

Запорізький національний технічний університет

**ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА
ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА**



НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

2'2011

(липень)

**Виходить двічі на рік
(січень, липень)**

Видається з травня 1999 року.

**Зареєстрований 29 січня 2003 року Державним комітетом
інформаційної політики, телебачення та радіомовлення України,
Свідоцтво – серія КВ № 6905.**

Засновник і видавник: Запорізький національний технічний університет

**Запоріжжя, ЗНТУ
2011**

ISSN 1607-6761

Постановою президії ВАК України №1-05/1 від 10.02.2010 р. журнал «Електротехніка та електроенергетика» (скорочена назва – Е&Е), який видається з 1999 року, включений до переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата технічних наук.

Інтернет-сторінка журналу: <http://journal.zntu.edu.ua/et/index.php?page=index> .

Статті, що публікуються в журналі, реферуються в базах даних та РЖ ВІНІТІ (Росія) і «Джерело» (Україна). Журнал Е&Е міститься у міжнародній базі наукових видань Index Copernicus (<http://journals.indexcopernicus.com/index.php>), електронна копія журналу розміщена на сайті Національної бібліотеки України імені В. І. Вернадського НАН України у розділі «Наукова періодика України» за адресою: <http://nbuv.gov.ua/portal/> .

Журнал розповсюджується за Каталогом періодичних видань України (передплатний індекс – 22913).

Науковий журнал друкує наукові праці, теоретичні розробки, довідкові матеріали про розробки підприємств, вищих навчальних закладів, НДІ у галузі електротехніки, електроенергетики у відповідності з рубриками:

1. Електротехніка.
2. Електроенергетика.

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Головний редактор д.т.н., Потапенко Є. М.

Заст. гол. редактора к.т.н., Байша О. І.

Члени редколегії:

Андрієнко П. Д.	д.т.н.	Онуфрієнко В. М	д.ф.-м.н.
Биковський О. Г.	д.т.н.	Півняк Г. Г.	д.т.н., академік НАНУ
Зіновкін В. В.	д.т.н.	Піза Д. М.	д.т.н.
Кириленко О. В.	д.т.н., академік НАНУ	Пуйло Г. В.	д.т.н.
Клепиков В. Б.	д.т.н.	Чумаченко В. П.	д.ф.-м.н.
Метельський В. П.	к.т.н.	Яримбаш С. Т.	к.т.н.

Рекомендовано до видання Вченою радою Запорізького національного технічного університету, протокол № 11 від 30.05.2011 року.

Рукописи проходять незалежне рецензування із залученням провідних фахівців, за результатами якого редакційна колегія приймає рішення про опублікування. У разі невідповідності матеріали не повертаються авторові.

Адреса редакції: 69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64.
Тел.: (061) 7-698-296, факс: (061) 764-21-41.
E-mail: rvv@zntu.edu.ua

ЗМІСТ

I ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

И. А. Орловский, И. В. Блохин СИНТЕЗ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДВУХМАССОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ЛЮФТОМ В ВИДЕ МОДИФИЦИРОВАННОЙ РЕКУРРЕНТНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ	4
С. М. Тиховод, Э. В. Власенко КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ МАГНИТОДВИЖУЩИХ СИЛ В МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМАХ ЗАМЕЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ	15
О. Г. Волкова ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ОБРАЗОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПЛЕНОК НА КОНТАКТАХ МАСЛОНАПОЛНЕННЫХ КОММУТАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ	22
А. В. Близняков, В. Л. Миронченко АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ ТЕМНИТЕЛЕЙ СВЕТА	25
С. О. Бур'ян, В. Ю. Ворощенко, С. В. Король, О. Ю. Савич, С. А. Смирнов АВТОМАТИЗАЦІЯ ФОРМУВАННЯ ТРАЕКТОРІЙ ПРИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМУ ДОСЛІДЖЕННІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ	30
Е. С. Назарова, А. В. Пирожок, А. С. Нечпай, П. А. Подпружников УЧЕТ ЭФФЕКТА ОБРЫВА ПРОКАТЫВАЕМОЙ ПОЛОСЫ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ДВУХ СМЕЖНЫХ КЛЕТЕЙ СТАНА ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ	37
Т. М. Корнус, С. М. Тиховод МОДЕЛИРОВАНИЕ ПУСКА ТИРИСТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ПИТАНИЯ ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ ТУРБОГЕНЕРАТОРА	42
V. I. Gurevich RELIABILITY OF MICROPROCESSOR-BASED PROTECTIVE DEVICES – REVISITED	47
Э. М. Кулинич, В. В. Зиновкин МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ДОЗИРОВАНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРИГОТОВЛЕНИЯ ГАЗОБЕТОНА	54

II ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

А. А. Гилёв, В. С. Миронов ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПОДВИЖНОГО КОНТАКТА НА ДУГОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В МЕЖКОНТАКТНОМ ПРОМЕЖУТКЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ	61
П. Д. Андриенко, А. А. Сахно РЕЗУЛЬТАТЫ ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМЫ НЕПРЕРЫВНОГО КОНТРОЛЯ ХАРАКТЕРИСТИК ОСНОВНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА НА ПОДСТАНЦИИ «ДНЕПР-ДОНБАСС 330»	63
А. А. Шрам МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ СТЕКЛА	69

I. ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 681.518.2

И. А. Орловский канд. техн. наук, И. В. Блохин

Запорізький національний технічний університет

СИНТЕЗ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДВУХМАССОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ЛЮФТОМ В ВИДЕ МОДИФИЦИРОВАННОЙ РЕКУРРЕНТНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

По данным режима работы оборудования разработана методика синтеза математической модели в виде модифицированной рекуррентной нейронной сети двухмассовой электромеханической системы, включающей в себя двигатель постоянного тока последовательного возбуждения, упругость, демпфирование и люфт в механической передаче.

Ключевые слова: математическая модель, рекуррентная нейронная сеть, люфт, двухмассовая электромеханическая система, двигатель постоянного тока последовательного возбуждения.

Наличие в современных электромеханических системах (ЭМС) мощных вычислительных средств позволяет применить искусственные нейронные сети (НС) [1, 2] для синтеза в реальном времени математических моделей ЭМС. Эти модели могут быть использованы для поиска оптимальных настроек регуляторов с применением градиентных или генетических алгоритмов [3]. В статьях [4, 5, 6] разработана методика синтеза моделей нелинейных электромеханических объектов в виде модифицированных (полиномиальных, функциональных) рекуррентных НС (МРНС), рассмотрены примеры синтеза математической модели тиристорного электропривода с двигателем постоянного тока последовательного возбуждения (ДПТТВ). В этих работах структура МРНС определяется из структуры математической модели объекта.

При синтезе математической модели механической части ЭМС в общем случае следует учитывать нелинейность механической характеристики механизма, демпфирование, наличие упругости валов и люфты (зазоры) в зубчатых передачах [7, 8, 9, 10]. Особенно важно исследовать явления, проявляющиеся при наличии зазора для механизмов с большим моментом инерции рабочего органа в режимах пуска, торможения и реверса [7].

Функциональная схема двухмассовой механической части ЭМС, при представлении вращающихся масс в виде сосредоточенных, показана на рис. 1 [7], где δ – зазор в кинематической передаче, c_{12} – коэффициент упругости, b_{12} – коэффициент демпфирования.

Нейросетевое управление двухмассовой ЭМС с люфтом в кинематических передачах выполнено в работе [3], где поиск с помощью генетических алгорит-

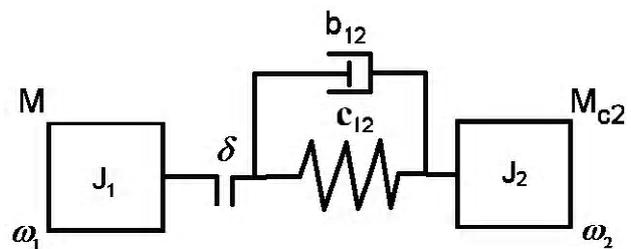


Рис. 1. Функциональная схема двухмассовой ЭМС с упругостью, демпфированием и люфтом

мов весовых коэффициентов регулятора, реализованного в виде НС, выполнялся на математической модели ЭМС. В работах [8, 10] рассмотрены особенности управления двухмассовой ЭМС с люфтом. Один из методов идентификации зазора представлен в статье [9]. Несмотря на перспективность применения НС для синтеза математических моделей электромеханических объектов, в приведенной выше литературе, а также в других источниках, отсутствует методика синтеза в виде НС математической модели двухмассовой ЭМС с люфтом.

Цель статьи. Разработать методику синтеза математической модели в виде МРНС двухмассовой ЭМС, включающей в себя ДПТТВ, упругость, демпфирование и люфт в механической передаче по данным режима работы оборудования.

Математическое описание двухмассовой ЭМС с люфтом. Разработку и исследование математической модели ЭМС в виде МРНС выполним с использованием математической модели двухмассовой ЭМС, структурная схема которой показана на рис. 2.

В ЭМС используется ДПТТВ, широко применяемый в тяговых электроприводах, где, как правило, име-

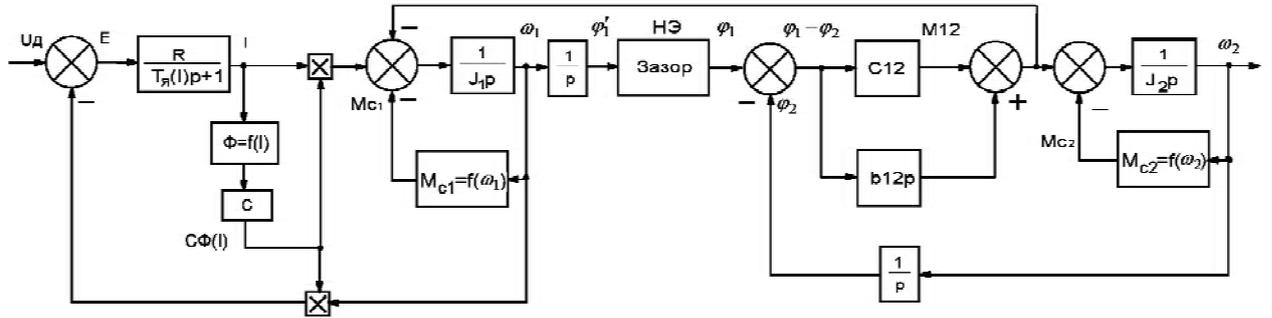


Рис. 2. Структурная схема математической модели двухмассовой ЭМС, включающей ДПТПВ, упругость, демпфирование и люфт

ются редукторы и, следовательно, присутствуют люфты (зазоры) в механических передачах. На рис. 2 люфт представлен нелинейным элементом НЭ, характеристика которого $\varphi_1 = f(\varphi'_1)$ приведена на рис. 3, а. Зависимость момента упругой деформации $M_{уд}$ от разности углов $\varphi'_1 - \varphi_1$ с учётом зазора представлена на рис. 3, б [7], где принимается начало отсчёта угла φ'_1 в середине зазора.

Полагаем, что взаимодействие между первой (момент инерции J_1) и второй (момент инерции J_2) массами (рис. 1) происходит лишь тогда, когда выбрана половина зазора $\delta/2$ (в одну или другую сторону), т. е. при условии $|\varphi'_1 - \varphi_1| \geq \delta/2$. Рассмотрим условия, существующие в приводах рабочих механизмов, когда моменты сопротивления $M_{c1} = f(\omega_1)$ и $M_{c2} = f(\omega_2)$ являются функциями соответствующих угловых скоростей ω_1 и ω_2 . При работе внутри зазора (зазор не выбран, отсутствует взаимодействие первой и второй масс),

движение масс описывается следующей системой уравнений [7]:

$$\left. \begin{aligned} M - M_{c1}(\omega_1) &= J_1 \frac{d\omega_1}{dt}, \\ M_{c2}(\omega_2) &= -J_2 \frac{d\omega_2}{dt}, \end{aligned} \right\} (1)$$

где M – электромагнитный момент двигателя.

Когда $|\varphi'_1 - \varphi_1| > \delta/2$ (зазор выбран), осуществляется взаимодействие между массами и механическая часть ЭМС описывается уравнениями [7]

$$\left. \begin{aligned} M - M_{c1}(\omega_1) &= J_1 \frac{d\omega_1}{dt} + c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) + b_{12}(\omega_1 - \omega_2), \\ c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) + b_{12}(\omega_1 - \omega_2) &= J_2 \frac{d\omega_2}{dt} + M_{c2}(\omega_2), \\ \varphi_1 &= \int \omega_1 dt \pm \delta/2, \\ \varphi_2 &= \int \omega_2 dt, \end{aligned} \right\} \emptyset$$

где φ_1 и φ_2 – углы поворота первой и второй масс; знак « \rightarrow » в третьем уравнении используется при выб-

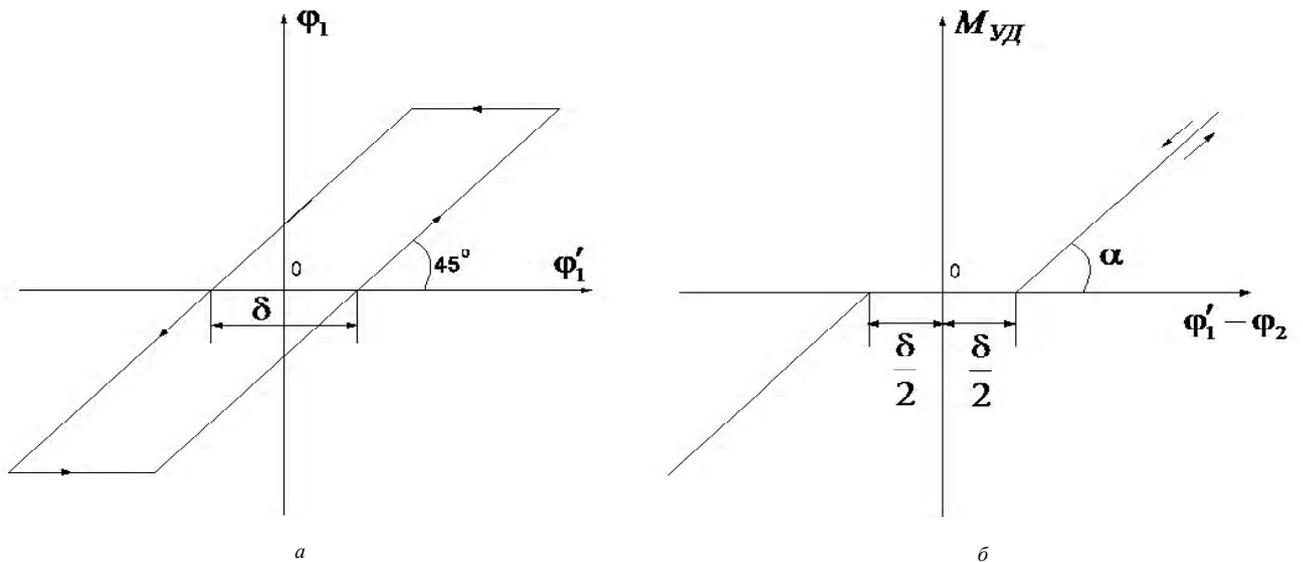


Рис. 3. Нелинейные характеристики механической части с упругостью и зазором: а) характеристика зазора, б) момент упругой деформации при наличии зазора

ранном зазоре в направлении отсчёта угла поворота φ_1 , знак «+» – при выбранном зазоре в противоположном направлении.

В условиях зазора движение ЭМС описывается системой (1) с начальными условиями, равными последним значениям при работе по системе (2). После того как выбран зазор, работа ЭМС описывается системой уравнений (2) с начальными условиями, равными последним значениям при работе в условиях зазора.

Общая система уравнений, описывающая движение двухмассовой ЭМС с ДПТПВ, имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{aligned} L(I) \frac{dI}{dt} + IR_d &= U_D + c\Phi(I)\omega_1, \\ M &= c\Phi(I)I, \\ M - M_{c1}(\omega_1) &= J_1 \frac{d\omega_1}{dt} + c_{12}D_1 + b_{12}D_2, \\ c_{12}D_1 + b_{12}D_2 &= J_2 \frac{d\omega_2}{dt} + M_{c2}(\omega_2), \\ D_1 &= \begin{cases} 0, & \text{если } |\varphi_1 - \varphi_2| < \delta/2, \\ \varphi_1 - \delta/2 - \varphi_2, & \text{если } \varphi_1 - \varphi_2 \geq \delta/2, \\ \varphi_1 + \delta/2 - \varphi_2, & \text{если } \varphi_1 - \varphi_2 \leq -\delta/2, \end{cases} \\ D_2 &= \begin{cases} 0, & \text{если } |\varphi_1 - \varphi_2| < \delta/2, \\ \omega_1 - \omega_2, & \text{если } |\varphi_1 - \varphi_2| \geq \delta/2, \end{cases} \\ \frac{d\varphi_1}{dt} &= \begin{cases} \omega_1, & \text{если } |\varphi_1 - \varphi_2| \geq \delta/2, \\ \omega_2, & \text{если } |\varphi_1 - \varphi_2| < \delta/2, \end{cases} \\ \omega_2 &= \frac{d\varphi_2}{dt}, \end{aligned} \right. \quad (3)$$

где U_D – напряжение, подаваемое на ДПТПВ; R_d – суммарное активное сопротивление обмоток двигателя; $L(I)$ – эквивалентная индуктивность обмоток двигателя, зависящая от тока; $c\Phi(I)$ – произведение конструктивной постоянной «с» двигателя на значение магнитного потока Φ , зависящего от тока якоря; D_1 и D_2 – дополнительные переменные, описывающие вычисление разности углов и угловых скоростей первой и второй масс.

Расчёт математической модели в виде МРНС двухмассовой ЭМС по ее известной математической модели. Особенностью синтеза математических моделей динамических объектов в виде МРНС является возмож-

ность передачи известных знаний о математической модели объекта в виде структуры МРНС и значений её весовых коэффициентов. Поэтому, прежде чем синтезировать математическую модель ЭМС в виде МРНС по данным режима работы объекта, необходимо разработать математическую модель объекта в виде МРНС

по его известной математической модели.

