробежной силы), и с учетом центробежной силы

$$V_e^{\ i} = \frac{r\omega_{ci}}{2} \left( 1 + \sqrt{4e_i E_r / \omega_i \omega_{ci}^2 r} \right). \tag{2}$$

Стационарное движение ионов возможно и при более высоких значениях электрического поля.

Если характерная частота вращения частиц плазмы  $\omega_{\rm вp} \sim cE/rH$  близка к циклотронной частоте ионов  $\omega_{\rm ci}$ , происходит резонансное возбуждение ионной циклотронной неустойчивости. Величины внешних полей, соответствующих резонансу, связаны соотношением:

$$H_{\rm kp} \approx \left(\frac{2 \cdot E_r \cdot m_i \cdot c^2}{e_i \cdot r}\right)^{1/2}.$$
 (3)

В условиях развитой неустойчивости, при выполнении условия  $2\omega_{\rm sp} \approx \omega_{\rm ci}$ , регистрировались ионы, уходящие из плазмы вдоль магнитного поля с энергией  $W=100\div200$  эВ, для широкого спектра масс ионов, от лития до кремния.

Приведенная формулировка авторов относительно регистрации ионов, уходящих вдоль магнитного поля, не точна. В действительности в колоколообразном поле ионы, ускоренные в области максимального и однородного магнитного поля (в котором они могли получить поперечную компоненту энергии), уходят в область падающего магнитного поля. При этом ионы перекачивают поперечную компоненту энергии  $\varepsilon_{\perp}$  в продольную  $\varepsilon_{\parallel}$ .

Целесообразно упомянуть экспериментальные работы [4, 5] и теоретическую [6], относящиеся не к сепараторам, а к исследованиям, обеспечившим их физические принципы работы, хотя в них тогда и речи об этом не было. В первых двух работах исследовался нагрев ионов водорода во вращающейся в скрещенных электрическом и магнитном полях плазме. Этот нагрев происходил при определенных величинах и соотношениях величин *B* и *E*. При этом спонтанно возникало излучение на частотах, близких к ионно-циклотронным  $\omega_{ci}$ , и Михайловский А.Б. классифицировал этот процесс, как развитие ионноциклотронной ИЦР-неустойчивости и привел величины инкрементов

ее нарастания  $\omega^* = \omega_{\text{p}i} (1 + \omega_{\text{p}e}^2 / \omega_{\text{Be}}^2)^{-1/2}$ .

Резонансный магнитоплазменный сепаратор изотопов. Суть метода заключается в селективном ИЦР-нагреве резонансных ионов в многоизотопной плазме [7-10], получаемой в плазменном источнике и транспортируемой в однородном магнитном поле с последующим разделением горячих и холодных ионов, см. рис. 4 (схематический вид сепарационной установки изотопов лития). Для реализации метода последовательно осуществляются операции: ионизация паров элемента, изотопы которого необходимо разделить (плазменный источник); создание потока спокойной плазмы с замагниченными ионами в достаточно протяженном однородном магнитном поле (область дрейфа); селективное ускорение ионов выделяемого изотопа (область нагрева); разделение и сбор ускоренных ионов. Переход с одних масс на другие может происходить как при изменении частот ВЧ-генератора, так и при изменении величины магнитного поля.



На рис. 5 более детально, чем на рис. 4, представлена традиционная для ИЦР-метода конструкция коллекторной системы. Она применялась в экспериментах по разделению изотопов гадолиния, диспрозия и эрбия. Особенностями работы таких коллекторных систем являются преобладание электронного тока на коллектор продукта, спад поверхностной плотности осадка и концентрации целевого изотопа на коллекторе по мере удаления от экрана вдоль *B*. Как правило, осадок распространяется от начала коллекторной пластины на расстояние, равное шагу циклотронной орбиты.

Для переработки ОЯТ, т.е. отделения ионов с массами от 2 до 230 необходимо изменяющееся магнитное поле от 0.1 до 6 Тл, при работе с одной частотой  $\omega_{ci}$  по всей длине магнитной системы. Таким образом, для реализации метода необходимо создание соленоидов с однородным стационарным магнитным полем с регулируемой величиной от 0.1 до 5 Тл и рабочим объемом около 1-5 м<sup>3</sup>, в зависимости от массы

изотопа и производительности сепаратора.

Плазма из источника, размещенного в области между двух несимметричных магнитных пробок, вытекает преимущественно в сторону меньшей пробки и вдоль магнитного поля, через зону дрейфа, попадает в зону нагрева. Здесь, с помощью высокочастотных электрических полей, селективно ускоряются ионы нужной массы, и затем холодные и горячие ионы пространственно разделяются, с помощью различных систем отбора.

Циклотронный нагрев или ускорение ионов (увеличение их поперечной скорости) происходит в условиях, когда на замагниченные ионы плазмы действует переменная компонента радиального или вихревого электрического поля  $E_r$  или  $E_{\vartheta}$  (E), с частотой f, равной ларморовской частоте ионов,  $f_{ci}$ , в магнитном поле H (Э).

$$f_{ci} = 1,52 \cdot 10^3 Z M^{-1} H(\Gamma_{\rm II}), \qquad (4)$$

где Z – заряд ядра; M – атомный вес; Z – заряд иона, обычно равен 1.

В реальных условиях нагрев ведется в плазме, имеющей распределение величин  $V_{11}$  и  $V_{\perp 0} \neq 0$ , вследствие чего возникает разброс поперечных энергий ионов  $DW_{\perp} = \pm E \times V_{\perp 0} \cdot t$ . Причина дальнейшего разброса энергий ионов связана с тем, что в начальный момент не все ионы находятся в фазе с ускоряющим полем.

При циклотронном резонансе, т.е. при росте поперечной энергии, ларморовский радиус растет линейно со временем пролета ионов в действующем электрическом поле (на длине антенны *L*):

$$r_i = 1,02 \cdot 10^2 M^{0,5} Z^{0,5} T_i^{0,5} H^{-1}(\text{cm}) = E t/H .$$
(5)

Время пребывания частицы в области нагрева  $t = L/V_{ll}$ , где величина продольной скорости  $V_{ll}$  является приблизительно постоянной величиной.

Осевые неоднородности магнитного поля  $\Delta H/H$  могут привести к нагреву частиц с массой  $M_i$ , отличающейся от резонансной в поле H на величину  $DM_i$ . Поэтому требование к однородности продольного магнитного поля в области нагрева, например при  $\Delta M = 2$  и  $M_i = 100$  запишется как:

$$\Delta H/H = \Delta M_{i}/M_{i} \approx 2 \cdot 10^{-2} , \qquad (6)$$

где  $DM_i$  – минимальная разница масс между разделяемыми соседними изотопами.

Соответственно, ширина спектра ВЧ-генератора  $\pm \Delta \omega_{ci}$  должна удовлетворять условию:

$$\Delta \omega_{ci} / \omega_{ci} \le \Delta H / H . \tag{7}$$

Следующим фактором, влияющим на селективный нагрев в плазме, являются столкновения, ион-ионные и ион-нейтральные,  $v_{ct} = n_{ii} + n_{i0}$ , выводящие ионы из резонанса. Предположим, что  $n_{ii} \approx n_{i0}$ . Известно, что при величине кулоновского логарифма, равной 10:

$$\boldsymbol{n}_{ii} = 5 \cdot 10^{-7} \, n_i / T_i^{3/2} \, M^{1/2} \,. \tag{8}$$

В этом случае время между столкновениями, приводящими к изменению направления движения скорости частицы, должно быть больше времени нагрева

$$\upsilon_{CT} / N \omega_{ci} \ll \Delta M_i / M \approx 2 \cdot 10^{-2} .$$
<sup>(9)</sup>

Величина продольной скорости ионов плазмы определяется как:

$$V_{ll} = V_{iz} \le L_c \,\omega_{ci} / (\Delta E_{\text{on}} / E_{\text{max}})^{0.5} = L_c \,\omega_{ci} / 2\pi N \,\,, \tag{10}$$

где  $L_c$  – длина однородного участка магнитного поля сепаратора; N – число оборотов ионов на длине ускорения;  $\Delta E_{\rm on}/E_{\rm max}$  – отношение величины прироста энергии за один оборот к максимальной энергии ускоренных ионов.