Для представления математической модели ЭМС в пространстве состояний представим систему дифференциальных уравнений (3) в форме Коши:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dI}{dt} &= -IR_d L^{-1}(I) + c\Phi(I)L^{-1}(I)\omega_1 + U_D L^{-1}(I), \\ \frac{d\omega_1}{dt} &= J_1^{-1}c\Phi(I)I - J_1^{-1}c_{12}D_1 - J_1^{-1}b_{12}D_2 - J_1^{-1}M_{c1}(\omega_1), \\ \frac{d\omega_2}{dt} &= J_2^{-1}c_{12}D_1 + J_2^{-1}b_{12}D_2 - J_2^{-1}M_{c2}(\omega_2), \\ \frac{d\varphi_1}{dt} &= D_3, \\ \frac{d\varphi_2}{dt} &= \omega_2, \\ D_1 &= \begin{cases} 0, & \text{если } |\varphi_1 - \varphi_2| < \delta/2, \\ \varphi_1 - \delta/2 - \varphi_2, & \text{если } \varphi_1 - \varphi_2 \geq \delta/2, \\ \varphi_1 + \delta/2 - \varphi_2, & \text{если } \varphi_1 - \varphi_2 \leq -\delta/2, \end{cases} \\ D_2 &= \begin{cases} 0, & \text{если } |\varphi_1 - \varphi_2| < \delta/2, \\ \omega_1 - \omega_2, & \text{если } |\varphi_1 - \varphi_2| \geq \delta/2, \end{cases} \\ D_3 &= \begin{cases} \omega_1, & \text{если } |\varphi_1 - \varphi_2| \geq \delta/2, \\ \omega_2, & \text{если } |\varphi_1 - \varphi_2| < \delta/2. \end{cases} \end{aligned} \right. \quad (4)$$

Вектором состояния объекта является вектор

$x = [I, \omega_1, \omega_2, \varphi_1, \varphi_2]^T$; вектором входных сигналов –

$u = [U_D, D_1, D_2, D_3, 1]^T$. Пятый элемент вектора u взят равным единице для обеспечения общности выражений при описании моментов сопротивлений

$M_{c1}(\omega_1)$ и $M_{c2}(\omega_2)$ в виде нелинейных коэффициентов. Дополнительная переменная D_3 описывает угловую скорость упругого вала со стороны люфта. С учётом сделанных обозначений первые пять уравнений системы (3) могут быть представлены в матричном виде

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad (5)$$

где матрицы нелинейных коэффициентов A и B имеют вид

$$A = \begin{bmatrix} -R_d L^{-1}(I) & -L^{-1}c\Phi(I) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ J_1^{-1}c\Phi(I) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} L^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -J_1^{-1}c_{12} & -J_1^{-1}b_{12} & -J_1^{-1}M_{c1}(\omega_1) \\ 0 & J_2^{-1}c_{12} & J_2^{-1}b_{12} & -J_2^{-1}M_{c2}(\omega_2) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

На входе МРНС выполняется функциональное преобразование сигналов для расчёта переменных D_1 , D_2 и D_3 , а также полиномиальное разложение нелинейных коэффициентов. Для получения общих выражений расчёта весовых коэффициентов МРНС запишем систему уравнений (4) в виде

$$\dot{x} = CY, \quad (7)$$

где $Y = [I, \omega_1, \omega_2, \varphi_1, \varphi_2, U_{д}, D_1, D_2, D_3, 1]^T = [y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6, y_7, y_8, y_9, y_{10}]^T$ – вектор, объединяющий векторы состояния объекта и входных сигналов. Матрица C , объединяющая матрицы A и B , представлена ниже:

$$C = \begin{bmatrix} -R_d L^{-1}(I) & -L^{-1}c\Phi(I) & 0 & 0 & 0 & 0 & L^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ J_1^{-1}c\Phi(I) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -J_1^{-1}c_{12} & -J_1^{-1}b_{12} & -J_1^{-1}M_{c1}(\omega_1) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_2^{-1}c_{12} & J_2^{-1}b_{12} & -J_2^{-1}M_{c2}(\omega_2) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 9 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{17} & 0 & 0 & 0 \\ c_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{28} & c_{29} & c_{210} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{38} & c_{39} & c_{310} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Для реализации математической модели в виде МРНС на вычислительной технике запишем систему уравнений (4) в разностном виде:

$$\begin{cases} I_n = I_{n-1} - TR_d L^{-1}(I_{n-1})I_{n-1} + Tc\Phi(I_{n-1})L^{-1}(I_{n-1})\omega_{1n-1} + TL^{-1}(I_{n-1})U_{дn}, \\ \omega_{1n} = \omega_{1n-1} + TJ_1^{-1}c\Phi(I_{n-1})I_{n-1} - TJ_1^{-1}c_{12}D_{1n-1} - TJ_1^{-1}b_{12}D_{2n-1} - TJ_1^{-1}M_{c1}(\omega_{1n-1}), \\ \omega_{2n} = \omega_{2n-1} + TJ_2^{-1}c_{12}D_{1n-1} + TJ_2^{-1}b_{12}D_{2n-1} - TJ_2^{-1}M_{c2}(\omega_{2n-1}), \\ \varphi_{1n} = \varphi_{1n-1} + TD_{3n-1}, \\ \varphi_{2n} = \varphi_{2n-1} + T\omega_{2n-1}, \\ D_{1n-1} = \begin{cases} 0, & \text{если } |\varphi_{1n-1} - \varphi_{2n-1}| < \delta/2, \\ \varphi_{1n-1} - \delta/2 - \varphi_{2n-1}, & \text{если } \varphi_{1n-1} - \varphi_{2n-1} \geq \delta/2, \\ \varphi_{1n-1} + \delta/2 - \varphi_{2n-1}, & \text{если } \varphi_{1n-1} - \varphi_{2n-1} \leq -\delta/2, \end{cases} \\ D_{2n-1} = \begin{cases} 0, & \text{если } |\varphi_{1n-1} - \varphi_{2n-1}| < \delta/2, \\ \omega_{1n-1} - \omega_{2n-1}, & \text{если } |\varphi_{1n-1} - \varphi_{2n-1}| \geq \delta/2, \end{cases} \\ D_{3n-1} = \begin{cases} \omega_{1n-1}, & \text{если } |\varphi_{1n-1} - \varphi_{2n-1}| \geq \delta/2, \\ \omega_{2n-1}, & \text{если } |\varphi_{1n-1} - \varphi_{2n-1}| < \delta/2. \end{cases} \end{cases} \quad (9)$$

В системе (4) имеется пять дифференциальных уравнений, следовательно, модель в виде МРНС будет иметь пять рекуррентных нейронов, в каждом из которых имеется единичная обратная связь от его выхода (первая переменная после знака равно в первых пяти уравнениях системы (9)). Также имеются блоки полиномиального разложения сигналов на входе сети для каждого нелинейного коэффициента и блоки вычисления функциональных переменных D_1 , D_2 и D_3 . В четвёртом и пятом уравнениях системы (9) отсутствуют переменные, значения которых определяются внутренними параметрами объекта и, следовательно, известны весовые коэффициенты для четвёртого и пятого нейронов. Для определения весовых коэффициентов первых трёх нейронов запишем три первых уравнения системы (9) следующим образом:

$$\begin{cases} I_n = I_{n-1} + w_{11}I_{n-1} + w_{12}\omega_{1n-1} + w_{17}U_{D_n}, \\ \omega_{1n} = \omega_{1n-1} + w_{21}I_{n-1} + w_{28}D_{1n-1} + w_{29}D_{2n-1} + w_{210}, \\ \omega_{2n} = \omega_{2n-1} + w_{38}D_{1n-1} + w_{39}D_{2n-1} + w_{310}, \end{cases} \quad (10)$$

тогда весовые коэффициенты сети определяются выражением

$$W = Pol_r(TC) = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & w_{17} & 0 & 0 & 0 \\ w_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & w_{28} & w_{29} & w_{210} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & w_{38} & w_{39} & w_{310} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

При этом $w_{ij} = pol_r(Tc_{ij})$ – элементы матрицы весовых коэффициентов МРНС для j -связи i -го нейрона. $Pol_r(\)$ и $pol_r(\)$ – матрица и вектор коэффициентов полиномов степени r , вычисленных при полиномиальном разложении выражений, находящихся в скобках. Согласно выражениям (8) – (10) на рис. 4 приведена структурная схема математической модели двухмассовой ЭМС с ДПППВ в виде МРНС. Блоки POL реализуют полиномиальное разложение входного сигнала, поданного на вход r , блоки D_C , D_B , D_φ вычисляют переменные D_1 , D_2 и D_3 , соответственно.

Общие выражения для обучения МРНС по данным режима работы двухмассовой ЭМС. Задачей обучения является настройка весовых коэффициентов полученной выше структуры МРНС по данным режима работы ЭМС для обеспечения отработки моделью вектора состояния ЭМС в различных режимах. Из-за нелинейности разрывного вида, вызванной зазором, вначале идентифицируется значение зазора, а после этого обучаются весовые коэффициенты МРНС по данным работы при выбранном зазоре.

Для идентификации зазора используются идеи, изложенные в работе [9], когда вначале осуществляется вращение двигателя на небольшой скорости в одну сторону (из-за неизвестного начального положения в зазоре) до полной выработки зазора в этом направлении, а после – движение в другую сторону также до полной выработки зазора. Рассматривается механизм с реактивным моментом сопротивления. Разность углов поворота первой и второй массы от времени t_1 (после поворота вала двигателя в одну сторону, но до начала движения в другую) до времени t_2 после отработки зазора в другую сторону определяется выражениями

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \delta + \Delta\varphi_c, \quad (12)$$

где $\Delta\varphi_c$ – разность углов, вызванная скручиванием вала.

Так как движение осуществляется на малой скорости при малом моменте сопротивления второй массе M_{c2} , то приближенно можно считать, что $\Delta\varphi_c \approx 0$, тогда

$$\delta \approx \int_{t_1}^{t_2} (\omega_1 - \omega_2) dt. \quad (13)$$

Повышения точности можно достичь вычислением угла $\Delta\varphi_c$, используя идентификацию коэффициента упругости c_{12} и момента скручивания вала. Найденное значение зазора позволяет вычислять дополнительные переменные D_1 , D_2 и D_3 по уравнениям системы (9), необходимые для осуществления обучения весовых коэффициентов МРНС.

Согласно четвертому и пятому уравнениям системы (9), нет необходимости обучать четвёртый и пятый нейроны, так как каждый из них имеет по одному известному, равному T , весовому коэффициенту. Получим аналитические выражения для алгоритма обучения первого, второго и третьего нейронов. Для обучения используются данные режима работы, когда отсутствует движение в зазоре (переменные D_1 и D_2 определяются по выражениям системы (9) при

$|\varphi_{1n-1} - \varphi_{2n-1}| \geq \delta / 2$). В этом случае осуществляется взаимодействие между массами, что позволяет найти все искомые коэффициенты.

Сформируем входные наборы с учётом функциональных преобразований сигналов на входе сети, а также соответствующие им выходные наборы, учитывающие наличие единичной обратной связи в каждом нейроне. Воспользуемся методикой, описанной в работах [4, 5, 6]. Входными сигналами обучающих наборов являются векторы h_i , вычисленные для каждого дискрет-

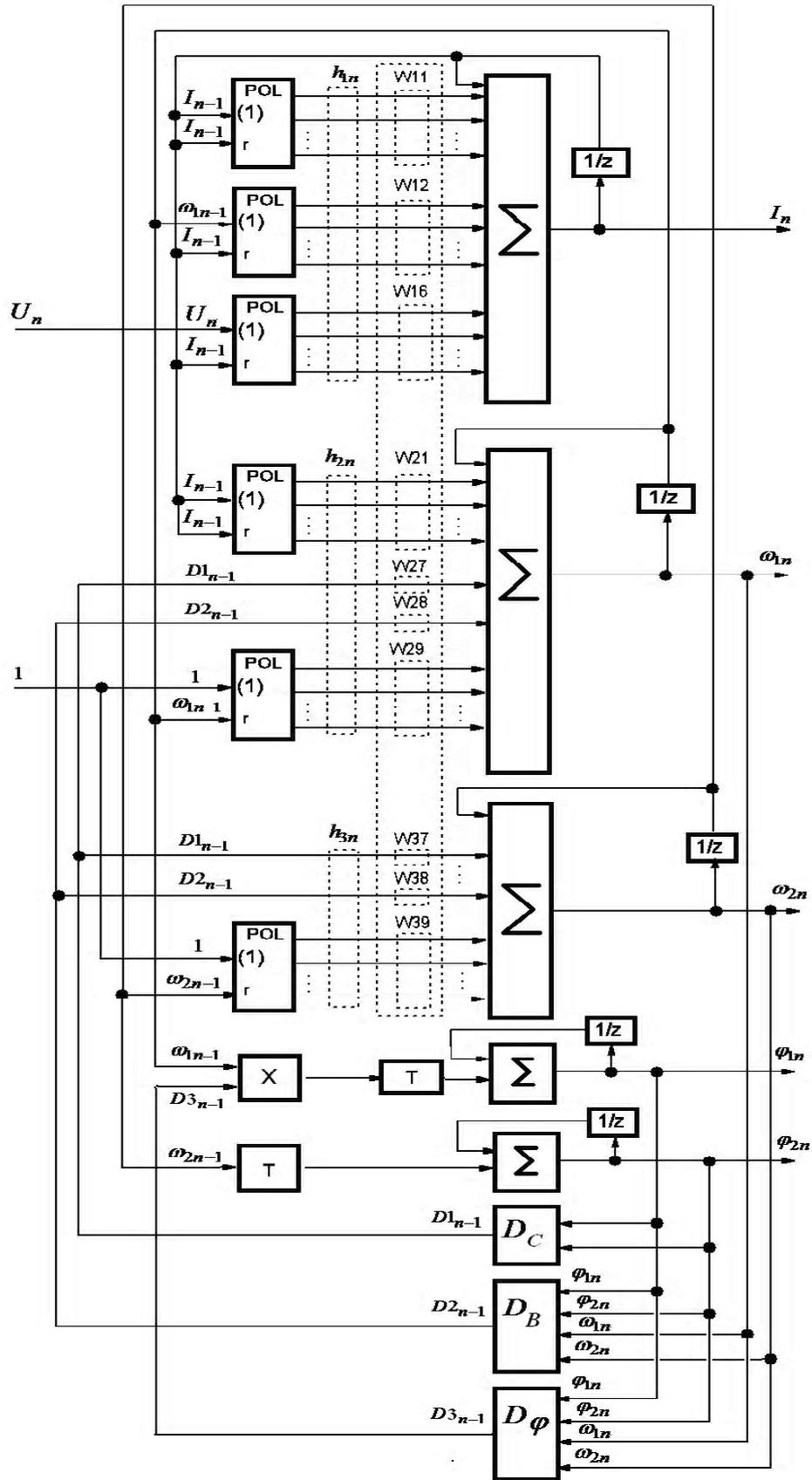


Рис. 4. Структура модели двухмассовой ЭМС в виде МРНС

ного момента времени. В момент времени n векторы h_{1n} , h_{2n} и h_{3n} для первого, второго и третьего нейронов (рис. 4), соответственно, (при аппроксимации не-

линейностей первой, второй и третьей строки матрицы C полиномами второго порядка) определяются следующими уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} h_{1n} &= [I_{n-1}, I_{n-1}I_{n-1}, I_{n-1}I_{n-1}^2, \omega_{n-1}, \omega_{n-1}I_{n-1}, \omega_{n-1}I_{n-1}^2, U_{n-1}, U_{n-1}I_{n-1}, U_{n-1}I_{n-1}^2]^T, \\ h_{2n} &= [I_{n-1}, I_{n-1}I_{n-1}, I_{n-1}I_{n-1}^2, D_{1n-1}, D_{2n-1}, 1, \omega_{n-1}, \omega_{n-1}^2]^T, \\ h_{3n} &= [D_{1n-1}, D_{2n-1}, 1, \omega_{n-1}, \omega_{n-1}^2]^T. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

С учётом приведенных выше обозначений три первых уравнения системы (9) можно представить в виде

$$x_{in} = x_{in-1} + w_{i1}h_{i1n} + w_{i2}h_{i2n} + \dots + w_{ik}h_{ikn},$$

$$i = 1,2,3; k = \overline{1, \dots, 10} \quad (15)$$

или более компактно следующим образом:

$$w_i h_{in} = \Delta x_{in}, \quad i = 1,2,3, \quad (16)$$

где w_i – вектор весовых коэффициентов i -го нейрона. Определение вектора весовых коэффициентов может быть выполнено аналитически из уравнения (16), что требует вычисления псевдообратной матрицы [4, 5, 6], либо с использованием алгоритмов обучения.

Обучение МРНС выполнялось отдельно для каждого нейрона с использованием алгоритмов пакетного обучения одиночного нейрона [1, 2], так как известны векторы h_i и вектор состояния в каждом такте счёта. Цель процесса обучения – минимизация суммарных квадратичных ошибок E_i (i – номер нейрона) между элементами вектора состояния объекта и выходными сигналами МРНС при одинаковой последовательности входных сигналов

$$\left. \begin{aligned} E_i &= \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{N_V} e_{in}^2, \\ e_{in} &= \Delta x_{in} - \Delta g_{in}, \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

где e_{in} – ошибка выхода i -го нейрона в n -ом такте счёта; N_V – объём обучающей выборки; $\Delta g_{in} = g_{in} - g_{in-1}$ – разность в n -ом такте между текущим g_{in} и предыдущим g_{in-1} значениями i -го элемента выходного вектора МРНС.

Коррекция весовых коэффициентов i -го нейрона МРНС (вектор w_i) производится на основе градиентного алгоритма обучения, согласно уравнениям

$$\left. \begin{aligned} \partial E_{in} / \partial w_{ikn} &= -e_{in} \cdot h_{ikn}, \\ \Delta w_{ikn} &= -\sum_n \eta \partial E_{in} / \partial w_{ikn}, \\ w_{ikn} &= w_{ikn-1} + \Delta w_{ikn}, \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

где h_{ikn} – значения k -го элемента вектора h_i для данных n -ого такта Δw_{ikn} – приращение веса k -го элемента вектора w_i для n обучающих наборов; η – коэффициент обучения.

Создание математических моделей и результаты их исследования. Для исследования имитационных моделей ЭМС разработана программа в системе Matlab, состоящая из трёх блоков: блока 1 – математической модели ЭМС, согласно системе уравнений (3); блока 2 – программы формирования структуры МРНС и выполнения её обучения по формулам (17) и (18) по данным режима работы блока 1; блока 3 – МРНС с весовыми коэффициентами, найденными в блоке 2.

При моделировании использовались значения параметров ДППВ: суммарное сопротивление якорной цепи $R_d = 0,0647$ Ом, момент инерции двигателя $J_1 = 0,018$ кг · м²; конструктивная постоянная двигателя $c = 78,5$; кривая намагничивания и зависимость суммарной индуктивности от тока якоря даны в табл. 1 [4].

Задавались также следующие параметры ЭМС: момент инерции второй массы $J_2 = 2 \cdot J_1$; коэффициент упругости $c_{12} = 100$ Нм / рад; коэффициент демпфиро-

Таблица 1 – Зависимости $\Phi(I)$, $L(I)$

I, A	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320
$\Phi, Вб \cdot 10^{-3}$	7	13,5	20,4	26,4	31,6	35,1	37,9	41	42,6	44,1	45,5	46,8	48	49,1	50,1	51
$L, Гн \cdot 10^{-3}$	36	34,5	32	28,5	24	19,5	15	11	9	7,5	6,3	5,5	5	4,5	4,2	4

вания $b_{12} = 0,25$ Нмс . Для обеспечения видимых различий работы ЭМС при наличии зазора и его отсутствии взято увеличенное значение зазора (аналогичное значению в работе [3]), равное $\delta = 0,5$ рад . Для обеспечения работы двигателя при малых токах, когда наиболее сильно проявляется зависимость магнитного потока от тока двигателя, задавались небольшие (вызванные трением в подшипниках) значения моментов сопротивления первой и второй масс. Зависимости моментов сопротивления $M_{c1}(\omega_1)$ и $M_{c2}(\omega_2)$ от соответствующих угловых скоростей (табл. 2) взяты одинаковые.

На рис. 5 приведена схема исследования имитационной модели ЭМС и МРНС (блок NN), выполненная в пакете Simulink системы Matlab. Блоки «Magnit potok» и «Indukt (-1)» реализуют, соответственно, нелинейные зависимости магнитного потока и обратного значения индуктивности от тока двигателя; блоки «Mc1_от_omega1» и «Mc2_от_omega2» формируют нелинейные зависимости моментов сопротивления $M_{c1}(\omega_1)$ и $M_{c2}(\omega_2)$ от угловых скоростей (табл. 2); модель зазора выполнена блоком «zazor». Согласно шестому, седьмому и восьмому уравнениям системы (9), дополнительные переменные D_1, D_2 и D_3 в МРНС формируются блоками D_C, D_B, D_Φ (рис. 4).

Для идентификации значения зазора выполнялся пуск двигателя на пониженном напряжении и через

1 с осуществлялся реверс тока на обмотке возбуждения (блок «revers current», рис. 5). Полученные значения угловых скоростей первой и второй масс приведены на рис. 6, а. С момента времени $t=0,6$ с блоком «Integrator» выполнялось интегрирование разности угловых скоростей согласно уравнению (13), что позволило определить значение зазора δ (рис. 6, б).

Идентифицируемое значение зазора (рис. 6, б) равно $\delta_u = 0,5163$ рад при заданном значении $\delta = 0,5$ рад. Относительная ошибка составила 3,26 %. Найденное значение зазора задавалось в блоках D_C, D_B, D_Φ (рис.4). Большое значение зазора, как отмечалось выше, задавалось для наглядного сравнения работы ЭМС с люфтом (рис. 7, e) и без него. При малых значениях зазора, например при $\delta < 0,03$ рад, точность идентификации зазора может осуществляться методами, предложенными в статье [9].

Для синтеза МРНС моделировался (с тактом счёта T , равным 0,0001с) разгон двигателя при напряжении 70 В в течение 1 сек, после чего напряжение на двигатель отключалось. При этом обеспечивается многократное прохождение зазора и возникновение упругих колебаний. Обучающие наборы для МРНС формировались по данным режима работы ЭМС при выбранном зазоре, что при реактивном моменте сопротивления происходит, например, при разгоне и торможении двигателя. Значения весовых коэффициентов МРНС после обучения приведены в табл. 3.

Таблица 2 – Зависимость $M_c(\omega)$

$\omega_1(\omega_2), c^{-1}$	0	0,1	20	40	60	80	100	120	140	150	300
$M_{c1}(M_{c2}), Нм$	0	0,7	0,75	0,82	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,35	2,2

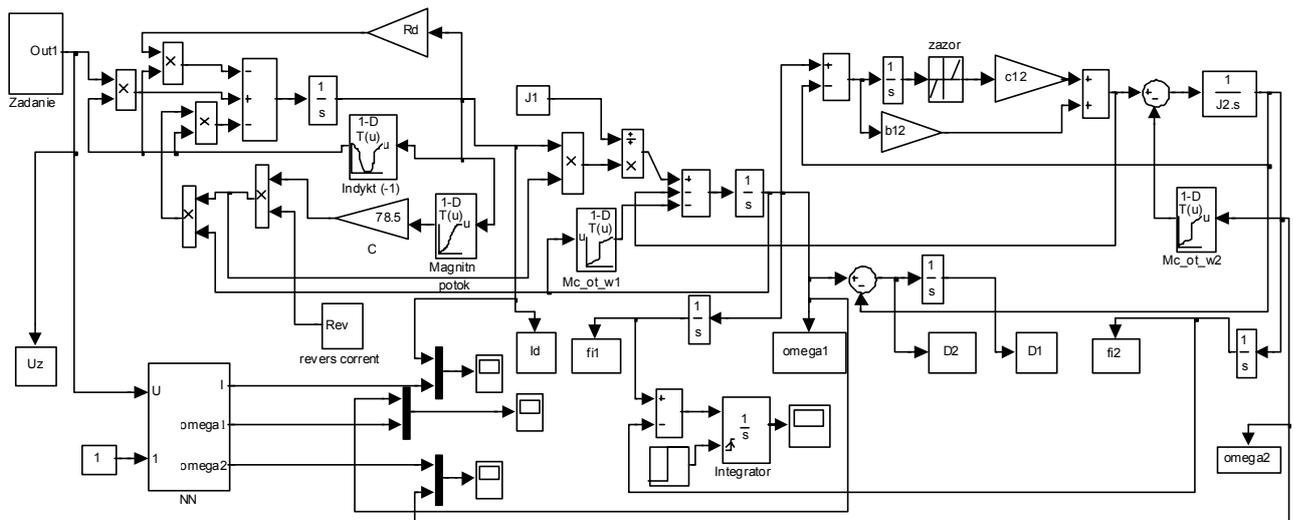
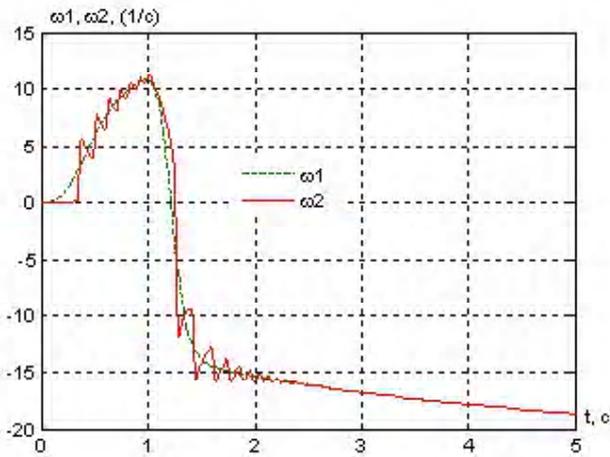
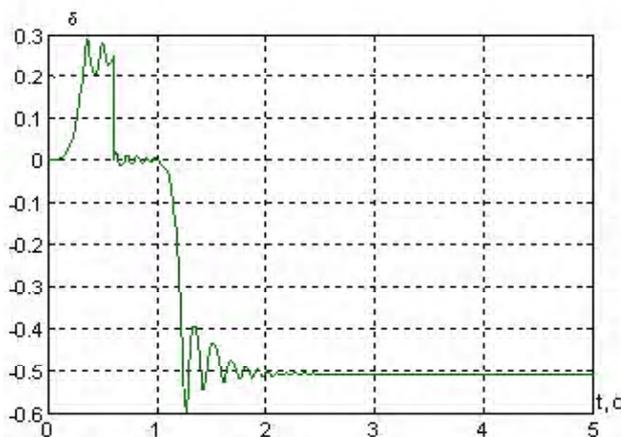


Рис. 5. Схема исследования имитационной модели ЭМС и МРНС



а) Изменение угловой скорости



б) Результат идентификации зазора

Рис. 6. Графики идентификации зазора

Таблица 3 – Значения весовых коэффициентов МРНС

Обозначение весовых коэфф.	$w_{i,j,0}$	$w_{i,j,1}$	$w_{i,j,2}$
$w_{1,1}$	-0,00181	0,000391	-2,70e-07
$w_{1,2}$	6,77e-08	-6,12e-05	5,66e-09
$w_{1,7}$	0,00225	1,77e-05	-5,25e-06
$w_{2,1}$	2,86e-06	0,000152	-1,04e-07
$w_{2,8}$	-0,00998		
$w_{2,9}$	-2,83e-05		
$w_{2,10}$	-5,59e-05	5,38e-06	-1,96e-08
$w_{3,8}$	0,278		
$w_{3,9}$	0,000679		
$w_{3,10}$	-0,00145	-1,59e-05	4,32e-09

Нелинейные коэффициенты представлялись полиномами второй степени, поэтому весовые коэффициенты $w_{1,1}$, $w_{1,2}$, $w_{1,7}$, $w_{2,1}$, $w_{2,10}$, $w_{3,10}$ представляют собой вектор из трёх элементов.

Сравнивались данные режима ЭМС при отработке напряжения на двигатель моделью в виде МРНС с результатами моделирования системы (3). На рис. 7, а показано напряжение на ДППВ, на рис. 7, б даны изменения M_{c1} и M_{c2} . На рис. 7, в, г, д соответственно даны сигналы отработки тока двигателя, угловых скоростей первой и второй масс (сплошной линией для ЭМС по уравнениям системы (3) и штриховой линией для обученной МРНС). Момент M_{12} , вызванный скручиванием вала, приведен на рис. 7, е, где видно, что существуют моменты времени, когда $M_{12} = 0$ и, следовательно, в этих моментах происходит отработка зазора.

Согласно рис. 7 и рис. 8, точность отработки координат двухмассовой ЭМС моделью в виде МРНС достаточно высока.

Значения максимальных ошибок отработки координат ЭМС моделью в виде МРНС, согласно рис. 8, приведены в табл. 4.

Ошибки отработки φ_1 и φ_2 моделью в виде МРНС в течение 2 сек находятся в пределах 0,3 рад, что при отработке 600 рад составило 0,05 %. Проверка работы модели на тестовых данных выполнялась для увеличенного на 30% (91 В) напряжения двигателя, при этом максимальные ошибки отработки тока двигателя, угловых скоростей первой и второй масс составляли 4 %, 7 % и 6 % соответственно, что подтвердило наличие обобщающих свойств разработанных моделей в виде МРНС.

Выводы

1. Правильность предложенных структур и аналитических зависимостей для обучения МРНС, представляющей математическую модель двухмассовой ЭМС с люфтом и демпфированием, подтверждена созданием с их помощью нелинейной модели этой ЭМС. Максимальные ошибки модели в виде МРНС отработки тока двигателя, угловых скоростей первой и второй масс по результатам моделирования не превышают 1,5 %, 1 % и 2,5 % соответственно (табл. 4).

2. Показана возможность применения предложенного алгоритма идентификации значения зазора при малых значениях момента сопротивления механизма. Ошибка идентификации значения зазора не превышала 3,3 %.

3. Проверка математической модели в виде МРНС по тестовым данным (не участвующим в обучении) показала наличие обобщающих свойств модели. При увеличении напряжения двигателя на 30 % максимальные ошибки отработки моделью тока двигателя, угловых скоростей первой и второй масс составляли 4 %, 7 % и 6 % соответственно.

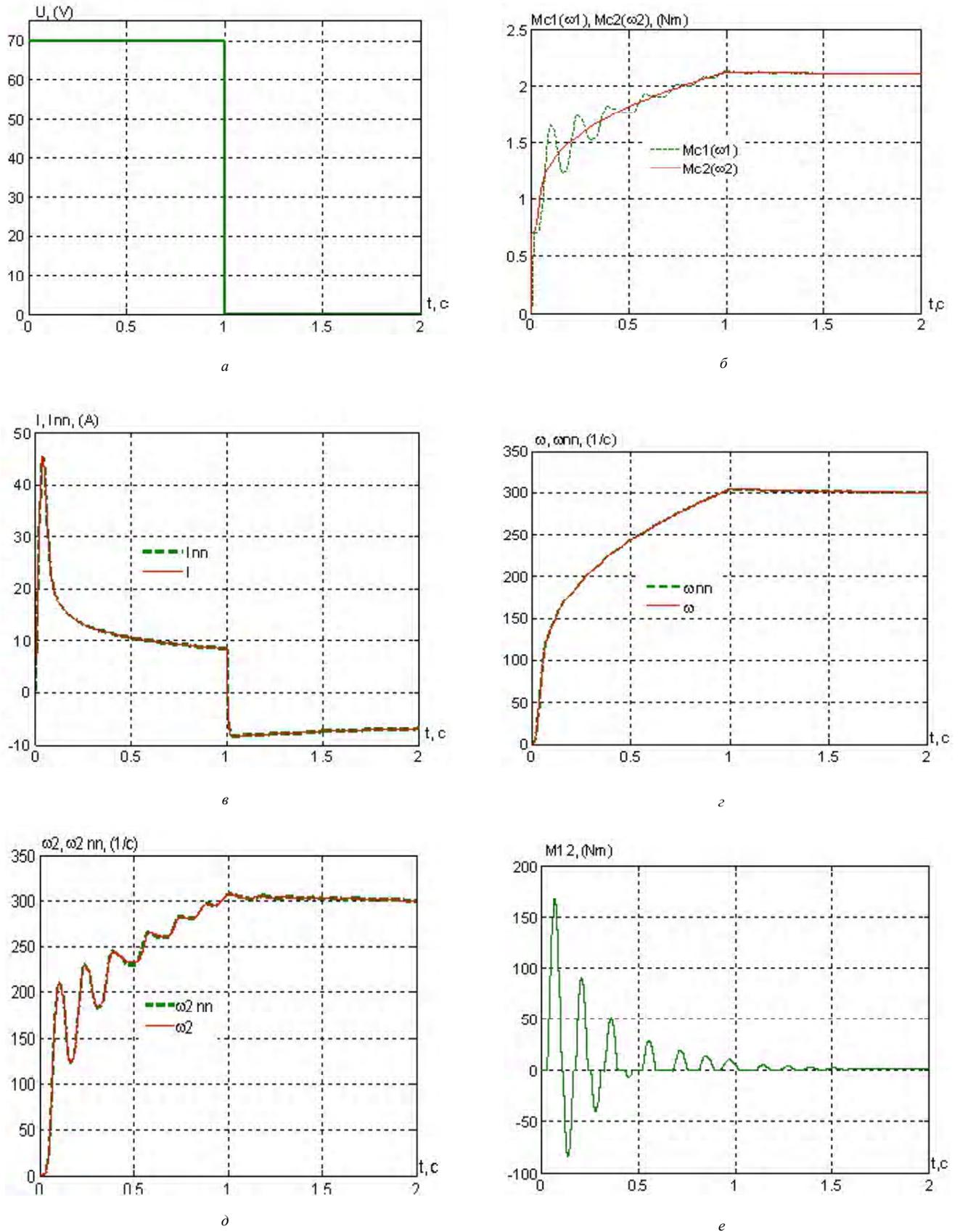


Рис. 7. Переходный процесс в двухмассовой ЭМС и её модели в виде МРНС

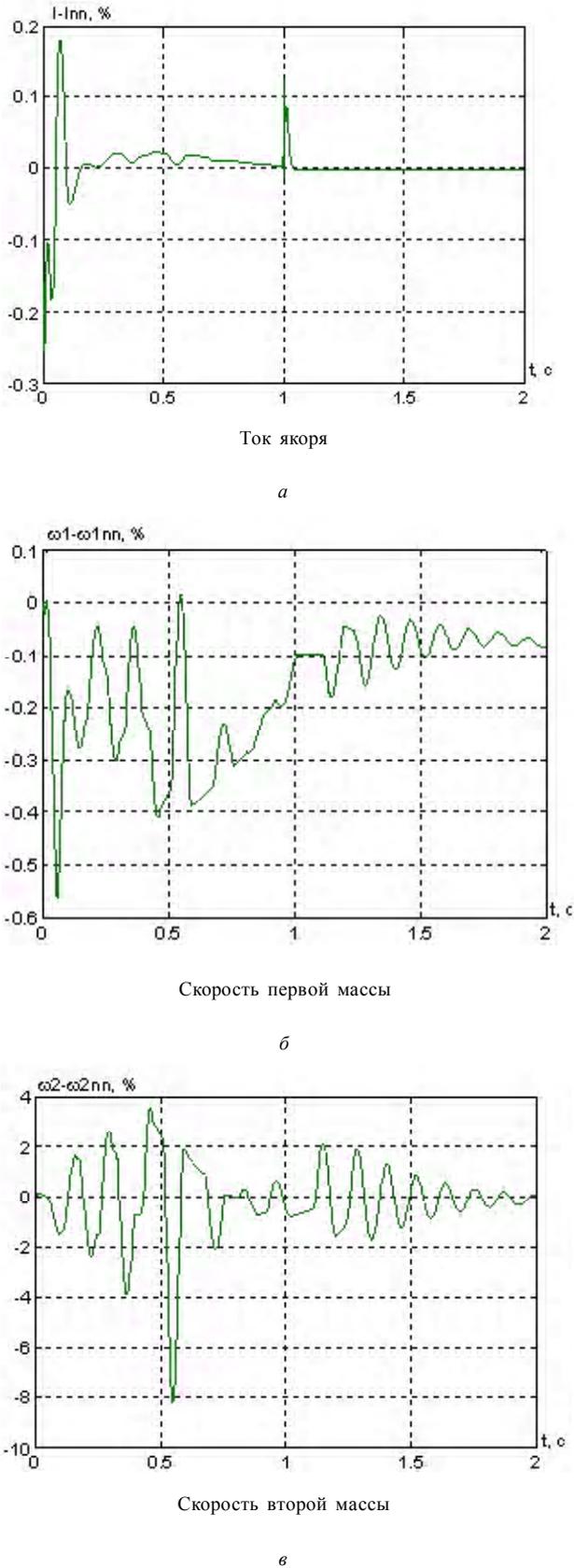


Рис.8. Сигналы ошибок модели в виде МРНС

Таблица 4 – Максимальные ошибки модели в виде МРНС

Элементы вектора состояния	Обозначения	Ошибки, %
Ток	I	1,5
Угловая скорость первой массы	ω_1	1
Угловая скорость второй массы	ω_2	2,5

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бодянский, Е. В. Искусственные нейронные сети: архитектуры, обучение, применения / Е. В. Бодянский, О. Г. Руденко // Харьков, ТЕЛТЕХ, 2004. – 372 с.
2. Хайкин, С. Нейронные сети: полный курс, 2-е издание / Хайкин С. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1104 с.
3. Обруч, И. В. Нейросетевое управление двухмассовой электромеханической системой с зазором в кинематических передачах / И. В. Обруч // Вестник Национального технического университета «ХПИ». – 2002. – № 5. – С. 305–304.
4. Орловский, И. А. Расчёт моделей нелинейных электромеханических объектов на полиномиальных рекуррентных нейронных сетях из их известных математических моделей / И. А. Орловский // Технічна електродинаміка. – 2009. – № 1. – С. 20–31.
5. Орловский, И. А. Расчёт и обучение моделей нелинейных электромеханических объектов на полиномиальных рекуррентных нейронных сетях / И. А. Орловский, А. А. Синявский // Искусственный интеллект. – 2008. – № 3. – С. 579–590.
6. Орловский, И. А. Разработка моделей на нейронных сетях серийного двигателя постоянного тока по экспериментальным данным / И. А. Орловский, И. В. Блохин, А. С. Смирнов // Вісник Кременчуцького політехнічного університету. – Кременчук. – 2010. – Вип. 3 (62), част. 1. – С. 153–156.
7. Герасимьяк, Р. П. Анализ и синтез крановых электромеханических систем / Р. П. Герасимьяк, В. А. Лещёв. – Одесса : СМІЛ, 2008. – 192 с.
8. Садовой, А. В. Системы оптимального управления прецизионными электроприводами / А. В. Садовой, Б. В. Сухинин, Ю. В. Сохина. – К. : ИСИМО, 1996. – 298 с.
9. Jukic, T. Autotuning Controller with Backlash Compensation / T. Jukic, N. Peric // EPE-PEMC. Dubrovnik & Cavtat. – 2002. – 6 с.
10. Chang, T. Matched Feedforward/Model Reference Control of a High Precision Robot With Dead-Zone / T. Chang, D. Yuan, H. Hanek // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – V.16. – 2008. – № 1. – P. 94–102.