Наличие продольного разброса скоростей ионов, эффект Доплера, так же влияет на селективность нагрева:

$$k\Delta V_z/\omega = 2\pi\Delta V_z/\lambda\omega < \Delta M_i/M_i . \tag{11}$$

В настоящее время действуют три исследовательские группы, использующие метод ИЦР для разделения изотопов. В ИАЭ им. И.В. Курчатова длительное время работает установка по разделению изотопов лития, Li<sup>6</sup> и Li<sup>7</sup>, в коммерческих целях, во Франции проводились исследования по выделению изотопа Ni<sup>58</sup>, в Новосибирске (Россия) – установка для разделения изотопов гадолиния.

Характеристика проекта "Архимед" (США). Этот проект разрабатывался специально для обработки ОЯТ [11]. Фильтр "Архимеда" разделяет ионы плазмы на легкие – ЯЗ (ядерная зола) и тяжелые – ЯТ (ядерное топливо) – массовые группы. Плазменный процесс основан на установлении быстрого вращения цилиндрической плазмы в скрещенных  $E^{x}H$  полях. При достижении определенной критической скорости вращения  $\omega_{\rm E} > \omega_{\rm Ci}/2$  ионы не захватываются осевым магнитным полем и уходят радиально на стенку. Так как скорость критического вращения зависит от магнитного поля, то плазменные параметры и параметры установки могут быть определены таким образом, чтобы отделить тяжелые радионуклиды от большинства легких элементов в плазме и удалить отходы.



Рис. 6.

Как заявлено авторами. демонстрационная установка с ВЧ мощностью в 4 МВт способна созлавать плазменный стопб радиусом 0.4 м и длиной 3.9 м в магнитном поле 1.5 кЭ. Ha рис. 6 показана секшия демо-версии в разрезе. ВЧ-антенны ис-

пользуются для создания и нагрева плазмы. Для вращения плазмы установлены два комплекта концентрических электродов на каждом из торцов устройства с возможностью подачи до 700 В на каждый. Производительность коммерческого блока фильтра составляет около 0,7 т/день оксидной смеси. Проведены эксперименты по определению скорости вращения плазмы. Результаты с точностью 2 совпадают с расчетами. К сожалению, дальнейших публикаций по этой установке не последовало, что может свидетельствовать о неудачных экспериментах.

На наш взгляд, к проекту есть замечания. Во-первых, рабочая плотность плазмы 10<sup>13</sup> см<sup>-3</sup> слишком завышена (приблизительно в 10 раз) и выбрана без учета теплофизических возможностей современных материалов. Во-вторых, выбор аргона в качестве имитирующего уран объекта лишь усугубляет теплофизические проблемы (по сравнению с ураном в 6 раз). Более подробно об этом будет речь идти ниже.

Плазменный сепаратор ПС-1 (ИАЭ им. Курчатова, РФ). Плазменные установки, предназначенные для ускорения и разделения ионов по энергии и массе, как правило, используют неоднородные  $(v_d^{(1)})$ и криволинейные  $(v_d^{(2)})$  магнитные поля, где помимо обычных движений частиц со скоростью  $v_{\perp}$  и  $v_{||}$  в магнитном поле ионы имеют еще и так называемое дрейфовое движение ионов [12, 13]:

$$v_d^{(1)} = mc(v_{\perp}^2 + 2v_{\parallel}^2) \mathbf{h}_1 \quad \text{grad} H/(2qH^2);$$
(12)  
$$v_d^{(2)} = (v_{\parallel}^2 + v_{\perp}^2/2) /(\omega_{\text{H}}R),$$
(13)

где  $v_d$  – скорость дрейфа частицы;  $v_{||}$  и  $v_{\wedge}$  – продольная и поперечная компоненты скорости частицы; m – масса частицы; q – заряд частицы; c – скорость света;  $\omega_H$  – угловая скорость вращения частицы; R – радиус кривизны силовых линий; H – напряженность магнитного поля,  $\mathbf{h}_1$  – единичный вектор вдоль направления H.

Из формул видно, что ионы различных масс и энергий имеют различные дрейфовые скорости и поэтому можно ожидать эффекта их разделения. В работе [14] показано, что в магнитных полях с изогнутыми силовыми линиями можно проводить разделение ионов многокомпонентной смеси по массам. Однако без предварительного селективного нагрева ионов разделение в одном цикле не эффективно, и выделяемые фракции будут лишь обогащены ионами различных изотопов. С помощью дополнительного селективного ИЦР-нагрева можно добиться более полного разделения ионов.

В качестве практического применения предложено рассмотрение плазменной переработки вредных отходов, например, радиоактивных, с целью выведения наиболее опасных компонентов. Эти идеи были положены в выбор конструкции сепаратора, предложенного и описанного в [15]. Блок-схема потокового плазменного сепаратора ПС-1 представлена на рис. 7: 1 – отработанное ядерное топливо; 2 – источник плазмы; 3 – катушки магнитного поля; 4 – камера селективного нагрева; 5 – тороидальный сепаратор; 6 – поток плазмы; 7 – коллекторы; 8 – приемник плазмы в диверторном объеме.



Рис. 7.

Ионизованные в плазменном источнике 2 элементы, входящие в состав смеси вредных отходов, двигаются в плазменной струе в камеру селективного нагрева 4, откуда переходят в камеру тороидального сепаратора 5 и приходят на систему коллекторов 7, таким образом, разделяясь по группам масс.

Оценена энергетическая эффективность непрерывной переработки ОЯТ реактора тепловой мощностью

 $P_m$ =3·10<sup>3</sup> МВт, коэффициентом установленной мощности  $\kappa = 0,8$  и средним выгоранием B = 40 ГВт·сут/т. Годовая потребность в ядерном топливе составляет 365· $P_m$ · $\kappa/B \approx 21,9$  т. При этом в реакторе делится 920 кг урана и плутония (200 МэВ на акт деления). Поток ионов урана, эквивалентный 100 А соответствует переработке  $\approx 7,2$  т/год, поэтому для переработки всего топлива реактора потребуется эквивалентный ионный ток I = 300 А. При затратах энергии на один ион  $E_i$ =1 кэВ (ионизация и нагрев), средняя мощность, идущая на образование плазмы,  $P = I \cdot E_i = 0,3$  МВт. При КПД генераторов плазмы около 0,5, полная мощность, потребляемая плазмой, составит 0,6 МВт, что для мощно-

сти реактора в 1 ГВт составляет менее 0.1%, т.е. меньше расходов реактора на собственные нужды.

Предлагаемый метод достаточно реалистичен и не требует выхода за рамки современных экспериментальных возможностей.

Исследования Национального научного центра "Харьковский физико-технический институт" (ННЦ ХФТИ). Как следует из изложенного, пространственное разделение ионов происходит при их движении в криволинейных магнитных полях, при этом ускоренные ионы более эффективно отделяются от медленных. Ускорение ионов происходит в ВЧ-полях, то ли спонтанно возникших в системе, то ли введенных с помощью антенн от внешних генераторов.

Таким образом, по принципу ускорения плазменные сепараторы нового направления могут быть разделены на два класса. Первый – ускорение разделяемых быстрых частиц происходит за счет спонтанно возникающего излучения на ионно-циклотронных частотах. Второй – ионно-циклотронный резонанс (ИЦР-сепараторы) для селективного нагрева ионов и последующего их разделения. При этом излучение вводится в плазму с помощью антенн от внешних ВЧ-генераторов, находящихся вне плазмы.

1. Сепараторы, в которых ускорение разделяемых быстрых частиц происходит за счет спонтанно возникающего излучения на ионноциклотронных частотах. К их числу относятся сепараторы с вращающейся в скрещенных Е и Н полях плазмой, в которой спонтанно возникает излучение на циклотронных частотах, приводящее к нагреву резонансных ионов и последующему пространственному разделению частиц [2, 3]. Процесс разделения может идти при малых электрических и магнитных полях, поскольку в условии резонанса ( $\omega E = \omega ci/2$ )  $\omega E = k \cdot E/r \cdot B$ , т.е. при увеличении или снижении магнитного поля происходит увеличение или снижение электрического поля. Поэтому рабочим диапазоном вполне может быть уровень магнитных полей около 1 кЭ. При этом, желательно, чтобы Rp ≥ 3-5гл, где Rp – радиус плазмы, гл – ларморовский радиус тяжелых ионов. В этом случае ускоряются и выводятся на стенки ионы максимальных масс, для ОЯТ – это группа вблизи 240±. В осевом направлении уходят ионы малых масс, ядерной золы (ЯЗ). Таким образом, это условие формирует облик и размер системы.

2. Сепараторы, использующие ионно-циклотронный резонанс (ИЦР-сепараторы) для селективного нагрева ионов и последующего их разделения. При этом излучение вводится в плазму с помощью антенн от внешних ВЧ-генераторов, находящихся вне плазмы [8-11]. Для этого типа сепараторов работа с тяжелыми массами требует применения

сильных магнитных полей, на уровне 2,5-6 Тл. И при достаточно малых амплитудах ускоряющего ВЧ-напряжения (в этом случае напряженность поля составляет 1-3 В/см) нужны достаточно протяженные участки однородного магнитного поля (1-2 м). Оба эти направления имеют физико-техническую основу в ННЦ ХФТИ.

В настоящее время эксперименты проводятся на демонстрационноимитационной установке ДИС-1 [16], фотография которой и схематический вид представлен на рис. 8 и 9. На рис. 9 цифрами обозначено: 1 – вакуумная камера (диаметр камеры D = 0.38 м, длина камеры L =1.75 м); 2 – плазменный источник (эквивалентный ток 2 А); 3 – магнитная система ( $H_{\text{max}} = 0.35$  Тл); 4 – коаксиальная система электродов для создания радиального электрического поля; 5 – торцовый коллектор; 6 – осевой коллектор; 7 – крионасос для откачки нейтральных частиц.



Ведутся эксперименты с вращающейся в  $E \perp H$  полях плазмой, т.е. элементы, имитирующие ядерное топливо (ЯТ), должны выходить на стенки разрядной камеры вследствие нагрева ионов при нестационарном циклотронном резонансе (ИЦР-неустойчивость), а элементы, имитирующие ядерную золу (ЯЗ), должны проходить вдоль оси разрядной камеры. Сравнительно небольшие изменения в конструкции установки позволят провести эксперименты по ИЦР-нагреву ядерной золы, когда ускоренные ионы ЯЗ будут выходить либо на стенку, либо на коаксиальные электроды внутри плазмы, а ЯТ будет двигаться вдоль оси магнитного поля подобно рис. 4. Таким образом, две технологии могут быть апробированы приблизительно в одинаковых условиях.

На первом этапе имитационные эксперименты проводятся на газах Хе, Кr, Ar, CO<sub>2</sub>. При этом Хе имитирует уран. На рис. 10 приведены состав ТВЭЛа (а), максимумы распределения продуктов деления по элементам после его эксплуатации (максимумы находятся в диапазонах масс 233÷240, 120÷130, 85÷90) (б). Также в качестве имитационных объектов (в): для имитации плазмы UO<sub>2</sub>, Zr и продуктов деления можно использовать смеси газов Xe-Kr-Ar-(воздух) и CO<sub>2</sub>-Kr-Xe.



**Плазменный источник.** Плазменный источник является одним из основных узлов сепаратора. Поэтому его выбор связан с выполнением ряда требований, определяющих выбор его конструкции:

1) создание многокомпонентной плазмы (в сепараторе ОЯТ – из элементов, находящихся в твердом состоянии, в имитационном устройстве – газовая плазма);

2) плотность плазмы в выходном сечении  $-10^{10}-10^{14}$  см<sup>-3</sup>, при давлении нейтрального газа  $10^{-4}-10-5$  Торр;

3) желательно однородное распределение плотности плазмы в выходном сечении;

4) низкие электронные температуры,  $T_{\rm e} \approx 3$  эВ для ОЯТ и 10-15 эВ для имитатора;

5) стационарный режим работы для ОЯТ и квазистационарный для имитатора.

Представлялось, что двухступенчатый источник, с плазменным катодом из газо-металлической плазмы [17], сможет решить проблемы





в широком диапазоне плотностей плазмы, вплоть до 10<sup>13</sup> см<sup>-3</sup>. Однако его испытания при малых энерговкладах и плотностях не позволили получить однородную плазму по всему сечению сепаратора. Его развитием мог бы быть трехступенчатый источник с инжекцией плазмы в систему с магнитной пробкой [17], с плазменным эмиттером в области нулевого магнитного поля, однако для его работы требовались очень высокие раз-

рядные токи, около 1 кА в стационарном режиме. Поэтому был выбран источник другого типа [18], обеспечивающий плотности плазмы на уровне 5-8·10<sup>10</sup> см<sup>-3</sup>, см. рис. 13 (1 – корпус; 2 – катод; 3 – анод; 4 – газораспределительная вставка; 5 – магнитная катушка; 6 – сердечник

с отверстием для напуска газа; 7 – алундовые кольца; 8 – фланец из нержавеющей стали; 9 – система водяного охлаждения). Дополнительно проводились эксперименты с ВЧ-источником. На рис. 14 приведено осевое распределение магнитного поля установки ДИС-1: а) при однонаправленнос включении поля источника и установки; б) при встречном их включении.



Рис. 14.

Сценарий эксперимента. Плазма из плазменного источника движется вдоль силовых линий спадающего магнитного поля и выходит на коллекторы, расположенные в торце вакуумной камеры. При включении радиального электрического поля Е плазма начинает вращаться в скрещенных радиальном электрическом поле Е и продольном магнитном поле *H* с частотой  $\omega_{\rm E}$ . При достижении условия  $\omega_{\rm E} = \omega_{ci}/2$ , где  $\omega_{ci}$  – циклотронная частота иона с массой  $\mu_i$  в магнитном поле, происходит резонансное ускорение ионов. Ускоренные ионы могут выйти на стенки вакуумной камеры в некой кольцевой области. Таким образом, появятся сигналы на продольных коллекторах, расположенных по образующей, вдоль стенки вакуумной камеры. Одновременно токи на коллекторы, располагающиеся в торце вакуумной камеры, должны уменьшиться (в идеальном случае – на величину, пропорциональную концентрации ионов данного сорта в плазме). На стенки вакуумной камеры ускоренные ионы могут выходить в некоторой кольцевой области, которая имеет длину L, вдоль оси магнитного поля от  $r_{ci} \cdot R/r_{ci} < L < 2\pi r_{ci} \cdot R/r_{ci}$ , или R < L < 6R, где R – радиус плазмы,  $r_{ci}$  – ларморовский радиус резонансных ионов. На антеннах и коллекторах, располагаемых в камере, должны появиться сигналы с резонансной частотой, а также сигналы с кратными частотами. Также возможен выход плазмы в осевом направлении.