Стаття надійшла до редакції 04.02.2011.

Орловський І. А., Блохін І. В.

Синтез математичної моделі двохмасової електромеханічної системи з люфтом у вигляді модифікованої рекурентної нейронної мережі

За даними режиму роботи обладнання розроблено методику синтезу математичної моделі у вигляді модифікованої рекурентної нейронної мережі двомасової електромеханічної системи, що містить двигун постійного струму послідовного збудження, пружність, демпфування і люфт у механічній передачі.

Ключові слова: математична модель, рекурентна нейронна мережа, люфт, двомасова електромеханічна система, двигун постійного струму послідовного збудження.

Orlovsky I. A., Blokhin I. V.

Synthesis of mathematical model of two-mass electromechanical system with backlash in the form of modified recurrent neural network

Based on the equipment operating data the technique of mathematical model synthesis has been developed in the form of a modified recurrent neural network of the two-mass electromechanical system including a DC motor of series excitation, elasticity, damping and backlash in the mechanical transmission.

Key words: mathematical model, recurrent neural network, backlash, two-mass electromechanical systems, DC motor of series excitation.

УДК 621.3.01:519.876.5

С. М. Тиховод канд. техн. наук, Э. В. Власенко канд. техн. наук

Запорожский национальный технический университет

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ МАГНИТОДВИЖУЩИХ СИЛ В МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМАХ ЗАМЕЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

При моделировании переходных процессов в магнитоэлектрических схемах замещения трансформаторов с целью учета магнитных потоков рассеяния предложено в магнитную цепь вводить дополнительные ветви с управляемыми источниками МДС. Коэффициенты управления источников МДС рекомендуется вычислять по изложенной методике.

Ключевые слова: моделирование, магнитоэлектрические схемы замещения, магнитные потоки рассеяния.

В состав современных электротехнических комплексов входят электромагнитные устройства, такие как трансформаторы, реакторы, а также другие сложные электротехнические устройства. При коммутациях в таких комплексах наблюдаются весьма большие броски токов, вводящие магнитные системы в режимы, близкие к насыщению стали. При этом на активные части электромагнитных устройств воздействуют отрицательные факторы – большие механические усилия, локальные температурные нагревы, перенапряжения и др. В ряде случаев нестационарные электромагнитные процессы приводят к аварийности трансформаторного оборудования [1]. Поэтому оценка бросков токов в переходных режимах электротехнических комплексов является актуальной задачей.

Обычно динамические процессы магнитных полей в таких электромагнитных устройствах, как трансформаторы и реакторы, оцениваются автономно, то есть

без учета сложных схем, в которые они включены. Для анализа электромагнитных полей используются такие программные пакеты, как ANSYS [2], COMSOL [3] и др. Эти пакеты позволяют выполнять моделирование трехмерных магнитных полей в переходных режимах при условии, что к электромагнитным устройствам подключается только очень простая электрическая цепь. Другой отрицательной стороной этих пакетов является их чрезмерно высокая стоимость. Например, стоимость лицензии на пользование пакетом ANSYS составляет примерно 1 млн. гривен. Поэтому в настоящее время моделирование переходных процессов в таких электрических комплексах целесообразно проводить методами теории электрических и магнитных цепей, которые взаимодействуют между собой. Объединенная магнитная и электрическая цепь составляют так называемую магнитоэлектрическую цепь, которая моделируется как единая цепь [4].

Покажем, как обычно формируется магнитоэлектрическая цепь. На рис. 1 изображена магнитная ветвь, на которой расположена катушка индуктивности. Ток, протекающий по катушке, создает согласно закону Ампера в магнитной ветви магнитодвижущую силу (МДС), равную $-Ni$, где N – число витков катушки, i – сила тока в катушке. Магнитный поток, пересекающий витки катушки, создает в катушке ЭДС индукции, равную $N \cdot d\Phi / dt$. Таким образом, электрические и магнитные ветви связаны между собой, что учитывается введением в схему замещения управляемых источников напряжения. Если магнитная ветвь линейна, то участок магнитопровода имеет магнитное сопротивление, определяемое выражением: $R = \ell / (S\mu_0\mu)$, где ℓ – длина магнитной ветви, S – площадь поперечного сечения магнитной ветви, μ_0 – магнитная постоянная, μ – относительная магнитная проницаемость материала магнитопровода. Если магнитная ветвь нелинейная, то участок магнитопровода замещается двумя элементами R_n , E_n , значения которых в точке (Φ, U_{m1}) определяются с помощью характеристики намагничивания [4]

$$R_n = \left. \frac{dU_m}{d\Phi} \right|_{U_m = U_{m1}} ; E_n = U_{m1} - \Phi_1 R_n$$

При моделировании электромагнитных процессов с помощью магнитоэлектрических схем замещения источниками магнитодвижущих сил (МДС) обычно считают катушки [4–5]. Величину МДС вычисляют интегрально по закону Ампера (полного тока). В тех случаях, когда магнитная проницаемость магнитопроводов велика и магнитными потоками рассеяния можно пренебречь, такое допущение значительных погрешностей не дает. В режиме полного насыщения магнитной системы магнитная цепь теряет всякий смысл. Однако в режимах, близких к насыщению ферромагнит-

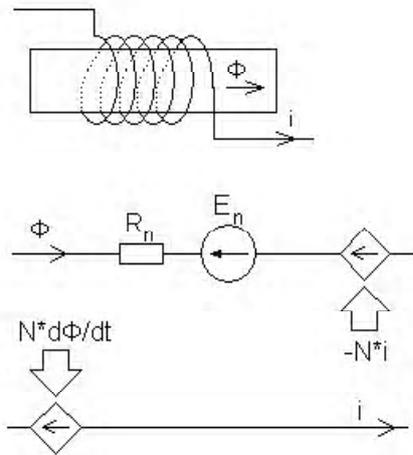


Рис. 1. Магнитная ветвь, связанная с токовой обмоткой, и ее схема замещения: Φ – магнитный поток магнитной ветви; i – ток, протекающий по обмотке

ных элементов магнитопроводов, можно использовать понятие магнитной цепи, если ввести в магнитоэлектрическую схему замещения дополнительные ветви, замыкающие магнитные потоки рассеяния. В эти магнитные ветви также необходимо вводить дополнительные источники МДС. При наличии магнитных ветвей, замыкающих потоки рассеяния, МДС в стержнях уже нельзя рассчитывать по закону полного тока.

Целью данной статьи является разработка методики моделирования распределенных источников МДС в магнитоэлектрических схемах замещения трансформаторов, реакторов и других электромагнитных устройствах.

Одной из характеристик магнитного поля является скалярный магнитный потенциал φ_m , который связан с проекцией напряженности H_s магнитного поля на направление s выражением

$$H_s = \frac{\partial \varphi_m}{\partial s} \tag{1}$$

Если магнитное поле создано некоторым контуром радиуса R с током I (см. рис. 2), то в любой точке наблюдения A скалярный потенциал φ_m может быть вычислен по известной формуле [6]:

$$\varphi_m = \frac{I}{4\pi} \Omega_A + \text{const} \tag{2}$$

где Ω_A – телесный угол, под которым виден контур тока из точки наблюдения A .

Константа, входящая в формулу (2), определяется из условия: на какой поверхности скалярный магнитный потенциал испытывает скачок, равный I . Разность магнитных потенциалов между двумя точками дает магнитное напряжение.

Телесный угол Ω_A для кругового витка можно вычислить следующим образом. Пусть точка наблюдения A имеет координаты x_A, y_A, z_A (см. рис. 3).

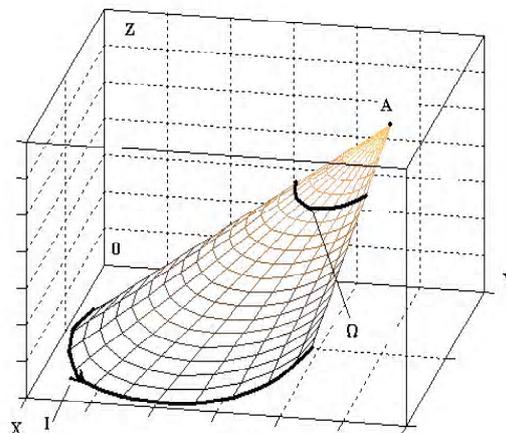


Рис. 2. К определению скалярного магнитного потенциала, созданного витком с током

Тогда элемент поверхности $dS = r \cdot dr \cdot d\varphi$ в плоскости, параллельной плоскости XOY с координатой $z = z_a$, будет виден из точки наблюдения A под телесным углом $d\Omega$:

$$d\Omega = \frac{dS \cos\beta}{\rho^2} = \frac{rdrd\varphi(z_A - z_a)}{\rho^3}, \quad (3)$$

где r – расстояние от центра витка до элемента dS ; x_a, y_a, z_a – координаты элемента dS ; ρ – расстояние от элемента dS до точки наблюдения.

Подставим в выражение (3) зависимость ρ от координат и проинтегрируем. В результате получим в выражении (4) телесный угол, под которым виток виден из точки наблюдения

$$\Omega_A = (z_A - z_a) \int_0^R r dr \int_0^{2\pi} \frac{d\varphi}{\left[(x_A - r \cos\varphi - x_c)^2 + (y_A - r \sin\varphi - y_c)^2 + (x_A - z_a)^2 \right]^{3/2}} + \text{Const}, \quad (4)$$

где x_a, y_a – координаты центра витка.

Интеграл в выражении (4) может быть вычислен аналитически. Однако, если контур с током имеет сложную форму, то интеграл аналитически не всегда вычисляется, но его легко можно определить численными методами.

Если задать $\text{Const}=0$, то значение телесного угла Ω_A в выражении (4) испытывает скачок, равный 4π при переходе через поверхность, ограниченную витком. При $z_A = (+0)$ $\Omega_A = 2\pi$, а при $z_A = (-0)$ $\Omega_A = -2\pi$.

Выберем константу в выражении (4) так, чтобы магнитное напряжение U_m между любыми точками исследуемого пространства не испытывало скачков. При токе витка в 1 А скачок магнитного напряжения U_m между двумя точками может быть равен или +1 или -1, если обе точки расположены по разные стороны плоскости витка. Если же какая-то точка лежит в плоскости витка, то скачок магнитного напряжения U_m между двумя точками может быть или +0,5 или -0,5. Чтобы

магнитное напряжение непрерывно изменялось между любыми точками пространства, из магнитного напряжения U_m , как разности магнитных потенциалов, скачок необходимо вычитать. На рис. 4 представлена блок-схема алгоритма выбора константы при определении магнитного напряжения, созданного витком с током $I=1$, между двумя произвольными точками 1 и 2.

Таким образом, в пространстве магнитной системы трансформатора можно задать достаточное число точек и определить магнитное напряжение между любой парой смежных точек, создаваемое всеми обмотками трансформатора.

Для примера рассмотрим виток радиуса $R=0,15$ м с током $I=1$ А, расположенный в плоскости XOY . Зададим последовательный ряд точек в пространстве, показанный на рис. 5.

Пусть расстояние между смежными точками одинаково и равно 0,1 м. Вычислим магнитные напряжения U_m между последовательностью смежных точек, выполняя обход по часовой стрелке.

Распределение магнитных напряжений между последовательностью смежных точек показано на рис. 6. Алгебраическая сумма всех магнитных напряжений по замкнутому контуру равна току в витке, то есть $\sum U_m = 1$. Это подтверждает то, что вычисленные магнитные напряжения удовлетворяют закону полного тока.

Вычислим магнитное напряжение, созданное круговой цилиндрической обмоткой, содержащей N_s слоев и N_r витков в каждом слое. Пусть ось обмотки расположена параллельно оси z , причем Z_{a1} – координата нижней части обмотки, Z_{a2} – координата верхней части обмотки, r_{a1}, r_{a2} – внутренний и внешний радиусы обмотки. Тогда для витка, имеющего номер

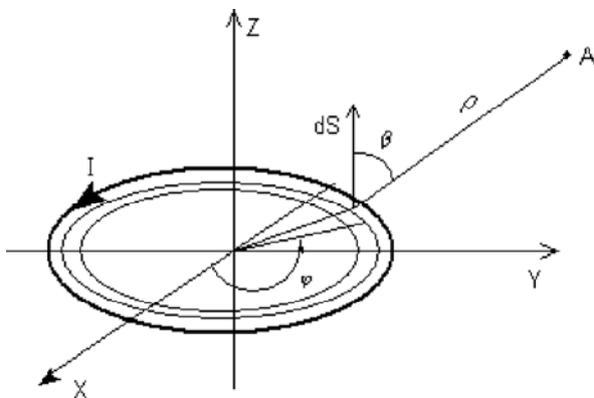


Рис. 3. Вычисление скалярного магнитного потенциала, созданного витком с током

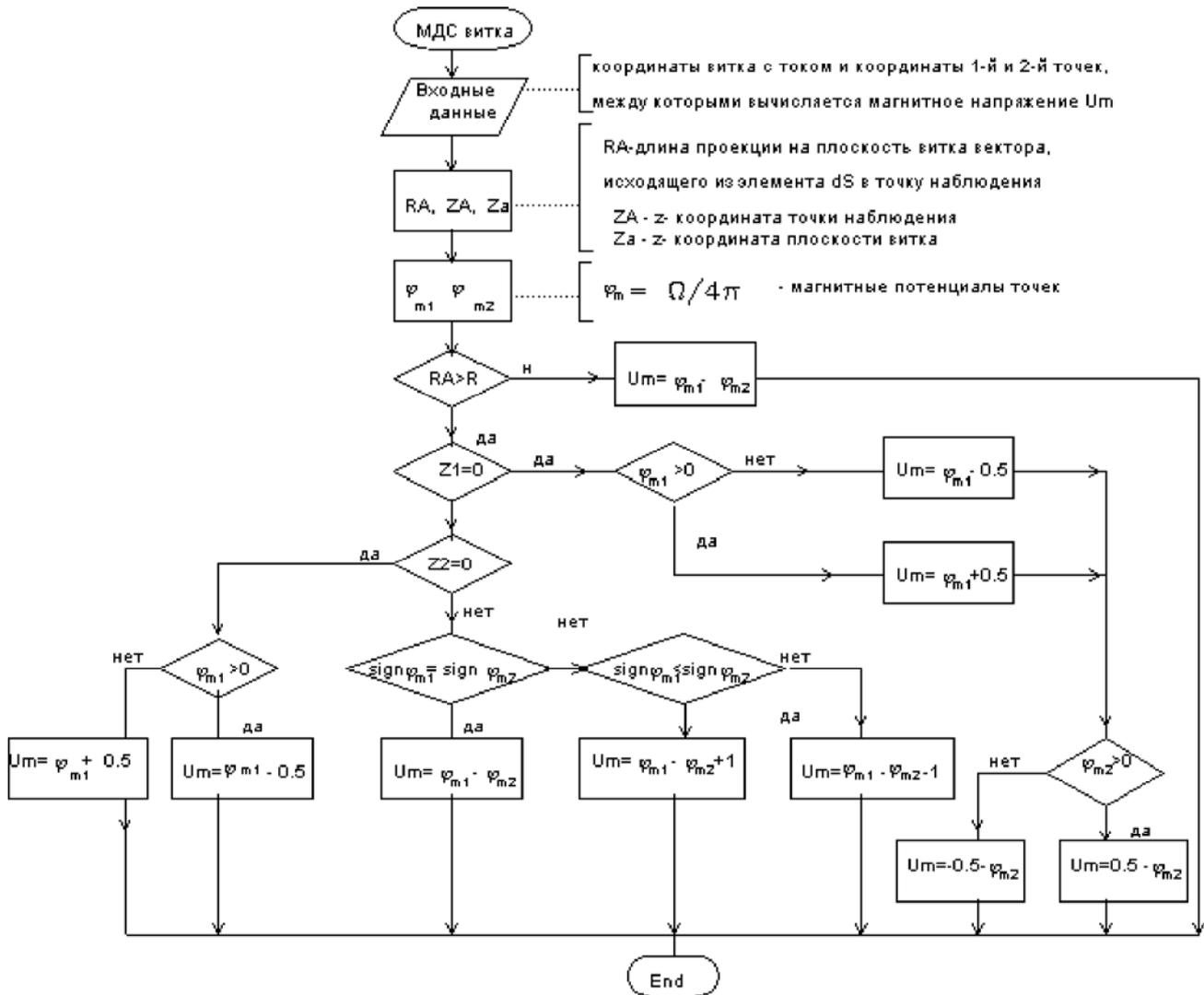


Рис. 4. Блок-схема алгоритма определения магнитного напряжения, созданного круговым витком с током

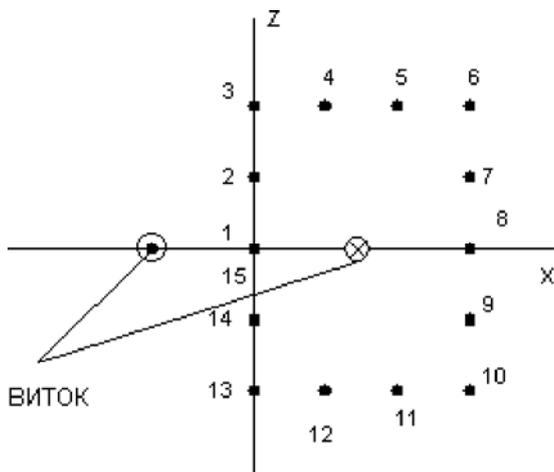


Рис. 5. Виток с током в разрезе и набор точек, между которыми вычисляется магнитное напряжение

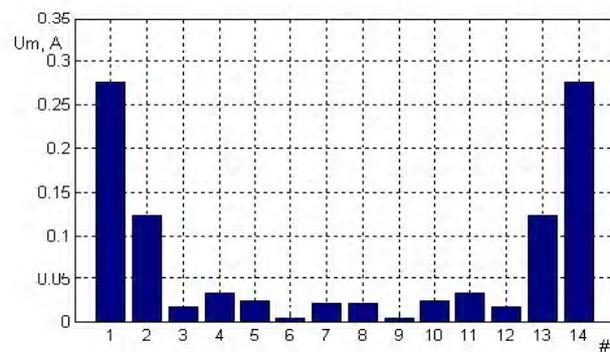


Рис. 6. Распределение магнитных напряжений, созданных одним витком, между последовательностью смежных точек (контур охватывает проводник)

слоя n_s и номер витка в ряду n_r , текущее значение координаты по оси z и текущий радиус витка равны:

$$z_k = (0,5 + n_r - 1) \cdot \frac{H}{N_r} + Z_{a1};$$

$$r_k = (0,5 + n_s - 1) \cdot \frac{\Theta}{N_s} + r_{a1},$$

где $H = Z_{a2} - Z_{a1}$; $\Theta = r_{a2} - r_{a1}$.

Блок-схема алгоритма вычисления МДС тока цилиндрической обмотки приведена на рис. 7. МДС вычисляется между набором заданных точек пространства. Логика этого алгоритма состоит в том, что в магнитном напряжении, созданном всей катушкой с током, учитывается вклад каждого витка. Магнитное напряжение, созданное одним витком, определяется согласно алгоритму, показанному на рис. 4.

Все вычисленные магнитные напряжения в магнитозлектрической схеме замещения имитируются дополнительными управляемыми токами катушек источниками МДС.

Расчет по предложенному алгоритму МДС, созданной обмоткой для системы N точек, показанной на рис. 5, представлен на рис. 8. В расчете принято: $Z_{a1} = -0,15$ м; $Z_{a2} = 0,15$ м; $r_{a1} = 0,1$ м; $r_{a2} = 0,2$ м.

Алгебраическая сумма всех магнитных напряжений по замкнутому контуру равна току в витке 1 А, умноженному на число витков: $\sum U_m = 20$, то есть закон полного тока соблюдается.

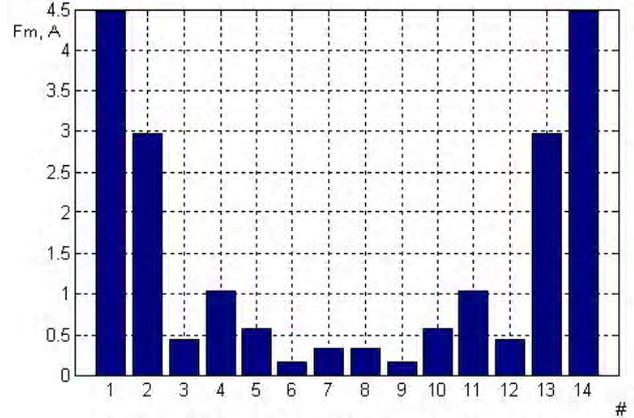


Рис. 8. Распределение магнитных напряжений, созданных цилиндрической обмоткой, между последовательностью смежных точек (контур охватывает все проводники обмотки)

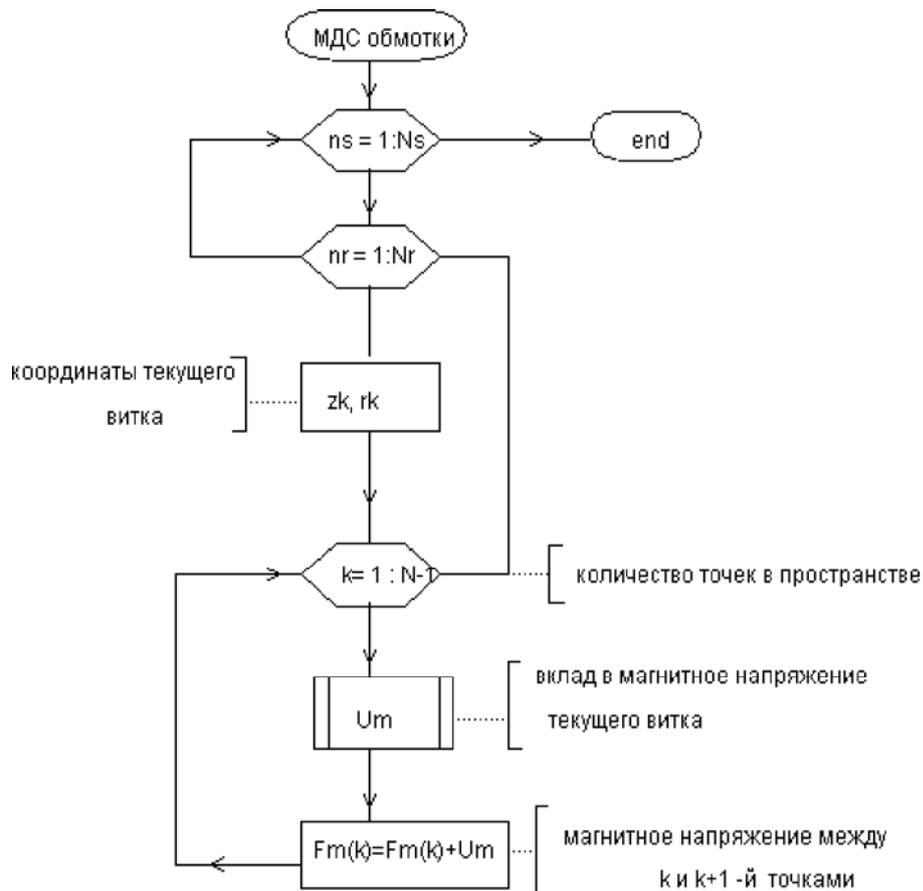


Рис. 7. Блок-схема алгоритма определения магнитного напряжения, созданного цилиндрической обмоткой с током

Во многих случаях обмотки имеют прямоугольную форму с закругленными углами. Вычислим магнитное напряжение, созданное обмоткой с направляющей, показанной на рис. 9.

Как и в случае с круговой цилиндрической обмоткой, рассмотрим вначале один виток в виде прямоугольника с закругленными углами. Главным размером витка назовем длину A большей стороны. Длину меньшей стороны B выразим через размер A : $B = k_B \cdot A$. Радиус закругления углов также выразим через размер A : $R_1 = k_R \cdot A$.

Чтобы воспользоваться разработанным алгоритмом вычисления МДС, необходимо иметь зависимость длины радиус-вектора r от угла φ . Рассмотрим показанную на рис. 10 одну четвертую часть фигуры рис. 9.

При $0 < \varphi < \varphi_1$ имеем зависимость

$$r = \frac{A}{2 \cos \varphi}, \quad (5)$$

при $\varphi_2 < \varphi < \pi/2$ имеем зависимость

$$r = \frac{B}{2 \sin \varphi}. \quad (6)$$

Получим зависимость $r(\varphi)$ при $\varphi_1 < \varphi < \varphi_2$ в первом квадранте. Для этого рассмотрим треугольник

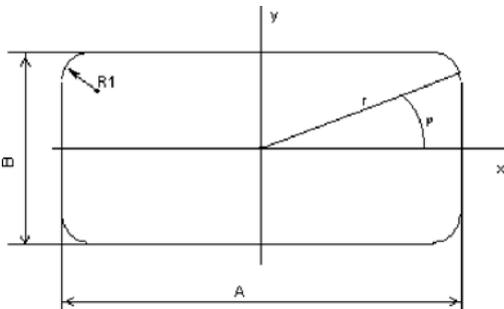


Рис. 9. Направляющая прямоугольной обмотки

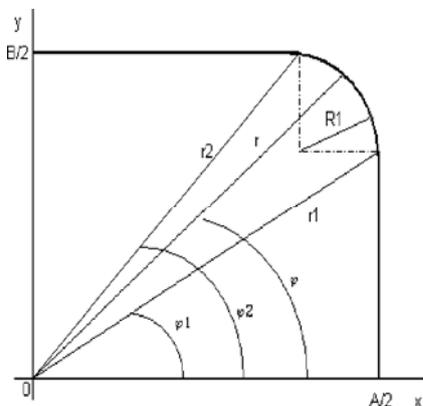


Рис. 10. К определению $r(\varphi)$

($0, 0', a$) (рис. 11). Учитывая, что $\psi = \varphi - \varphi_c$, согласно теореме синусов имеем

$$\frac{R_1}{\sin \psi} = \frac{r}{\sin \alpha} = \frac{R_c}{\sin(\psi + \alpha)}, \quad (7)$$

откуда

$$r = \frac{\sin \alpha}{\sin \psi} R_1. \quad (8)$$

Согласно второму равенству в (7) имеем:

$$\sin(\alpha + \psi) = \frac{R_c}{R_1} \sin \psi. \quad (9)$$

После преобразований уравнения (9) получаем:

$$m \sin^2 \alpha + n \sin \alpha + \ell = 0, \quad (10)$$

где

$$m = \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \psi} + 1; \quad n = -\frac{2R_c}{R_1 \operatorname{tg} \psi}; \quad \ell = \left(\frac{R_c}{R_1}\right)^2 - 1.$$

Решение уравнения (10) дает зависимость $\sin \alpha$ от ψ . Использование зависимости $\sin \alpha(\psi)$ с учетом (8) дает зависимость $r(\psi)$.

Для $\varphi < \varphi_c$ имеем $\psi = -\varphi + \varphi_c$, следовательно, можно в общем случае писать

$$\psi = |\varphi - \varphi_c|.$$

Для других четвертей имеем:

При $\varphi_2 < \varphi \leq \pi - \varphi_2$

$$r = \frac{B}{2 \sin \varphi}, \quad \text{где } \varphi = \psi - \varphi_1. \quad (11)$$

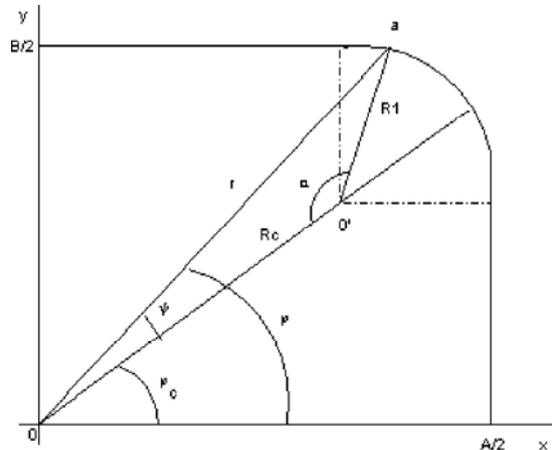


Рис. 11. К определению $r(\varphi)$ при $\varphi_c < \varphi < \varphi_2$

При $\pi - \varphi_1 < \varphi \leq \pi$

$$r = \frac{A}{2 \cos(\pi - \varphi)}. \quad (12)$$

Для всех углов 3-го и четвертого квадрантов ($\varphi > \pi$) будем использовать $\varphi = \varphi - \pi$.

$$\Omega_A = (z_A - z_a) \iint_S \frac{r(a, \varphi) dr d\varphi}{\left[(x_A - r(a, \varphi) \cos \varphi - x_c)^2 + (y_A - r(a, \varphi) \sin \varphi - y_c)^2 + (x_A - z_a)^2 \right]^{3/2}}, \quad (13)$$

где a – переменная величина, изменяющаяся от нуля до A , задающая главный размер текущего прямоугольника с закругленными углами; S – поверхность витка-прямоугольника с закругленными углами.

Интеграл (13) можно легко вычислить численным методом, например методом трапеций, и получить значение магнитного скалярного потенциала в произвольной точке. Применяв алгоритм, аналогичный приведенному на рис. 4, получим способ вычисления магнитного напряжения между любыми двумя точками пространства.

Рассмотрим теперь обмотку, состоящую из витков прямоугольной формы с закругленными углами и содержащую N_s слоев и N_r витков в каждом слое. Пусть ось обмотки расположена параллельно оси z , причем Z_{a1} – координата нижней части обмотки, Z_{a2} – координата верхней части обмотки, r_{a1} , r_{a2} – внутренний и внешний размер обмотки большей стороны, x_c, y_c – координаты центра витка.

Требуется для системы точек, координаты которых заданы в массиве C , определить магнитные напряжения, созданные током всех витков обмотки прямоугольной формы между всеми смежными точками. Алгоритм определения системы магнитных напряжений, созданной обмоткой прямоугольной формы, похож на алгоритм для катушки цилиндрической формы, показанный на рис. 7. Данный алгоритм начинается с циклов прохода по виткам катушки по слоям и по рядам. Далее отдельно обрабатывается каждый виток. Для текущего витка задаются координаты и размеры. Поскольку для каждого витка предстоит определение телесного угла Ω из ряда точек наблюдения, то для всех витков предварительно вычисляется зависимость длины радиус-вектора r от центра витка до линии витка от азимутального угла φ при изменении размера витка A_k от нуля до A . Результаты сохраняются в массивах fm и rm .

По разработанному алгоритму составлена компьютерная программа. В виде примера для катушки, имеющей параметры $Z_{a1} = -0,15$; $Z_{a2} = 0,15$; $r_{a1} = 0,15$; $r_{a2} = 0,25$; $x_c = 0,1$; $y_c = 0$;

Таким образом, по заданным значениям главного размера A , а также коэффициентов k_b , определяющих размер малой стороны и радиус закругления углов, получили зависимость длины радиус-вектора от азимутального угла φ . С помощью зависимости $r(\varphi)$ вычислим интеграл (13) для вычисления телесного угла:

$N_s = 2$; $N_r = 10$; $k_b = 0,5$; $kr = 0,2$ вычислены магнитные напряжения для всех смежных точек контура, показанных на рис. 5. Результаты расчета показывают, что алгебраическая сумма магнитных напряжений по замкнутому контуру равна 10 А, так как контур охватывает половину витков, а сила тока в витках задана 1 А, то есть закон полного тока выполняется.

Таким образом, мы рассмотрели методику расчета МДС между любыми точками в пространстве, создаваемой обмотками цилиндрической и прямоугольной формы. В тех режимах, когда магнитными потоками рассеяния пренебречь нельзя, в магнитоэлектрическую схему замещения магнитной цепи необходимо вводить дополнительные ветви, замыкающие потоки рассеяния. В таких случаях величину МДС уже нельзя вычислять интегрально по закону полного тока. В каждую магнитную ветвь необходимо включать источник МДС со значением, рассчитанным с помощью разработанной методики.

Для примера рассмотрим однофазный трансформатор. Фрагмент его конструкции в разрезе показан на рис. 12. Ввиду симметрии показана половина конструк-

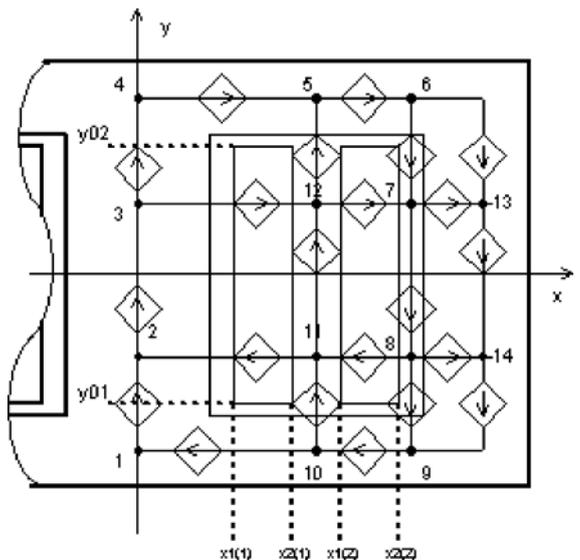


Рис. 12. Фрагмент конструкции однофазного трансформатора в разрезе. Указаны узлы магнитной цепи и управляемые источники МДС

ции. На магнитной системе указаны точки, которые следует использовать как узлы магнитной цепи. Между этими узлами показаны источники МДС, управляемые токами обмоток. Коэффициенты управления источников МДС, управляемых токами обмоток, вычисляются по изложенной методике.

Выводы

1. В режимах, близких к насыщению ферромагнитных элементов магнитопроводов, можно использовать понятие магнитной цепи, если ввести в магнитоэлектрическую схему замещения дополнительные ветви, замыкающие магнитные потоки рассеяния, в которые включаются управляемые источники МДС.

2. Коэффициенты управления распределенных источников МДС рекомендуется вычислять по изложенной методике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зиновкин, В. В.* Моделирование нестационарных электромагнитных процессов в неактивных деталях электротехнического оборудования / В. В. Зи-

новкин, М. Ю. Залужный // Вісник КДУ. – 2010. – № 3. – С. 65–69.
 2. *Вишняков, С. В.* Расчет электромагнитных полей с помощью программного комплекса ANSYS. Учебное пособие / С. В. Вишняков, Н. М. Гордюхина, Е. М. Федорова. – М.: МЭИ, 2004. – 63 с.
 3. COMSOL Multiphysics (Femlab). Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru/femlab>
 4. *Тиховод, С. М.* Система компьютерного моделирования динамических процессов в нелинейных магнитоэлектрических цепях / С. М. Тиховод // Технічна електродинаміка. – 2008. – № 3. – С. 16–23.
 5. *Шакиров, М. А.* Анализ неравномерности распределения магнитных нагрузок и потерь в трансформаторах на основе магнитоэлектрических схем замещения / Г. Н. Шакиров // Электричество. – 2005. – № 11. – С. 15–27.
 6. *Круг, К. А.* Основы электротехники: в 2-х т. Т. 1. Физические основы электротехники / К. А. Круг // М. Л.: Государственное энергетическое издательство. – 1946. – 472 с.