В дальнейшем предполагается измерять изменение массового состава ионов в области торцового коллектора, проводить десорбционный анализ газов с поверхностей продольного коллектора и измерять потоки ней-

тральных атомов перезарядки на боковые поверхности камеры, и т.д.

Система получения радиального электрического поля  $E_r$  в плазме, токовые и тепловые нагрузки. Пеннинговский разряд [2, 3] не позволяет получить радиальное электрическое поле по всему сечению плазмы, поэтому в проекте [11] были применены электроды типа спирали Архимеда, витки которой задавали это распределение. Такое решение потребовало мощной системы питания, которого не было в нашем распоряжении, поэтому была выбрана система коаксиальных колец (фотография коаксиальных электродов представлена на рис. 15,а, схема питания электродов – на рис. 15,б).



Коаксиальные электроды, задающие  $E_r$  поле в плазме могут быть рассмотрены как одиночные зонды Ленгмюра, отчего на них появляются высокие токи и тепловые нагрузки, особенно в области высоких положительных потенциалов на электродах. На рис. 15,в представлена типичная зондовая характеристика с насыщением в электронной области *III*. В табл. 2 приведены плотности плазмы, ионных (протоны) и электронных токов, тепловые нагрузки на электродах, температура электродов при радиационном теплосъеме.

теплосъеме								
$n_i,  {\rm Cm}^{-3}$	1011	10 <sup>12</sup>	10 <sup>13</sup>	1014				
$j_{+},  { m A/cm}^2$	0,025	0,25	2,5	25				
$j_{-}, A/cm^2$	1,0	10,0	100,0	1000,0				
<i>W</i> , Вт/см <sup>2</sup>	250	2500						
T. °C	2200	>4000						

Таблица 2 – Плотности плазмы, ионных (протоны) и электронных токов, тепловые нагрузки на электродах, температура электродов при радиационном

Плотность токов рассчитывалась по следующей формуле:

$$j_i = 0.4en_i \cdot (2kT_e/m)^{1/2}, j_M = j_H \cdot (m_H / m_M)^{1/2}.$$
 (14)
**Производительность и выбор параметров системы.** Создание ускорительной установки требует учета большого количества параметров, от которых зависит производительность сепаратора. Производительность сепаратора определяется потоком плазмы из источника и дальнейшая его транспортировка определяется условиями его постоянства в различных сечениях сепаратора, до области разделения, где часть потока, селективно ускоренная, либо выходит из области распространения потока, либо поглощается поверхностями, располагаемыми в потоке. Производительность может быть определяета:

$$m = M \Delta \mu V_{ll} n_i \alpha \beta S t , \qquad (15)$$

где M – атомный вес изотопа;  $\Delta \mu$  – его процентное содержание;  $V_{ll}$  – продольная скорость плазмы (для оценок введем  $V_{ll} \approx 10^5$  см/с);  $n_i$  – концентрация ионов плазмы ( $n_i = 10^{11}$  см<sup>-3</sup>); S – сечение плазмы (S = 30 см<sup>2</sup>);  $\alpha$  – КПД ускорения ионов (оптимистическая оценка  $\alpha \approx 0.8$ , реально  $\alpha$  может оказаться значительно меньше);  $\beta$  – КПД сбора ионов ( $\beta \approx 0.6$ +0,7); t – время наработки изотопов.

Представленные выше условия ускорения ионов изотопов являются, по сути, сомножителями в коэффициенте  $\alpha = \delta k \lambda \gamma$  и др. Как будет видно из дальнейшего, имеется ряд причин, по которым не все ионы данного изотопа могут быть вовлечены в режим ускорения, поэтому величина  $\alpha = \delta k \lambda \gamma < 1$ .

В формуле (4), определяющей производительность плазменного сепаратора, существенно изменяемыми параметрами могут быть  $n_i$  и *S*. Параметр  $V_{ll}$  является ограниченным, поскольку нежелательно повышение температуры и связанное с ним образование двузарядных ионов урана  $U^{2+}$ , которые будут уходить вместе с примесями, имеющими атомный вес  $M \approx 119 \pm \Delta M$ . При создании плазмы имеется еще одна особенность, которую необходимо отметить. Поскольку энергия ионизации кислорода больше ионизации  $U^{2+}$ , то практически весь кислород окажется в газовой, а не плазменной фазе, и будет образовывать двуокись урана прямо на стенках, где осаждаются ионы урана. Значения производительности сепаратора по различным массам приведены в табл. 3.

Величина напряженности магнитного поля должна выбираться исходя из того условия, что ларморовские радиусы тяжелых ионов не должны превышать размеры вакуумной камеры. В табл. 4 приведены значения ларморовских радиусов для разных ионов с различной энергией.

На рис. 16 представлена зависимость циклотронной частоты  $\omega_{ci}$  от величины магнитного поля для ионов Ar, Kr, Xe, U. Условие резонанса для компонентов вращающейся плазмы показано на рис. 17.

$C_1 = 20\%, T_i = 53D$						
	~6	~20 (не-	~50	~150	~240	
М, а.е.м.	(литий)	он)	(ванадий)	(самарий)	(уран, плуто-	
					ний)	
<i>т</i> (кг/год)	43,7	80,2	126,2	218,7	273,9	
20%						
<i>т</i> (кг/год)					1560	
100%						

Таблица 3 – Производительность сепаратора по различным массам (эквивалентный ток ионов урана I = 20 ,  $S = 10^4$  см<sup>2</sup>,  $n = 10^{11}$  см<sup>-3</sup>,  $c_1 = 20$ %  $T_2 = 32$  В)

Как видно из рис. 17, величины электрических полей для получения резонансных условий для ионов аргона в магнитных полях величиной 1 кЭ сильно отличаются от тех же величин для ионов U и Xe, поэтому имитировать ОЯТ и продукты распада необходимо с помощью тяжелых элементов

Таблица 4 – Значения ларморовских радиусов однозарядных ионов различных

		Mac	C C		
2701017		בק			
Элемент	1 эB	5 эВ	10 эВ	100 эВ	в, Э
U <sup>238</sup>	1,57	3,52	4,97	15,74	$10^{3}$
$U^{235}$	1,56	3,5	4,95	15,64	$10^{3}$
Xe	1,17	2,6	3,7	11,72	$10^{3}$
Kr	0,93	2,08	2,95	9,34	$10^{3}$
Ar	0,64	1,44	2,02	6,45	$10^{3}$



Рис. 16.



Рис. 17.

ISSN 2079-3944. Вісник НТУ "ХПІ". 2010. № 55



Основным критерием для выбора параметров системы сепаратора является условия не перекрытия областей осаждения ядерного топлива ЯТ с продуктами ядерной золы ЯЗ, см. рис. 18 и 19. На рис. 18 представлены зависимости областей осаждения элементов U, Xe, Kr, Ar от величины магнитных полей и длины системы для линейного характера зависимости магнитного поля от длины системы.