Стаття надійшла до редакції 25.01.2011.

Тиховод С. М., Власенко Е. В.

Комп’ютерне моделювання розподілених магніторушійних сил в магнітоелектричних схемах заміщення електротехнічних комплексів

При моделюванні перехідних процесів в магнітоелектричних схемах заміщення трансформаторів з метою обліку магнітних потоків розсіяння запропоновано в магнітне коло вводити додаткові гілки з керованими джерелами МДС. Коефіцієнти керування джерел МДС рекомендується обчислювати за викладеною методикою.

Ключові слова: моделювання, магнітоелектричні схеми заміщення, магнітні потоки розсіяння.

Tikhovod S. M., Vlasenko E. V.

Computer simulation of distributed magnetomotive forces in equivalent magnetoelectric circuits of electrotechnical complexes

When modeling transients in magnetoelectric equivalent circuits of transformers, it is proposed to include additional branches with controlled MMF sources into the magnetic circuit in order to allow for dispersion magnetic fluxes. It is recommended to calculate the control ratio of MMF sources according to the described procedure.

Key words: modeling, magnetoelectric equivalent circuits, dispersion magnetic fluxes.

УДК 612.315

О. Г. Волкова

Запорожский национальный технический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ОБРАЗОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПЛЕНОК НА КОНТАКТАХ МАСЛОНАПОЛНЕННЫХ КОММУТАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ

В данной статье исследовано образование поверхностных пленок на разрывных контактах коммутационных устройств. Показан механизм образования продуктов загрязнения в трансформаторном масле и динамика их осаждения на контактной системе.

Ключевые слова: контактор, трансформаторное масло, контакты, электрическая дуга.

Переходное электрическое сопротивление контактов, которое является основной причиной потерь энер-

гии при прохождении тока через контактное соединение, увеличивается со временем эксплуатации незави-

симо от рабочего состояния контактной системы и рабочей среды.

Целью данной статьи является уточнение механизма образования поверхностных пленок с ростом нагрузки коммутационных устройств.

При длительном воздействии рабочей среды и содержащихся в ней химических реагентов (сера, хлор и т. д.) на поверхностях контактов происходит образование толстых слоев окислов, сульфидов и других элементов. На процесс их нарастания существенно влияет температура контакта. Даже незначительное контактное сопротивление проявляется источником джоулевого тепла, под влиянием которого поверхности контактов более активно реагируют с рабочей средой. Это вызывает рост пленок, а, следовательно, и переходное сопротивление. Существуют имперические зависимости, описывающие эти явления, например [1]:

$$s^2 = 20^2 + t \cdot 10^{8,2 - \frac{1310}{T}}$$

где s – толщина пленки окислов на меди, Å; t – время, ч; T – температура медной поверхности, °К.

На контактных поверхностях образуется несколько видов химических соединений. Их основу составляют оксиды, органические соли, высокомолекулярные нерастворимые кислоты, сульфиды и другие вещества минерального и органического происхождения.

Многочисленные исследования [1, 2, 4] позволяют систематизировать поверхностные пленки по природе их происхождения: пленки потускнения (обычно оксидные или сульфидные); адгезионные пленки; пассивирующие пленки; граничные пленки смазок.

Надо отметить, что в научной и технической литературе содержатся разобщенные данные о степени влияния поверхностных пленок на переходное сопротивление [1–5]. Доказано, что все виды поверхностных пленок толщиной более $3 \cdot 10^{-9}$ м служат причиной роста переходного сопротивления на контактах и роль рабочей среды при этом является определяющей.

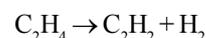
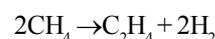
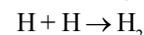
Однако считается, что переходное сопротивление контактов, погруженных в масло или смазанных маслом, меньше, чем у сухих контактов, так как масло способствует очистке поверхностей от загрязнения и пре-

пятствуют их окислению. По данным [3], медные и латунные контакты в трансформаторном масле почти не окисляются, но это не исключает образования пленок от продуктов загрязнения рабочей среды в процессе длительной эксплуатации.

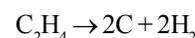
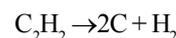
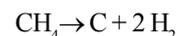
При эксплуатации маслonaполненных контакторов под действием электрической дуги происходит термическое разложение масла с образованием шлама углеродистых соединений и осаждение его на контактных поверхностях. При дуговых разрядах в масляной среде

происходят скачки температуры (свыше 3500°C) и давления (более 7 МПа). При этом электродуговые разряды в процессе коммутации сильно изменяют свойства масла, вызывая его деструктивное разложение с выделением углеводородных газов и механических примесей.

Термическое разложение масла начинается уже при температуре $350 - 450^\circ\text{C}$, а при 600°C основу газовых образований составляют метан CH_4 и водород H_2 . Диссоциация молекул масла происходит путем отрыва атомов водорода и метильных групп CH_3 . Появившиеся несвязанные атомы Н и группы CH_3 , как и их производные, при росте температуры до 1300°C начинают вступать в реакции между собой с образованием водорода H_2 , ацетилена C_2H_2 , метана CH_4 , этилена C_2H_4 .



Дальнейший рост температуры приводит к выделению из газовой смеси механических примесей в виде частиц сажи:



Одновременно с ростом числа сажевых частиц происходит их объединение в цепочки длиной примерно 10 мкм. Картина роста образовавшихся частиц загрязнения в трансформаторном масле приведена на рис. 1.

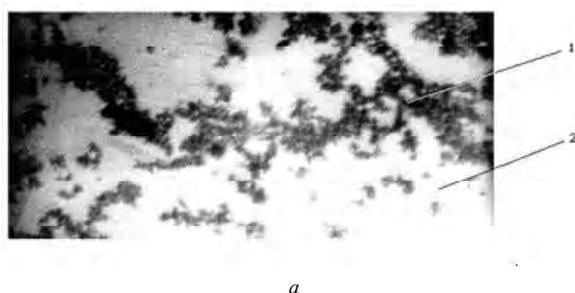


Рис. 1. Продукты термического разложения трансформаторного масла (х 200) а – при 10 тыс. переключений, б – при 15 тыс. переключений: 1 – сажевые цепочки, 2 – трансформаторное масло

На основании фотометрического подсчета количества механических примесей получены данные роста осадка от числа электротермических дуговых разрядов в баке контактора.

Исследования проводились с пробами трансформаторного масла, отобранными из действующих контакторов электропечных трансформаторов на Запорожском алюминиевом заводе и заводе «Днепроспецсталь». Число переключений для различных проб масла составляло от 1000 до 30000 циклов (номинальный ток 150 А, номинальное напряжение обмоток на стороне НН в пределах 394–194 В). Обобщенные результаты гранулометрического состава и подсчет количества частиц в отобранных пробах трансформаторного масла в зависимости от числа коммутаций представлены в табл. 1.

По данным, приведенным в табл. 1, построен график роста загрязнения трансформаторного масла в зависимости от числа переключений (рис. 2).

Анализ полученных результатов показывает, что с увеличением количества переключений общее число частиц загрязнений в масле возрастает, стремясь к некоторому пределу. Особенно заметен этот рост во вре-

мя первых 10 тыс. циклов переключений за счет увеличения числа мелких (от 1 до 5 мкм) частиц. Стабилизация числа частиц загрязнения в масле наступает примерно через 15 тыс. переключений, что объясняется процессом коагуляции и осаждения сажевых хлопьев (выпадение хлопьев уравнивается числом вновь образовавшихся частиц).

Полученный график наглядно представляет механизм образования осадка сажевых частиц на контактных поверхностях как функцию наработки контактора.

Проведенный анализ процесса загрязнения контактной системы продуктами разложения в маслonaполненных коммутационных аппаратах показывает, что интенсивное образование осадка на контактных поверхностях начинается только после достижения определенного числа переключений контактов, что способно привести к резкому росту переходного сопротивления.

Выводы

Интенсивное образование поверхностных пленок на контактных поверхностях маслonaполненных коммутационных устройств наступает после определённого числа циклов переключений. Для разных коммутационных устройств это число может иметь различные значения в зависимости от его мощности и типа. Однако, учитывая общий характер среды (трансформаторное масло) и длительность горения дуги (ограничения по нормативным требованиям), автор считает, что его значение может находиться в пределах 13–17 тыс. переключений. Это число можно принять за срок службы трансформаторного масла в баковых коммутационных устройствах.

Таблица 1 – Гранулометрический и численный состав загрязнений в пробах трансформаторного масла

Число переключений, тыс.	Размеры частиц, мкм / Логарифм (lg) числа частиц				
	1–5	5–7	7–10	10–14	14–25
5	45–50	30–35	30–35	28–32	19–23
10	53–57	40–44	40–44	37–41	37–33
15	58–62	44–48	40–45	36–41	28–32
20	58–62	47–51	42–46	30–35	24–29

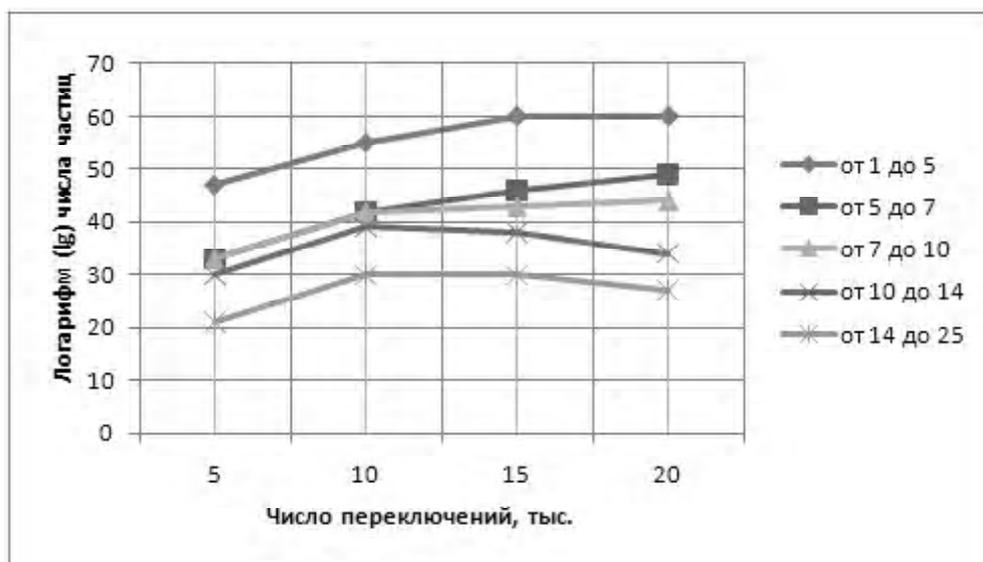


Рис. 2. График зависимости роста загрязнения трансформаторного масла механическими примесями от числа переключений

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Wilson, W.R.* High current arc erosion of electric contacts materials / W.R. Wilson // Trans. AIEE. – 1955. – Vol. 74. – PP. 657–663.
2. *Braunovic, M.* Electrical contacts: fundamentals, applications and technology / M. Braunovic, N.K. Myshkin, V.V. Konchits. – New York : CRC Press. – 2007. – P. 646.
3. *Порудоминский, В. В.* Устройства переключения трансформаторов под нагрузкой / В. В. Порудоминский. – М. : Энергия, 1974. – 288 с.
4. Соединители и коммутационные устройства / [Бондаренко И. Б., Гатчик Ю. А., Иванова Н. Ю., Шилкин Д. А.]. – СПб. : СПбГУ ИТМО, 2007. – 151 с.
5. *Липштейн, Р. А.* Трансформаторное масло / Р. А. Липштейн, М. И. Шахнович. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 296 с.

Стаття надійшла до редакції 10.02.2011.

Після доробки 22.03.2011.

Волкова О. Г.

Дослідження механізму утворення поверхневих плівок на контактах маслонаповнених комутаційних пристроїв

У даній статті досліджено процес утворення поверхневих плівок на розривних контактах комутаційних пристроїв. Показано механізм процесу утворення продуктів забруднення у трансформаторній олії та динаміка утворення їх осаду на контактній системі.

Ключові слова: контактор, трансформаторна олія, контакти, електрична дуга.

Volkova O.G.

Investigation of formation mechanism of surface film on contacts of oil-filled switching devices

Surface films formation on contacts of switching devices is investigated. The mechanism of contamination products formation in transformer oil and dynamics of their precipitation on the contact system is described.

Keywords: contactor; transformer oil, contacts, electric arc.

УДК 621.316.53:621.382.233

А. В. Близняков канд. техн. наук, В. Л. Миронченко канд. техн. наук

Запорожский национальный технический университет

АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ ТЕМНИТЕЛЕЙ СВЕТА

Выполнен анализ и синтез системы управления регулятора напряжения для темнителей света на запираемых тиристорах. Представлен пример схемной реализации системы управления.

Ключевые слова: анализ, синтез, регулятор напряжения, система управления, запираемые тиристоры, управляющий импульс.

Тиристорные регуляторы напряжения находят широкое применение в качестве регуляторов освещения жилых и производственных помещений [1], а также в качестве регуляторов освещения в театрах, в том числе и для темнителей света [2]. При этом регуляторы для темнителей света имеют преимущественно ручное управление. Следует отметить, что регуляторы, построенные на обычных тиристорах, отпираемых в произвольный момент времени и запираемых в нуле питающего напряжения, характеризуются относительно низким (порядка 0,5...0,8) коэффициентом мощности [1].

Его повышения можно добиться за счет регулятора с коэффициентом мощности емкостного характера. Наибольший эффект при этом достигается в том случае, если система управления регулятора обеспечивает включение тиристоров в нуле питающего напряжения, а запираение – в произвольный момент времени относительно полуволны питающего напряжения в зависимости от требуемой мощности.

Целью данного исследования является синтез системы управления регулятора для темнителей света, силовой элементной базой которого являются запираемые

тиристоры [3–5]. Основной его отличительной особенностью является оптимизированный алгоритм работы.

В работах [6–8] рассмотрены функциональные схемы систем фазового управления запираемыми тиристорами. Однако анализ представленных схем показал, что они синтезированы без проведения минимизации логической цепочки алгоритма работы системы управления. Поэтому разработанные схемы содержат излишние звенья, что в конечном итоге привело к их усложнению и снижению надежности в эксплуатации. В последнее время разрабатываются системы управления тиристорами различных видов с использованием программируемых контроллеров и микропроцессоров [9, 10].

Алгоритм работы и, соответственно, синтез рассматриваемой системы управления осуществляются с учетом использования цифровых микросхем серии К561. При наличии в синтезируемой схеме только одного управляющего сигнала такое решение будет наиболее целесообразным. Применение программируемых контроллеров и микропроцессорных систем управления может несколько упростить конструкцию печатной платы. Однако система управления в этом случае будет на порядок дороже и не обеспечит, безусловно, положительные качества микропроцессоров и микроконтроллеров, которые обычно проявляются при наличии больших массивов входных и выходных величин.

На первом этапе синтез системы управления осуществляется методом функционального наращивания [11], на основе которого составлена функциональная схема системы управления, представленная на рис. 1. Поскольку запираемые тиристоры открываются в нуле синусоиды питающего напряжения, т.е. при угле управления $\alpha = 0^\circ$, а запираются при угле запираения

$180^\circ > \beta > 0^\circ$, то система управления содержит узел синхронизации СУ и фазосдвигающее устройство в цифровом исполнении, т.е. счетчик СТ и генератор тактовых импульсов G. Для защиты тиристоров от сверхтоков, в том числе коротких замыканий, схема содержит блок токовой защиты БТЗ с элементом памяти, например, RS-триггер. При этом в момент возникновения токовой перегрузки на одном из выходов триггера формируется логический нуль, что исключает формирование управляющих импульсов, подаваемых на тиристоры, в нуле питающего напряжения, а на втором выходе формируется логическая единица, которая формирует импульс на запираение тиристора. В этой связи схема содержит элемент «ИЛИ», пять комбинационных схем КС1...КС5 в виде элементов «И», а также конечный автомат с памятью КА и выходные узлы ВУ1 и ВУ2.

Комбинационная схема КС1 является формирователем широких импульсов длительностью 180 эл. град. и служит для запуска генератора в начале каждой полуволны питающего синусоидального напряжения и формирования узких импульсов (длительностью порядка 10–15 мкс) для обнуления счетчика. Этим достигается высокая симметрия управляющих (запирающих) импульсов тиристоров VS1 и VS2. Их отпирание происходит при нуле напряжения, а запираение – сигналом b при заполнении счетчика СТ. При перегрузке или коротком замыкании на прямом выходе Q_1 триггера Т1 формируется логическая единица, которая формирует импульс на запираение тиристора, а на его инверсном выходе формируется логический нуль, который запрещает формирование импульсов на отпирание. Следует подчеркнуть, что запираемые тиристоры должны обладать симметричной характеристикой, чтобы исключить появление в сети постоянной составляющей тока.

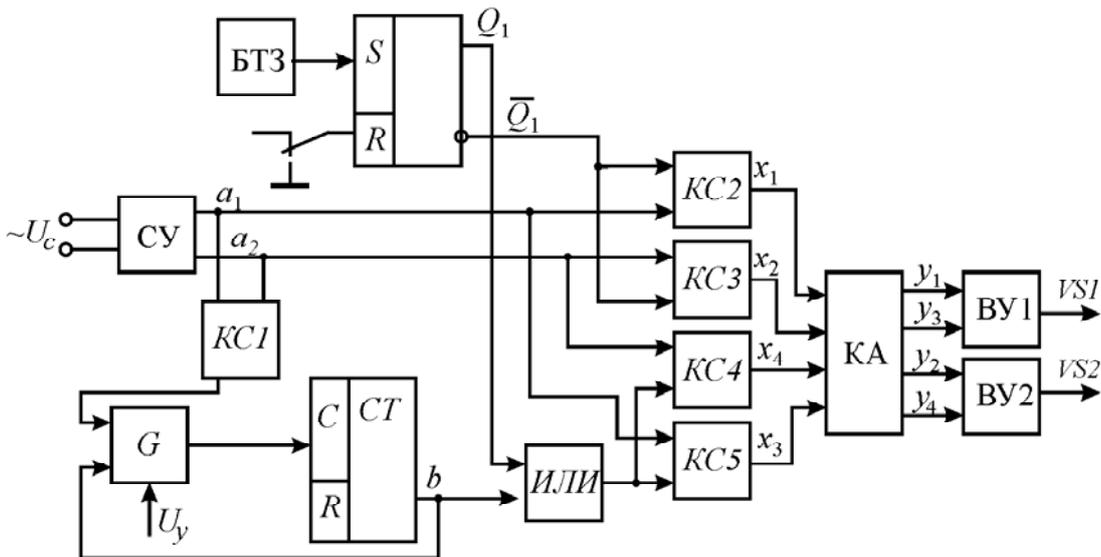


Рис. 1. Функциональная схема синтезируемой системы управления

Таким образом, синтезируемая система управления (цифровой автомат) должна формировать следующие выходные сигналы:

– y_1 и y_3 – сигналы на отпирание и запираение тиристора VS1;

– y_2 и y_4 – сигналы на отпирание и запираение тиристора VS2.