Как видно из рис. 18, при линейном характере убывания магнитного поля полное неперекрытие областей осаждения тяжелых элементов возможно при длине системы не менее 7 м. Длина установки ДИС-1 составляет 1.6 м. Поэтому нами выбрана нелинейная конфигурация магнитного поля, представленная на рис. 19.

**Результаты** эксперимента. Эксперименты проводились со смесью Xe-Kr-CO<sub>2</sub> и индивидуальными газами Ar и CO<sub>2</sub>. На рис. 20,а,б,в представлены распределения токов на 4 электрода торцового коллектора и осевого коллектора на рис. 20,г.

Наличие характерных минимумов на графиках можно интерпретировать используя данные рис. 17. На рис. 20,а,б,в минимумы согласуются с ожидаемым положением ионов данной массы. Некоторое смещение минимумов на кривых может объясняться радиальной неоднородностью магнитного поля на разных радиусах, на которых располагаются коллекторы.

Результаты экспериментов свидетельствуют о возможности разделения элементов во вращающейся плазме при выполнении условия  $\omega_E = \omega_{ci}/2$ . Энергозатраты на разделение оказываются достаточно близкими к намеченным 0,5-1,0 кэВ/ион. Этот результат указывает на необходимость продолжения экспериментов с целью отработки технологии плазменной сепарации, оптимизации параметров для выполнения основной цели – переработки ОЯТ.



Рис. 20.

#### 8.6 Выводы.

Создана экспериментальная электромагнитная плазменная установка, предназначенная для плазменного разделения элементов в имитационном эксперименте по разделению ОЯТ, которая включает: магнитную систему, вакуумную систему, плазменный источник, систему электропитания, систему создания радиального электрического поля в плазме, систему диагностики плазмы.

Результаты экспериментов свидетельствуют о возможности разделения элементов во вращающейся плазме. Ввиду малых магнитных полей и ускоряющих напряжений энергетические затраты оказываются достаточно близкими к намеченным, т.е. около 0,5 кэВ/ион – величин, экономически целесообразных для обработки ОЯТ электромагнитным методом.

Полученный результат указывает на необходимость дальнейшего продолжения экспериментов по отработке технологии разделения элементов, угочнению величин и оптимизации параметров.

Созданная установка может быть прообразом будущего опытнопромышленного плазменного сепаратора для переработки ОЯТ.

Список литературы. 1. Изотопы: свойства, получение, применение. В 2 т. Т.1 / Под ред. В.Ю. Баранова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 600 с. 2. Рожков А.М., Степанов К.Н., Супруненко В.А., Фареник В.И Исследование возбуждения ионно- цик-

лотронных колебаний в плазме, находящейся в скрещенных электрическом и магнитном полях // Физика плазмы и проблемы управляемого термоядерного синтеза. – В. 1. – Киев: Наукова Лумка, 1971. – С. 14-18. 3. Рожков А.М., Степанов К.Н. и др. Резонансная шиклотронная неустойчивость во врашающейся плазме // Физика плазмы и проблемы управляемого термоядерного синтеза. -В. 3. – Киев: Наукова Думка, 1972. – С. 193-202. **4.** Иоффе М.С., Соболев Р.И., Тельковский В.Г., Юшманов Е.Е. Исследование удержания плазмы в ловушке с магнитными пробками // ЖЭТФ, 1960. - Т. 39. - Вып. 6(12). - С. 1602-1611. 5. Байбородов Ю.Т., Готт Ю.В., Иоффе М.С., Юшманов Е.Е. Неустойчивые состояния плазмы в ловушке с комбинированным полем // ЖЭТФ, 1966. - Т. 3. - Вып. 2. - С. 92-96. 6. Михайловский А.Б., Цыпин В.С. Высокочастотная неустойчивость плазмы, находящейся в радиальном электрическом и продольном магнитном полях // Письма в редакцию ЖЭТФ, 1966. – Т. 3. – Вып. 6. – С. 247-250. 7. Аскарьян Г.А., Намиот В.А., Рухадзе А.А. / Письма ЖТФ, 1975. – Т. 1. – C. 820. 8. Dawson J.M. et.al. Isotov Separation in plasma by use of ion cyclotron resonance // Plys. Reb.Lett. - 1976. - V. 37, 23. - Р. 1547-1550. 9. Муромкин Ю.А. . Разделение изотопов в плазме с помощью ионно-циклотронного нагрева // Итоги науки и техники. Физика плазмы. – Москва, 1991. – Т. 12. – С. 83. 10. Карчевский А.И., Лазько А.И., Муромкин Ю.А., Мячиков А.И., Пашковский В.Г., Устинов А.Л., Чепкасов А.В. Исследование разделения изотопов лития в плазме при изотопически селективном ИЦР – нагреве // Физика плазмы. – 1993 – Т. 19. – №3. – С. 411-419. 11. Litvak A., Agnew S., Anderegg F., Cluggish B., Freeman R., Gilleland J., Isler R., Lee W., Miller R., Ohkawa T., Putvinski S., Sevier L., Umstadter K., Winslow D. Archimedes Plasma Mass Filter // 30th EPS Conference on Contr. Fusion and Plasma Phys. - St. Petersburg (Russia). 2003. - Vol. 27 A, O - 1.6 A. 12. Ариимович Л.А., Лукьянов С.Ю. Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях. Учебное пособие. - М.: Наука, 1972. – 224 с. 13. Спитиер Л. Физика полностью ионизованного газа.– М.: Мир. 1965. – 112 с. 14. Тимофеев А.В. О разделении ионов многокомпонентной плазмы в криволинейном магнитном поле // Физика плазмы. – 2000. – Т. 26. – №7. – С. 667-668. 15. Жильцов В.А., Кулыгин В.М., Семашко Н.Н. и др. Применение методов плазменной сепарации элементов к обращению с ядерными материалами // Атомная энергия. - 2006. - Т. 101. - Вып. 4. - С. 302-306. 16. Yegorov A.M., Yuferov V.B., Shariy S.V., Seroshtanov V.A., Druy O.S., Yegorenkov V.V., Ribas E.V., Khizhnyak S.N., Vinnikov D.V. Preliminary study of the demo plasma separator // PAST №1. Ser.: "Plasma Physics". - 2009. - No. 59 - P. 122-124. 17. Сероштанов В.А., Шарый С.В., Юферов В.Б., Друй О.С., Егоренков В.В., Рыбас Е.В. Двухступенчатый плазменный источник со сжатым вакуумно-дуговым разрядом сепаратора // Вестник ХНУ им. Каразина. Физическая серия "Ядра, частицы, поля". - 2008. - №794. - Вып. 1/37. - С. 111-114. 18. Шарый С.В., Сероштанов В.А., Юферов В.Б., Друй О.С., Егоренков В.В., Рыбас Е.В. Стационарный газовый плазменный источник тяжелых ионов с дрейфом электронов // Вестник ХНУ им. Каразина. Физическая серия "Ядра, частицы, поля". – 2008. – №794. – Вып. 1/37. – С. 121-124.

Поступила в редколлегию 2.11.2010

#### ABSTRACTS

#### Vlasenko V.A.

## **RESEARCH OF PHASES MUTUAL INDUCTIONS IN THE SWITCH-RELUCTANCE MOTOR.**

Field models of different induction motors are constructed for definition of their phase mutual inductances. Propositions concerning these phases mutual inductions account are formulated.