Входными сигналами автомата являются

– x_1 и x_2 – сигналы, формируемые в момент нуля напряжения;

– x_3 и x_4 – сигналы, формируемые при заполнении счетчика,

$$\text{где } x_1 = a_1 \bar{Q}_1 ; x_2 = a_2 \bar{Q}_1 ; x_3 = (b \vee Q_1) a_1 ; x_4 = (b \vee Q_1) a_2 , \quad (1)$$

где a_1, a_2 – выходные сигналы узла синхронизации; b – сигнал на выходе счетчика при его заполнении.

Синтез автомата с памятью производится с использованием канонического метода синтеза автоматов [12, 13]. Вначале составляется граф состояний синтезируемого автомата, рис. 2. При этом синтезируемый автомат имеет следующие состояния:

– c_1 – включен и проводит ток тиристор VS1;

– c_2 – тиристор VS1 отключен и ток нагрузки равен нулю;

– c_3 – включен и проводит ток тиристор VS2;

– c_4 – тиристор VS2 отключен и ток нагрузки равен нулю.

Очевидно, что при работе автомата должен соблюдаться вполне определенный алгоритм, т.е. смена состояний должна осуществляться в следующем порядке: $c_1 - c_2 - c_3 - c_4 - c_1$ и т.д. Кодирование состояний автомата производится с использованием соседнего кодирования: $c_1 - 00; c_2 - 01; c_3 - 11; c_4 - 10$. Требуемое число элементов памяти определяется исходя из числа состояний [12]:

$$p = \lceil \log_2 N \rceil = 2 , \quad (2)$$

где N – число состояний, равное 4.

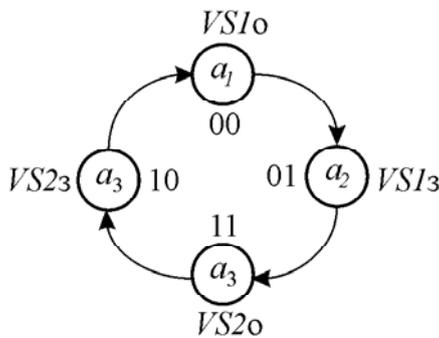


Рис. 2. Граф состояний синтезируемого автомата

В качестве элементов памяти в данном случае целесообразно использование двух RS-триггеров (один корпус микросхемы K561TM2).

На основании полученных данных составляется совмещенная таблица переходов и выходов автомата, табл. 1 и, соответственно, булевы выражения для выходных сигналов:

$$y_1 = x_1 \bar{Q}_2 \bar{Q}_3 ; \quad (3)$$

$$y_2 = x_2 \bar{Q}_2 Q_3 ; \quad (4)$$

$$y_3 = x_3 \bar{Q}_2 \bar{Q}_3 ; \quad (5)$$

$$y_4 = x_4 Q_2 Q_3 . \quad (6)$$

Функции возбуждения могут быть получены на основе следующих соображений. Например, чтобы переключить триггер T3 из состояния \bar{Q}_3 в состояние Q_3 , необходимо подать сигнал на S-вход этого триггера, т.е. $S_3 = x_2$, а для того, чтобы переключить его из состояния Q_3 в состояние \bar{Q}_3 , необходимо подать в соответствии с выражением (3) на его R-вход сигнал x_1 , т.е. $R_3 = x_1$ и т.д. Таким образом,

$$S_2 = x_4 , R_2 = x_3 , S_3 = x_2 , R_3 = x_1 . \quad (7)$$

Комбинационная схема KC1 может быть реализована с помощью двух элементов «И-НЕ», аналогично KC2...KC5. Элемент «ИЛИ» (см. рис. 1) реализуется на элементах «И-НЕ»; $b \vee Q_1 = \overline{\bar{b} \cdot \bar{Q}_1}$.

На рис. 3 показана схема конечного автомата, а на рис. 4 – полная принципиальная схема регулятора. Анализ работы синтезированного автомата иллюстрируется временными диаграммами, рис. 5. При включении питания с помощью пусковой схемы R7–C2 (см. рис. 4) триггеры устанавливаются в состояния $\bar{Q}_1 = 1; Q_2 = 1; \bar{Q}_3 = 1$, а счетчики обнуляются. С приходом сигнала $x_1(a_1)$ отпирается тиристор VS1, а с приходом сигнала x_3 тиристор VS1 запирается. Далее

Таблица 1 – Совмещенная таблица переходов и выходов автомата

c_i	$Q_2 Q_3$	x_1	x_2	x_3	x_4
c_1	00	00	00	$01/y_3$	0
c_2	01	01	$11/y_2$	01	01
c_3	11	11	11	11	$10/y_4$
c_4	10	$00/y_1$	10	10	10

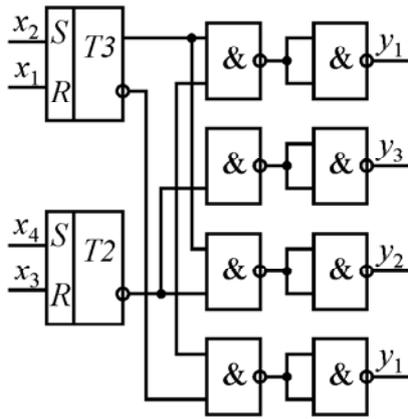


Рис. 3. Структурная схема конечного автомата

с приходом сигнала $x_2(a_2)$ отпирается тиристор VS2, а с приходом сигнала x_4 он запирается. Таким образом, проведенный анализ показывает, что переходы, указанные в словесном описании, выполняются.

В научно-техническом плане новым в данной схеме (см. рис. 4) является применение схемы выходного узла, построенного на маломощных тиристорах, запирающие которых осуществляется приложением к цепи управления обратного напряжения при разряде накопительных конденсаторов [8]. Данный узел построен на маломощных тиристорах VS3, VS4 (VS5, VS6) и накопительных конденсаторах C7 (C8), диодах VD18 (VD19) и резисторах R24, R26 (R29, R31). При разряде конденсатора C7 (C8) к цепи управления тиристора прикладывается обратное напряжение, и он запирается.

При подаче питания с помощью пусковой схемы C2–R7 обнуляется счетчик и триггеры устанавливаются в положение $\bar{Q}_1 = 1; Q_2 = 1; \bar{Q}_3 = 1$. С приходом управляющего импульса $x_1 = a_1 \bar{Q}_1$ кратковременным импульсом $z_1 = y_1 \bar{t}$ отпирается тиристор VS6 и ток заряда конденсатора C8 формирует управляющий импульс на отпирание тиристора VS1. При заполнении

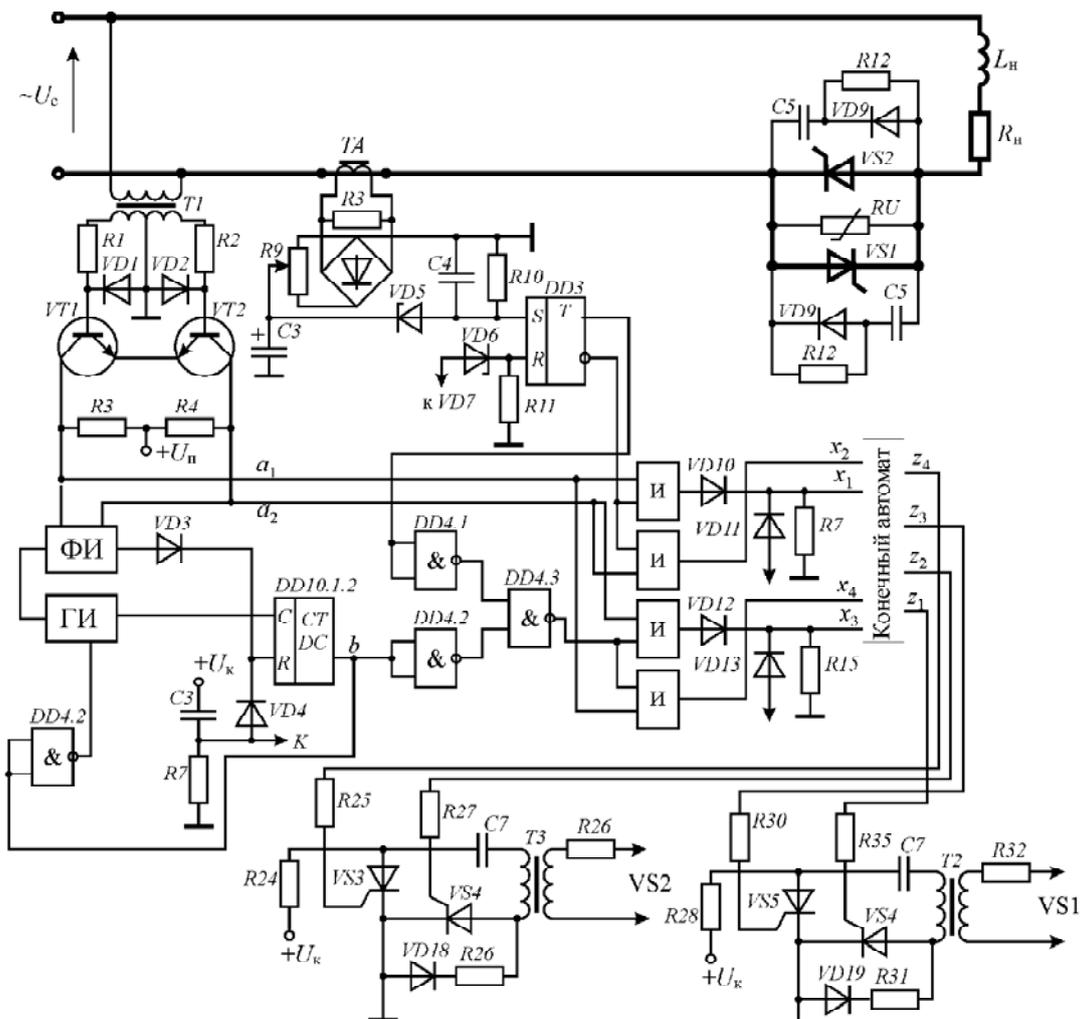


Рис. 4. Принципиальная схема регулятора на запираемых тиристорах

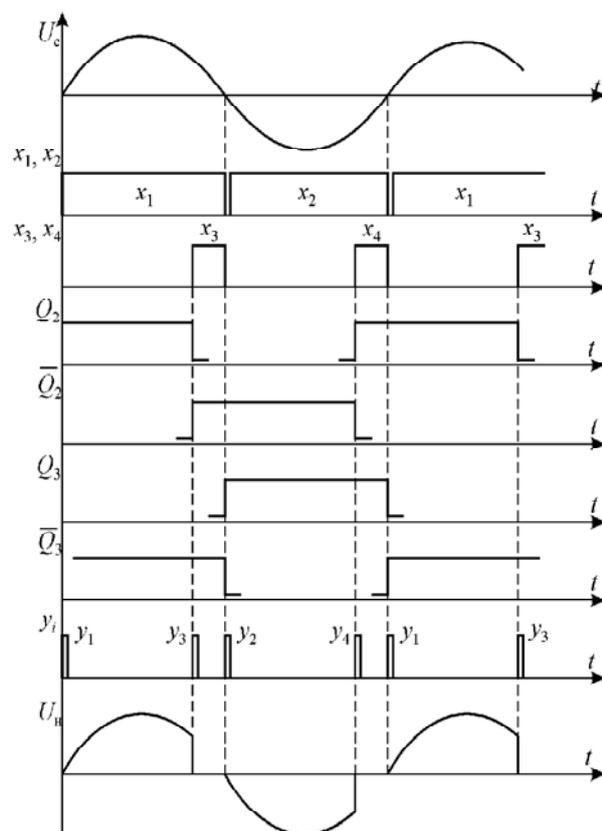


Рис. 5. Временные диаграммы работы синтезируемого устройства

счетчика СТ (два последовательно соединенных счетчика-дешифратора К561ИЕ8 общей емкостью $N=100$) формируется импульс x_3 , переключающий триггер Т2 в состояние $\bar{Q}_2 = 1$. Кратковременным импульсом $z_3 = y_3 \bar{t}$ отпирается тиристор VS5, и конденсатор C8 разряжается по цепи C8–VS5–VD19–R27 – обмотка трансформатора T2 – C8. При этом во вторичной цепи T2 формируется импульс обратной полярности, запирающий тиристор VS1. Отпирание и запираение тиристора VS2 происходит аналогично. Применение такой схемы выходного узла позволяет гальванически развязать цепи управления от токовой цепи. Расчет емкости накопительных конденсаторов C7 (C8) может быть произведен на основе рекомендаций [13].

Для защиты тиристоров от пробоя при запираении может быть применена демпфирующая цепь R12, VD8, C5 (R13, VD9, C6) (см. рис. 4). Ее применение позволяет облегчить процесс запираения тиристора, поскольку обеспечивается временной сдвиг между спадом тока в цепи и нарастанием напряжения на тиристоре. Отсутствие указанной цепи, как правило, приводит к потере свойств запираемого тиристора. Защита тиристоров от внешних перенапряжений осуществляется с помощью варистора RU (см. рис. 4).

Многочисленные исследования подтвердили надежность запираемых тиристоров при наличии демпфирующей цепи [15].

Выводы

1. Проведенные исследования, а также теоретические предпосылки позволяют установить, что применение регулятора на запираемых тиристорах повышает общий коэффициент мощности потребителей, работающих параллельно с регулятором.

2. Анализ работы системы управления по временным диаграммам показывает, что перечисленные выше условия в отношении алгоритма ее работы выполняются.

3. Применение схемы выходного узла на маломощных тиристорах с коммутирующим конденсатором обеспечивает надежное отпирание и запираение тиристоров, что подтверждено многочисленными исследованиями на лабораторной установке [15]. При этом создается гальваническая развязка между цепью управления и силовой цепью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шкап, Л. Ц. Театральные регуляторы напряжения / Л. Ц. Шкап, В. А. Забродин – М. : Энергия, 1998. – 88 с.
2. Кунгс, Я. А. Автоматизация управления электрическим освещением / Кунгс Я. А. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 112 с.
3. Запираемые тиристоры: Быстродействующие диоды: [каталог ABB Semiconductors AG]. – [Москва, 1999]. – 174 с.
4. Супронович, Г. Улучшение коэффициента мощности преобразовательных установок / Супронович Г. [перев. с польск.]. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 136 с.
5. Сокол, Е. И. Повышение коэффициента мощности бестрансформаторного трехфазного тиристорного преобразователя напряжения с комбинированным управлением / Е. И. Сокол, И. П. Архиреев, А. В. Кипенский, Е. И. Король // Технічна електродинаміка. – Київ, 2001. – тем. випуск «Силова електроніка та енергоефективність», ч. 2.
6. Переверзев, А. В. Электротехнические характеристики формирователя импульсов управления для запираемого тиристора / А. В. Переверзев, А. Г. Алексеев, О. В. Василенко // Электротехніка та електроенергетика. – 2003. – № 1. – С. 24–28.
7. Булатов, О. Г. Формирователи импульсов управления двухоперационными тиристорами / О. Г. Булатов, О. В. Жеглов // Электротехніка. – 1996. – № 1. – С. 44–50.
8. Миронченко, В. Л. Анализ и синтез системы управления регулятора на запираемых тиристорах / В. Л. Миронченко, А. В. Близняков // Электротехніка та електроенергетика. – 2003. – № 1. – С. 79–81.
9. Король, Е. И. Тиристорный преобразователь мощности с цифровым управлением для регулирования

- ня температури награвельної губки станка. / Е. І. Король // Вісник Національного технічного університету «ХПІ»: збірник наукових праць. – Харків: НТУ «ХПІ», 2002 – тем. випуск Мікропроцесорні системи імпульсного управління.
10. Сокол, Е. І., Электропривод постоянного тока с микропроцессорной прогнозирующей системой управления / Е. І. Сокол, А. В. Кипенский, А. А. Лашин, Н. Н. Орехова // Вісник Національного технічного університету «ХПІ»: збірник наукових праць. – Харків: НТУ «ХПІ», 2002 – тем. випуск Мікропроцесорні системи імпульсного управління.
11. Полковський, І. М. Схемотехніка мікроелектронної апаратури / І. М. Полковський, В. П. Стыцько, Ю. Е. Рудберг. – М.: Радио и связь, 1981. – 320 с.
12. Прикладная теория цифровых автоматов / [под ред. К. Г. Самофалова]. – К.: Вища школа, 1987. – 375 с.
13. Новиков, Ю. В. Основы цифровой схемотехники: Базовые элементы и схемы. Методы проектирования / Ю. В. Новиков. – М.: Мир, 2001. – 379 с.
14. Грехов, И. В. Тиристоры, выключаемые током управления / И. В. Грехов, И. А. Линийчук. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 96 с.
15. Сравнительный анализ ключевых схем на транзисторах и запираемых тиристорах / В. П. Безручко, До-Чинь, В. Л. Миронченко [и др.] // Известия вузов. Электромеханика. – 1989 – № 11 – С. 111–113.

Стаття надійшла до редакції 15.02.2011.

Після доробки 22.03.2011.

Близняков О. В., Миронченко В. Л.

Аналіз та синтез системи керування регулятора для затемнювачів світла

Виконано аналіз і синтез системи керування регулятора напруги для затемнювачів світла на запираних тиристорах. Надано приклад схемної реалізації системи керування.

Ключові слова: аналіз, синтез, регулятор напруги, система керування, запирані тиристори, керуючий імпульс.

Bliznyakov O. V., Mironchenko V. L.

Analysis and synthesis of regulator control system for dimmers

Analysis and synthesis of the gate-controlled thyristor-based voltage regulator control system for dimmers has been performed. Example of a control system circuit is represented.

Key words: analysis, synthesis, voltage regulator, control system, gate-controlled thyristors, control pulse.

УДК 681.5.013

С. О. Бур'ян, В. Ю. Ворощенко, С. В. Король, О. Ю. Савич, С. А. Смірнов

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

АВТОМАТИЗАЦІЯ ФОРМУВАННЯ ТРАЄКТОРІЙ ПРИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМУ ДОСЛІДЖЕННІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

У статті запропоновано пристрій для автоматизації формування траєкторій при експериментальному дослідженні електромеханічних систем. Траєкторії формуються за допомогою логічного програмованого контролера, що підключений до промислового перетворювача частоти. Представлено результати досліджень для різних типів траєкторій.