*Index terms* – switch-reluctance motor, phases, mutual induction.

#### Galajko L.P.

## IMITATING MODELING OF DYNAMIC CHARACTERISTICS IN THE SWITCH-RELUCTANCE MOTOR USED IN WASHING MACHINES.

In close analysis of various dynamic modes of switch-reluctance motors used in washing machines based on Simulink program of Mathlab software is resulted. Developed imitating models and computation results are set out for the motors of 90 W and 2900 rotations per minute.

*Index terms* – switch-reluctance motor, imitating model, dynamic characteristics, modeling.

#### Getman A.V.

## ANALYSIS OF METHODICAL ERROR AT MEASURING OF SPATIAL HARMONICS IN TECHNICAL OBJECT MAGNETIC FIELDS BY MEASURING SYSTEM OF FOURTEEN GAUGES.

Practical use of magnetic field spatial harmonics above dipoles is set up for estimation of the dipole methodical error at measuring of technical objects magnetic fields. Dependence of the methodical error from displacement of a dipole into the technical object is analyzed at measuring its magnetic moment.

*Index terms* – technical object, magnetic field, spatial harmonic, dipole, measuring, methodical error.

#### Goncharov J.V.

## APPLICATION OF AN ELECTROMAGNETIC SUPERCONDUCTING CURRENT LIMITER.

In close an electromagnetic current limiter of short circuit is offered. The design of the limiter and its principle of operation are considered.

*Index terms* – superconducting current limiter, design, principle of operation.

Gurin A.G., Mostovoj S.P., Pidashov V.V., Jarmak N,S.

## SEISMOPROSPECTING COMPLEX OF RADIATORS FOR MONITORING OFPETROLEUM STOCKS AND INTENSIFICATION OF ITS EXTRACTION FROM OPERATING CHINKS.

In close a seismoacustic complex for increase of working chink efficiency by simultaneous action on its productive layer superficial and chinks radiators of electrodynamic and electrohydraulic types is considered. It is offered to define preliminary stocks of petroleum in the chink collector by seismoacoustic method, scanning its volume by directed radiation.

*Index terms* – electrodynamic radiator, electrohydraulic radiator, seismoprospecting complex, stocks of petroleum.

#### Maleev A. M., Egorov B. A.

### PROBLEM OF MAGNETIC FIELD COMPUTATION IN SRM AND MODERN METHODS OF ITS DECISIONIN.

The problem of magnetic field computation in SRM is especially topical at determination of its electromagnetic moment according to the magnetic field. Methods of the problem decisionin are proposed in the article.

*Index terms* – **SRM**, magnetic field, computation.

#### Kozorezov A. E., Egorov B. A

# GEOMETRICAL COMPUTATION OF COLLECTOR KNOT INTERFACES.

Computation of safe interfaces of a plate, a cuff and a press flange in a collector knot are resulted.

*Index terms* – collector knot, plate, cuff, press flange, computation.

### Konograj S.P.

## FORECASTING OF OIL LAYERS TEMPERATURE IN THE POWER TRANSFORMER EQUIPMENT BY MEANS OF NEURAL NETWORKS.

Possibility and prospects of application of neural networks methods for forecasting of temperature in top oil layers of the power transformer equipment in its operation mode are considered. Comparison of forecasting and measurements dates are resulted.

*Index terms* – **power transformer equipment, oil layers, temperature, forecasting, neural networks methods.** 

### Kuznetsov B.I., Bovduj I.V., Voloshko A.V., Vinichenko E.V. ROBUST CONTROL SYNTHESIS BY ROLLING MILLS MAIN DRIVES WITH RELATED THROUGH THE ROLLED METAL.

The method of robust control synthesis by main drives of flatting mills as a two mass electromechanics system for the short line and as a three mass electromechanics system for the long line are developed taking into account the resilient elements in transmissions boundary path by the executive engines, reducing gears and rental felling and taking into account the friction nonlinear moments between felling by the mutual influencing of rental rollers on each other during rolling through the rolled metal. The example of dynamic characteristics for such system is given.

Index terms - rolling mills, main drives, robust control system.

#### Lupikov V.S., Lelyuk N.A., Mvudjo E.

## FEATURES OF MATHEMATICAL MODELING OF CONTACTS REBOUND IN SWITCHING ELECTRIC DEVICES.

Mathematical modeling of process of moving contact rebound process in a switching electric device are resulted for elastoviscous model of blow. Features of the model are considered and recommendations about increase of accuracy of modeling are given.

*Index terms* – electric device, contacts, rebound, elastoviscous model, modeing.

#### Moroz A.N., Cherenkov A.D.

## DETERMINATION OF OPTIMAL PARAMETERS IN CONTINUOUSLY WORKONG DRYER USED FOR DRYING WOOL BY ELECTROMAGNETIC FIELDS.

Full factorial experiment determining optimal parameters in continuously working dryer of wool by electromagnetic fields of extremely high frequency range are resulted.

*Index terms* – dryer, electromagnetic field, drying chamber, optimal parameters.

Naboka B.G., Besprozvannyh A.V., Moskvitin E.S., Butko M.V., Butko S.M., GolovanA.A.

## CRITERIA ON A TANGENT OF DIELECTRIC LOSS ANGLE AT ESTIMATION OF OPERATION QUALITY REQUIREMENTS IN POWER CABLES WITH PAPER-OIL ISOLATION.

Correlation dependences between a tangent of a corner of dielectric losses that characterized not destroying of cable isolation and fatigue dura-

bility on breaking strength of its paper-oil isolation are presented. it allows putting into practice the tg  $\delta$  parameter as a criteria at estimation of operation quality requirements in power cables isolation.

# *Index terms* – **power cables, paper-oil isolation, dielectric losses, es-timation.**

#### Naniy V.V., Miroshnichenko A.G., Yukhimchuk V.D., Dunev A.A, Maslennikov A.M., Egorov A.V., Potochkiy D.V.

## DESIGNING AND TESTING ASPECTS IN ELECTRIC MOTORS WITH ROLLING ROTOR.

Researches of dynamic characteristics in the motor with rolling rotor (MRR) are resulted for eight and six slotting machine designs. Magnetic field distribution in the motor are got up taking into account non-uniformity of air-gap for different types of motor designs and their comparative analysis is resulted.

*Index terms* – electric motor with a rolling rotor (MRR), dynamic characteristics, air-gap, non-uniformity, six (eight) slotting machine design.

#### Nesterenko I.A.

## DESIGNING OF OPTIMAL ELECTROMAGNETIC SYSTEMS OF DRUM SEPARATORS.

The possibility of the purposeful synthesis of drum separators with open multi-pole electromagnetic systems is investigated on such criteria of optimality as minimum weight of active material and minimum power consumption in steady-state thermal regime. We derive the Equations of optimal relations between objective function and parameters of the electromagnetic system are got up.

*Index terms* – drum separator, electromagnetic systems, designing, optimization.

#### Sakhno A.A.

### MATHEMATICAL MODEL FOR PREDICTION OF THE REMAINING RESOURCE OF CURRENT TRANSFORMERS OF 330-750 kV WITH OIP INSULATION.

This paper describe the results of the Mathematical model of current transformer 330-750 kV with OIP insulation is resulted for prediction of its remaining resource. The model is based on theoretical law of the Gompertz distribution and Cox's proportional hazards one. It is intended for current transformers on-line monitoring systems for improving their diagnostics.

*Index terms* – current transformers, remaining resource, prediction, Cox's model.

#### Tkachuk V.I., Bilyakovskij I.Ye.

# ELECTRIC DRIVE WITH SWITCHED RELUCTANCE MOTOR FOR THE TRAM WITH NARROW TRAM-LINE.

An electric drive of wheels for the tram with narrow tram-line is offered basing on switched-reluctance motor with parallel buffer of energy. Its main characteristics allow the motor successfully to compete with traction collector ones. It has higher reliability and less volume of active part.

*Index terms* – switched-reluctance motor, electric drive, buffer of energy, characteristics.

#### Chepeljuk A.A., Emelianov V.L.

## ANALYSIS OF CONSTRUCTIVE SCHEMES OF ELECTROMECHANICAL DEVICES FOR AUTOMATIC RESERVE INCLUSION OF 0,4 kV.

An analysis of constructive schemes of devices intended for automatic reserve of 0,4 kV is carried out. Perspective ways of improvement of the devices are defined in view of using in them domestic element base.

*Index terms* – automatic reserve inclusion, devices, constructive schemes, improvement, domestic element base.

## Cherniavskaja M.V., Kuznecov A.I., Karpaljuk I.T., Glebova M.L.

## COMPUTATION OF ADDITIONAL LOSSES AND ELECTROMAGNETIC MOMENT PULSATIONS IN SWITCH-RELUCTANCE MOTOR.

It is shown that at research of additional losses and pulsations of electromagnetic moment in the switched reluctance motor the traditional replacement of its real phase current form by trapezoid is not always correct. The comparative analysis of additional losses is carried out.

*Index terms* – **switched reluctance motor, electromagnetic moment, pulsations, additional losses, computation.** 

#### Shevchenko S.Ju., Ganus A.I., Savchenko N.A.

## SHORT-TERM FORECASTING OF A POWER CONSUMPTION IN INDUSTRIAL ENTERPRISES.

An analysis of main problems at short-term forecasting of a power consumption in industrial enterprises is resulted. Possible approaches concerned to choice of a short-term forecasting technique in industrial enter-

prises are shown in view of their power consumption.

*Index terms* – industrial enterprises, power consumption, short-term forecasting, problems.

#### Yuferov V.B., Egorov A.M., Sharuy S.V., Druy O.S., Ilicheva V.O., Shvec M.O., Tkachova T.I., Svichkar A.S., Higniak S.N.

# MAGNETIC-PLASMA REGENERATION OF THE FULFILLED NUCLEAR FUEL.

The review and analysis of existing methods used for separation of substances in the fulfilled nuclear fuel is resulted. Productivity of separators is estimated. Results of researches on installation DIC-1 intended for division of substance on mass groups of the fuel plasma condition are resulted.

*Index terms* – electromagnetic separator, fulfilled nuclear fuel, magnetic-plasma.

### вимоги

## до оформлення статей у Віснику Національного технічного університету "ХПІ", тематичний випуск **"Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика"**

Оформлення основних елементів статті – за зразком нижче. Оригінал статті готується в редакторі *Microsoft Word* (2000-2003) на українській / російській мові. Формат листа – А5. Поля: низ – 25 мм, інші – по 20 мм. Між елементами статті інтервал в один порожній рядок 10 рt. Заповнення останнього листа – не менше 80 %.

Стаття відправляється в редакцію в друкарському варіанті (1 прим.) та в електронному варіанті по E-mail або на диску (без колонтитулів і нумерації сторінок). Друкарський варіант надається на листах білого паперу формату А4 щільністю 80-90 г/м<sup>2</sup>, надрукованих на лазерному принтері з роздільною здатністю не менше 300 dpi, на одній стороні листа.

Починаючи з 2011 р. всі статті проходять незалежне рецензування з підписом рецензента наприкінці статті.

До статті додаються (по 1 прим.):

**1 СУПРОВІДНИЙ ЛИСТ**, де вказується направлення (рубрика), за яким рекомендується публікація статті, й перелік документів наведених нижче.

**2 АКТ ЕКСПЕРТИЗИ** (для громадян України) або офіційний лист з проханням опублікувати статтю (для громадян зарубіжних країн).

**3 АНОТАЦІЯ АНГЛІЙСЬКОЮ МОВОЮ** (приклад приведений нижче).

**4 ДАНІ ПРО АВТОРІВ** на мові статті (прізвище, ім'я, по батькові повністю, організація, посада, поштова адреса, телефон, E-mail).

5 КОПІЯ ДОКУМЕНТА ПРО ОПЛАТУ за публікацію.

Друкарські матеріали статті відправляють за адресою:

Кафедра "Електричні апарати", НТУ "ХПІ", вул. Фрунзе, 21, м. Харків, 61002, Україна.

Електронний варіант відправляють за адресою:

lupikov@kpi.kharkov.ua

Довідки за тел.:

відповідальний редактор Лупіков Валерій Сергійович

(057) 707 68 64, mob. 0674923709

секретар Себякина Наталія Валентинівна, тов. 0667353882.

УДК ... (10 pt)

*Б.І. КУЗНЕЦОВ*, д-р техн. наук, проф., зав. відділом, НТЦ МТО НАН України, Харків

*Т.Б. НІКИТИНА*, канд. техн. наук, докторант, НТУ "ХПІ", Харків *БУАКЛІН МОХАММЕД АЛІ*, аспірант, НТУ "ХПІ", Харків

#### НАЗВА

(10 рt, жирний, вирівнювання по лівому краю з відступом 0,75 см., заголовні букви, без перенесень і скорочень)

Текст анотації (9 pt) українською мовою, до 5 рядків (для громадян України).

Текст анотації російською мовою, до 5 рядків.

Вступ. У журналі публікуються результати досліджень і огляди в області електричних машин і апаратів, сильних електричних і магнітних полів, теоретичної електротехніки, електричного транспорту, світлотехніки, що не публікувалися раніше (10 рt).

#### Мета, завдання дослідження.

Назва розділу і результати розв'язання завдання. Зміст структурується згідно вимогам постанови Президії ВАК України № 7-05/1 від 15.01.2003 р. Стаття складається з розділів, назви яких відображають актуальність і стан проблеми, методи дослідження, результати теоретичних і/або експериментальних досліджень, аналіз результатів, перспективи використання.

#### Висновки.

Список літератури – література, електронні ресурси.

В кінці статті приводиться фото кожного автора з короткою інформацією (9 pt).

*Текст* оформляється шрифтом *Times New Roman* 10 pt з одиночним міжрядковим інтервалом. Абзацні відступи – 0,75 см. Назва розділу оформляється жирними буквами.

Математичні формули створюються у вигляді окремих об'єктів в редакторі формул *Microsoft Equation*. Розміри (рt): звичайний – 10, крупний індекс – 8, дрібний індекс – 6, крупний символ – 16, дрібний символ – 10. Стиль: текст, змінна – курсив; матриця, вектор – напівжирний курсив; інші – нормальний без нахилу. Формули розташовуються по центру і нумеруються в межах статті, номер – праворуч:

$$N = \tau_{u \max} / T_{mu} , \qquad (1)$$

де  $N - ...; \tau_{u \max} - ...; T_{mu} - ....$ 

Однакові символи в тексті і формулах повинни співпадати.

Ілюстрації (рисунки, фото, діаграми) і таблиці (9 рt) оформляються за зразком без назв, всі пояснення – в тексті. Рисунки оформляються в редакторі **Microsoft Word** як окремі об'єкти в тексті. Рисунки та таблиці відокремлюються від тексту інтервалом в один порожній рядок 10 рt.



Рис. 1.

Таблиця 1.

Поле ліворуч	20 мм
Поле праворуч	20 мм
Поле зверху	20 мм
Поле знизу	25 мм

Список літератури оформляється за зразком, згідно стандарту ДСТУ 7.1-2006.

Посилання на математичні формули, ілюстрації, таблиці, джерела інформації даються за зразком: (1), (2)-(4); рис. 3, рис. 4,а; табл. 2; [5], [2-5].

Список літератури: 1. Сосков А.Г., Соскова И.А. Полупроводниковые аппараты: коммутация, управление, защита. – К: Каравелла, 2005 – 344 с. 2. Юферов В.Б., Егоров А.М., Шарый С.В. и др. Магнитоплазменная регенерация ОЯТ // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Зб. наук. праць. Тематичний вип.: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2008. – №40. – С. 66-83. 3. Пат. 31677, Україна, МПК G01R 33/00. Пристрій для компенсації змінного магнітного моменту струмів / О.Г. Король, В.С. Лупіков, О.Г. Середа та ін. – № u200708718. Заявлено 30.06.2007. Опубл. 25.04.2008, Бюл. № 8. – 3 с. 4. Бібліотека і доступність інформації у сучасному світі: електронні ресурси в науці, культурі і освіті / Л.Й. Костенко, А.О. Чекмарьов, А.Г. Бровкін, І.А. Павлуша // Бібліотечний вісник. – 2003. – № 4. – С. 43. – Режим доступу до журналу: http:// www.nbugov.ua / articles / 2003 / 03klinko.htm.

Фото авторів (2,5×3 см, не менше 300 dpi). Для кожного автора: прізвище, ім'я, по батькові; вчений ступінь; дати захисту дипломів і дисертацій, місце захисту; місце роботи, посада; короткий опис напрямів наукової діяльності – за зразком, інші відомості – на розсуд автора.



**Лупіков Валерій Сергійович**, професор, доктор технічних наук. Захистив диплом інженера, дисертації кандидата і доктора технічних наук в Харківському політехнічному інституті за фахом електричні машини і апарати, відповідно в 1973, 1987 і 2004 рр. Завідувач кафедрою "Електричні апарати" Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" з 2005 р. Наукові інтереси пов'язані з проблемами фізичних полів електричних апаратів, електромагнітної сумісності технічних засобів, магнетизму технічних об'єктів, магнітною левітацією.

Надійшла до редколегії 24.03.2009

Анотація (на англійській мові).

## Rassalsky A.N., Luchko A.R., Konograj S.P., Guk A.A. APPLICATION OF THE THERMAL MODEL TO POWER AUTOTRANSFORMER FOR COMPUTATION OF ITS ELEMENTS HEATING WITH ACCOUNT OF OPERATION MODE.

In clause, the thermal model of power autotransformer is considered. That allows estimating its elements temperature in modes of operation. Comparison of computations on the GOST 14209-96 techniques and the offered thermal model are resulted.

*Index terms* – **power autotransformer, thermal model, computations.** 

Направлення (рубрики) тематичного випуску:

- електричні машини;
- електричні апарати;
- теоретичні основи електротехніки;
- сильні електричні та магнітні поля;
- електричні станції;
- комп'ютерне моделювання;
- використання електротехнологій;
- пристрої та методи неруйнівного контролю;
- електричний транспорт;
- інформація, гіпотези, думки.

## СОДЕРЖАНИЕ

Власенко В.А.
Дослідження взаємоіндукції фаз вентильно-індукторного двигуна3
Галайко Л П
Имитационное моделирование динамических характеристик вентильно- индукторного двигателя стиральной машины
Гетьман А.В.
Анализ методической погрешности определения пространственных гар- моник магнитного поля технических объектов четырнадцати датчиковой системой
Гончаров Є.В.
Застосування електромагнітного надпровідного обмежувача струму
<i>Гурин А.Г., Мостовой С.П., Пидашов В.В., Ярмак Н.С.</i> Сейсморазведочный комплекс излучателей для мониторинга запасов нефти и интенсификации ее добычи из действующих скважин
Егоров Б.А., Малеев А.М.
Проблемы расчета магнитного поля ВИРД (вентильных индукторно- реактивных двигателей) и современные методы решения этой проблемы 33
<i>А.Е. Козорезов, Б.А. Егоров,</i> Геометрический расчет сопряжений коллекторного узла
Конограй С П
Прогнозирование температуры верхних слоев масла силового трансфор- маторного оборудования с помощью нейронных сетей
Кузнецов Б.И., Волошко А.В., Бовдуй И.В., Виниченко Е.В., Синтез робастного управления синхронными приводами прокатных ста- нов с учетом их взаимосвязи через прокатываемый металл
Лупиков В.С., Лелюк Н.А., Мвуджо Е.
Особенности математического моделирования отброса контактов кому- тационных электрических аппаратов
<i>Мороз А.Н., Черенков А.Д.</i> Определение оптимальных параметров сушильной установки непрерыв- ного действия для сушки шерсти с помощью электромагнитных полей70

## Набока Б.Г., Беспрозванных А.В., Москвитин Е.С., Бутко М.В., Бутко С.М., Головань А.А.

## Наний В.В., Мирошниченко А.Г., Юхимчук В.Д., Дунев А.А., Масленников А.М., Егоров А.В., Потоцкий Д.В.

$\Delta$ спекты проектирования и испытания пригателей с катяннимся ротором	83
Тепекты проектирования и испытания двигателей с катящимся ротором	.05

### Нестеренко И.А.

Проектирование	оптимальных	электромагнитных	систем	барабанных	
сепараторов					88

### Сахно А.А.

Математическая модель прогноза остаточного ресурса трансформаторов
тока 330 – 750 кВ с бумажно-масляной изоляцией конденсаторного типа97

### Ткачук В.І., Біляковський І.Є.

Електропривод коліс вузькоколійного трамваю на базі вентильного дви-	-
гуна	106

## Чепелюк А.А., Емельянов В.Л.

Анализ конструктивных схем электромеханических устройств автомат	И-
ческого включения резерва напряжением 0,4 кВ	113

## Чернявська М.В., Кузнецов А.І., Карпалюк І.Т., Глебова М.Л.,

Розрахунок додаткових витрат та пульсацій електромагнітного моменту	
вентильного двигуна змінного струму	120

## Шевченко С.Ю., Ганус А.И., Савченко Н.А.

Краткосрочное	прогнозирование	электропотребления	промышленных	
предприятий				125

Юферов В.Б., Егоров А.М., Шарый С.В., Друй О.С., Ильичева В.О.,	
Швец М.О., Ткачева Т.И., Свичкарь А.С., Хижняк С.Н.	
Магнитоплазменная регенерация ОЯТ	128

## 

Вимоги	до	оформ	лення	статей	у	Віснику	Національного	технічного	
універси	тету	/ "ΧΠΙ"							. 155

#### Наукове видання

### ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ "ХПІ"

Збірник наукових праць

## Тематичний випуск "Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика"

#### № 55'2010

Відповідальний за випуск: В.М. Луньова Науковий редактор: В.С. Лупіков Технічні редактори: Н.В. Себякіна, І.С. Варшамова

Обл.-вид. №

Підп. до друку 14.05.2010 р. Формат 60×84 1/16. Папір офісний. RISO-друк. Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 9,5. Наклад 300 прим. 1-й завод 1-80. Зам. № . Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ "ХПІ". Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 116 від 10.07.2000 р. 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

Друкарня НТУ "ХПІ", 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21