Ключові слова: логічний програмований контролер, автоматизація, траєкторія руху, синтез.

Вступ. Експериментальні дослідження електромеханічних систем часто складаються з великої кількості серій тестів, які виконуються для різного типу задаючих і збурюючих дій. Для аналізу і систематизації отриманих експериментальних даних усі тести з одним типом заданих траєкторій повинні мати ідентичні характерні ділянки (розгін, гальмування, накидання моменту). От-

римання однотипних експериментальних даних при дослідженні електромеханічних систем в режимі відпрацювання ступінчастих ліфтових траєкторій або траєкторій з реверсом можливе тільки при використанні програмованого задавального пристрою. Для цього можуть використовуватися спеціальні пристрої: персональний комп'ютер з платою, що реалізує дискретні входи/вихо-

ди, інтерфейс зв'язку з комп'ютером, спеціально розроблений пристрій на основі мікроконтролера з блоком узгодження рівнів сигналів і програмно-апаратним комплексом для програмування, чи система на основі програмованого логічного контролера (ПЛК)[1].

Перші два варіанти вимагають значних витрат на реалізацію як апаратної частини (розробка або придбання необхідних пристроїв), так і програмної (вивчення відповідної мови програмування, написання програми, що реалізує алгоритм роботи і керування апаратною частиною системи).

Реалізація на основі ПЛК дозволяє створити найбільш надійну і дешеву систему із зручним і простим інтерфейсом програмування за рахунок використання серійного контролера із вбудованою операційною системою, яка реалізує усі апаратно залежні і системні функції [2].

Мета роботи. Розробити універсальну установку для автоматизації експериментальних досліджень електромеханічних систем з можливістю формування основних типових траєкторій з різною інтенсивністю розгону і сповільнення двигуна.

Синтез траєкторії точного позиціонування. Важливим етапом в програмуванні логічних контролерів є отримання логічних рівнянь, що описують умови роботи даної системи. За цими рівняннями можна складати програми для контролерів будь-якого типу. Існують різні методи синтезу, але в тому випадку, коли умови роботи системи мають майже лінійний характер, оптимальним є використання методу синтезу на тригерах [3].

Умови роботи системи задаються у вигляді траєкторії руху, представленої на рис. 1, де T_1 – час розгону до усталеної швидкості, T_2 , T_4 – час роботи на усталеній швидкості, T_3 , T_5 – час сповільнення. На проміжках 2–3 та 4–5 час сповільнення однаковий. Схема

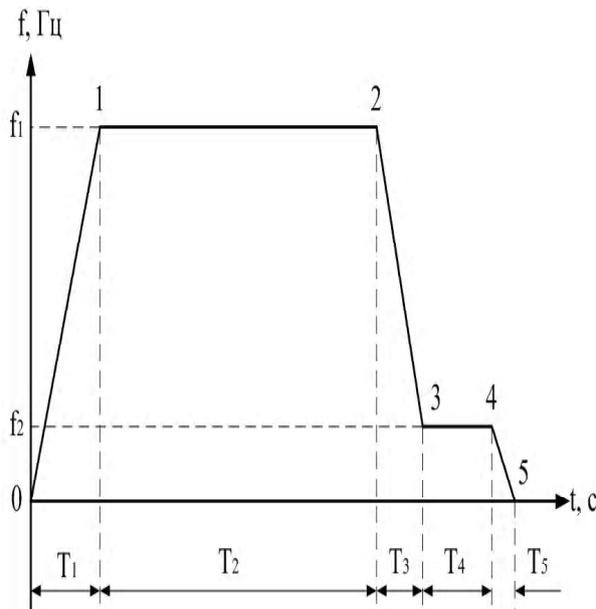


Рис. 1. Задана траєкторія руху

повинна передбачати аварійну зупинку в будь-якому стані і повернення у вихідний стан [2].

Реалізуємо дану трапецію методом синтезу на тригерах [3, 4]. Кількість вершин графа при синтезі асинхронних схем на RS-тригерах визначають з умови

$2^n \geq S$, де S – кількість станів схеми; 2^n – кількість вершин графа; n – кількість тригерів. Оскільки в схемі 10 станів, то для синтезу необхідні мінімум 4 тригери. Умови роботи схеми подаються у вигляді графічного зображення послідовності роботи багатотактної схеми – графа переходів. Для того, щоб запустити схему, необхідно натиснути кнопку a , а потім її відпустити. За умови роботи також має спрацювати аварійна зупинка при натисненні кнопки c у будь-якому стані. Тому для реалізації умов роботи схеми вибрано оптимальний маршрут переходів між вершинами, граф переходу якого показаний на рис. 2. Для переходу між вільними вершинами використовуються одиничні переходи.

Введемо такі позначення вхідних і вихідних сигналів, а також сигналів таймерів, які необхідно розглядати як вхідні сигнали для графа переходів. Вхідні сигнали: a – команда «Пуск»; c – аварійна зупинка, $T_1 - T_5$ – сигнали таймерів, що дають затримки $\Delta t_1 - \Delta t_5$. Вихідні сигнали: f_1 – команда «дозволу роботи», f_2 – команда на розгін, f_3 – команда на сповільнення.

Синтез схеми полягає у записі умов вмикання і скидання кожного тригера. Умови вмикання тригера S_p записуються у вигляді добутку сигналу на ребрі, що заходить в область, і сигналів решти тригерів, стан яких не змінюється при переході, позначеному ребром. Умова скидання тригера R_p записується аналогічно для кожного ребра, що виходить з даної області. На основі

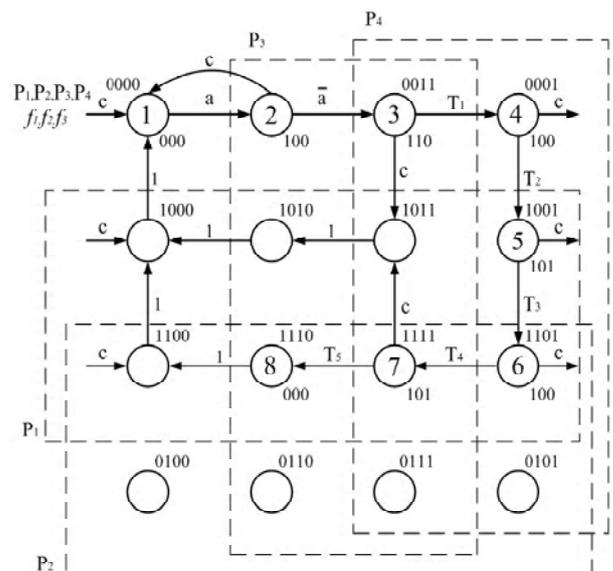


Рис. 2. Граф переходів

цих правил записуємо умови вмикання і скидання для всіх чотирьох тригерів:

$$S_{P_1} = T_2 \bar{p}_2 \bar{p}_3 p_4 + c \bar{p}_2 p_3 p_4; \quad (1)$$

$$R_{P_1} = \bar{p}_2 \bar{p}_3 \bar{p}_4; \quad (2)$$

$$S_{P_2} = T_3 p_1 \bar{p}_3 p_4; \quad (3)$$

$$R_{P_2} = p_1 \bar{p}_3 \bar{p}_4 + c p_1 p_3 p_4; \quad (4)$$

$$S_{P_3} = a \bar{p}_1 \bar{p}_2 \bar{p}_4 + T_4 p_1 p_2 p_4; \quad (5)$$

$$R_{P_3} = T_1 \bar{p}_1 \bar{p}_2 p_4 + p_1 p_2 \bar{p}_4 + c \bar{p}_1 \bar{p}_2 \bar{p}_4 + p_1 \bar{p}_2 \bar{p}_4; \quad (6)$$

$$S_{P_4} = \bar{a} \bar{p}_1 \bar{p}_2 p_3; \quad (7)$$

$$R_{P_4} = T_5 p_1 p_2 p_3 + p_1 \bar{p}_2 p_3 + c \bar{p}_1 \bar{p}_2 \bar{p}_3 + c p_1 \bar{p}_2 \bar{p}_3 + c p_1 p_2 \bar{p}_3; \quad (8)$$

Запишемо рівняння для таймерів:

$$T_1 = \bar{p}_1 \bar{p}_2 p_3 p_4; \quad (9)$$

$$T_2 = \bar{p}_1 \bar{p}_2 \bar{p}_3 p_4; \quad (10)$$

$$T_3 = p_1 \bar{p}_2 \bar{p}_3 p_4; \quad (11)$$

$$T_4 = p_1 p_2 \bar{p}_3 p_4; \quad (12)$$

$$T_5 = p_1 p_2 p_3 p_4; \quad (13)$$

Формули для вихідних сигналів f_1, f_2, f_3 записуються як комбінаційні функції вихідних сигналів тригерів P_1, P_2, P_3 та P_4

$$f_1 = \bar{p}_1 \bar{p}_2 p_3 \bar{p}_4 + \bar{p}_1 \bar{p}_2 p_3 p_4 + \bar{p}_1 \bar{p}_2 \bar{p}_3 p_4 + p_1 \bar{p}_2 \bar{p}_3 p_4 + p_1 p_2 \bar{p}_3 p_4 + p_1 p_2 p_3 p_4 = \bar{p}_1 \bar{p}_2 p_3 + p_1 p_2 p_4 + \bar{p}_2 \bar{p}_3 p_4; \quad (14)$$

$$f_2 = \bar{p}_1 \bar{p}_2 p_3 p_4; \quad (15)$$

$$f_3 = p_1 \bar{p}_2 \bar{p}_3 p_4 + p_1 p_2 p_3 p_4. \quad (16)$$

Синтез траєкторії з реверсом. Умови роботи системи задаються у вигляді траєкторії руху, представленій на рис. 3, де T6, T11 – час розгону до усталеної швидкості, T7, T9, T12 – час роботи на усталеній швидкості, T8 – час роботи під навантаженням, T10, T13 – час сповільнення. Схема повинна передбачати аварійну зупинку в будь-якому стані.

Дана траєкторія реалізована аналогічно попередній методом синтезу на тригерах [1, 2]. Граф переходів з оптимальним маршрутом показаний на рис. 4.

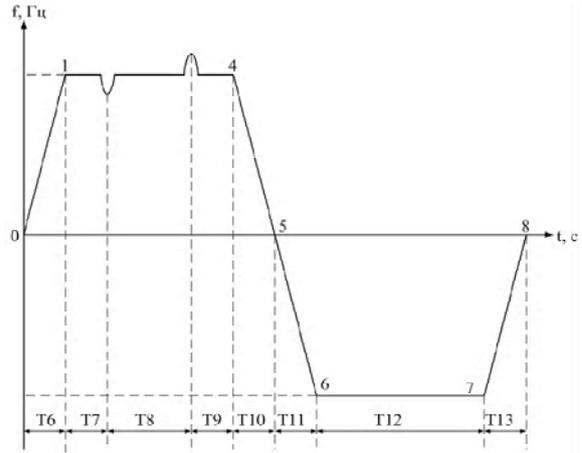


Рис. 3. Задана траєкторія руху

Введемо такі позначення вхідних і вихідних сигналів, а також сигналів таймерів, які необхідно розглядати як вхідні сигнали для графа переходів. Вхідні сигнали: a – команда «Пуск»; c – аварійна зупинка, T1 – T5 – сигнали таймерів, що дають затримки $\Delta t_1 - \Delta t_5$. Вихідні сигнали: f_1 – команда «дозволу роботи», f_2 – команда для реверсу, f_3 – команда на розгін, f_4 – команда на сповільнення, f_5 – команда накидання моменту навантаження.

Рівняння для вмикання і скидання тригерів матимуть такий вигляд:

$$S_{P_1} = T_7 \bar{p}_2 \bar{p}_3 p_4 + c \bar{p}_2 p_3 p_4 + T_{11} p_2 p_3 p_4 + p_2 \bar{p}_3 \bar{p}_4; \quad (17)$$

$$R_{P_1} = T_9 p_2 \bar{p}_3 p_4 + \bar{p}_2 \bar{p}_3 \bar{p}_4; \quad (18)$$

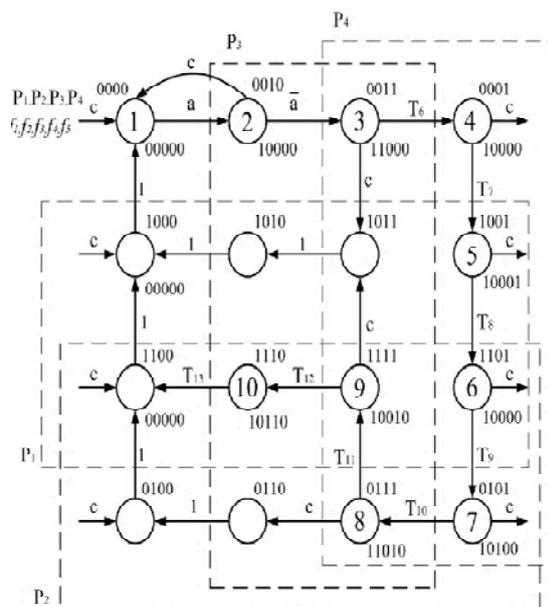


Рис. 4. Граф переходів

$$S_{p_2} = T_8 p_1 \bar{p}_3 p_4 ; \quad (19)$$

$$R_{p_2} = p_1 \bar{p}_3 \bar{p}_4 + c p_1 p_3 p_4 + c p_1 p_3 \bar{p}_4 ; \quad (20)$$

$$S_{p_3} = a \bar{p}_1 \bar{p}_2 \bar{p}_4 + T_{10} \bar{p}_1 p_2 p_4 ; \quad (21)$$

$$R_{p_3} = c \bar{p}_1 \bar{p}_2 \bar{p}_4 + T_6 \bar{p}_1 \bar{p}_2 p_4 + \bar{p}_1 p_2 \bar{p}_4 + ; \\ + T_{13} p_1 p_2 \bar{p}_4 + p_1 \bar{p}_2 \bar{p}_4 ; \quad (22)$$

$$S_{p_4} = a \bar{p}_1 \bar{p}_2 p_3 ; \quad (23)$$

$$R_{p_4} = T_{12} p_1 p_2 p_3 + p_1 \bar{p}_2 p_3 + c \bar{p}_1 \bar{p}_2 \bar{p}_3 + \\ + c p_1 \bar{p}_2 \bar{p}_3 + c p_1 p_2 \bar{p}_3 + c \bar{p}_1 p_2 \bar{p}_3 + c \bar{p}_1 p_2 p_3 . \quad (24)$$

Запишемо рівняння для таймерів

$$T_6 = \bar{p}_1 \bar{p}_2 p_3 p_4 ; \quad (25)$$

$$T_7 = \bar{p}_1 \bar{p}_2 \bar{p}_3 p_4 ; \quad (26)$$

$$T_8 = p_1 \bar{p}_2 \bar{p}_3 p_4 ; \quad (27)$$

$$T_9 = p_1 p_2 \bar{p}_3 p_4 ; \quad (28)$$

$$T_{10} = \bar{p}_1 p_2 \bar{p}_3 p_4 ; \quad (29)$$

$$T_{11} = \bar{p}_1 p_2 p_3 p_4 ; \quad (30)$$

$$T_{12} = p_1 p_2 p_3 p_4 ; \quad (31)$$

Формули для вихідних сигналів $f_1, f_2, f_3, f_4, i, f_5$ записуються як комбінаційні функції вихідних сигналів

тригерів P_1, P_2, P_3 та P_4

$$f_1 = \bar{p}_1 \bar{p}_2 p_3 \bar{p}_4 + \bar{p}_1 \bar{p}_2 p_3 p_4 + \bar{p}_1 \bar{p}_2 \bar{p}_3 p_4 + p_1 \bar{p}_2 \bar{p}_3 p_4 + \\ + p_1 p_2 \bar{p}_3 p_4 + \bar{p}_1 p_2 \bar{p}_3 p_4 + \bar{p}_1 p_2 p_3 p_4 + p_1 p_2 p_3 p_4 + \\ + p_1 p_2 p_3 \bar{p}_4 = \bar{p}_3 p_4 + \bar{p}_1 p_2 + p_1 p_2 p_4 + \bar{p}_1 \bar{p}_2 p_3 ; \quad (32)$$

$$f_2 = \bar{p}_1 \bar{p}_2 p_3 p_4 + \bar{p}_1 p_2 p_3 p_4 ; \quad (33)$$

$$f_3 = \bar{p}_1 p_2 \bar{p}_3 p_4 + p_1 p_2 p_3 \bar{p}_4 ; \quad (34)$$

$$f_4 = \bar{p}_1 p_2 p_3 p_4 + p_1 p_2 p_3 p_4 + \bar{p}_1 p_2 p_3 \bar{p}_4 ; \quad (35)$$

$$f_5 = p_1 \bar{p}_2 \bar{p}_3 p_4 . \quad (36)$$

Програмна реалізація синтезованих виразів виконана на ПЛК ЕН-А23DRP [4] фірми НІТАСНІ, який має достатню продуктивність, необхідну кількість входів/виходів і прийнятну ціну для поставленого завдання. Даний контролер також виконує обробку сигналів з пульта керування і формування вихідних сигналів, які подаються на дискретні входи стандартного перетворювача для керування режимами його роботи. Електрична схема розробленої установки показана на рис. 5.

Призначення перемикачів, кнопок та індикації наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Опис елементів схеми

Позначення	Назва
Перемикачі	
S0	Подає живлення на контролер ~200 В
S1, S2, S3, S4	Вибір сталої часу T1
S5, S6, S7, S8	Вибір сталої часу T2
S9	Дозвіл на пуск
S10	Відпрацювання траєкторії а- замкнений S10, б- розімкнений
P1	Кнопка аварійної зупинки
Індикація	
L1	Індикація включення живлення контролера
VD1	Індикація дозволу на пуск двигуна
VD2	Індикація реверсу двигуна
VD3	Індикація розгону двигуна
VD4	Індикація гальмування двигуна
Виходи	
AC	Підключається джерело живлення 220 В змінної напруги
DI1	Керування вмиканням перетворювача (перехід в режим готовності). Підключається до дискретного входу перетворювача частоти.
DI2	Вибір напрямку обертання. Підключається до дискретного входу перетворювача частоти.
DI3	Розгін. Підключається до дискретного входу перетворювача частоти.
DI4	Гальмування. Підключається до дискретного входу перетворювача частоти.
+24V	Підключається до дискретного входу +24 В перетворювача частоти.

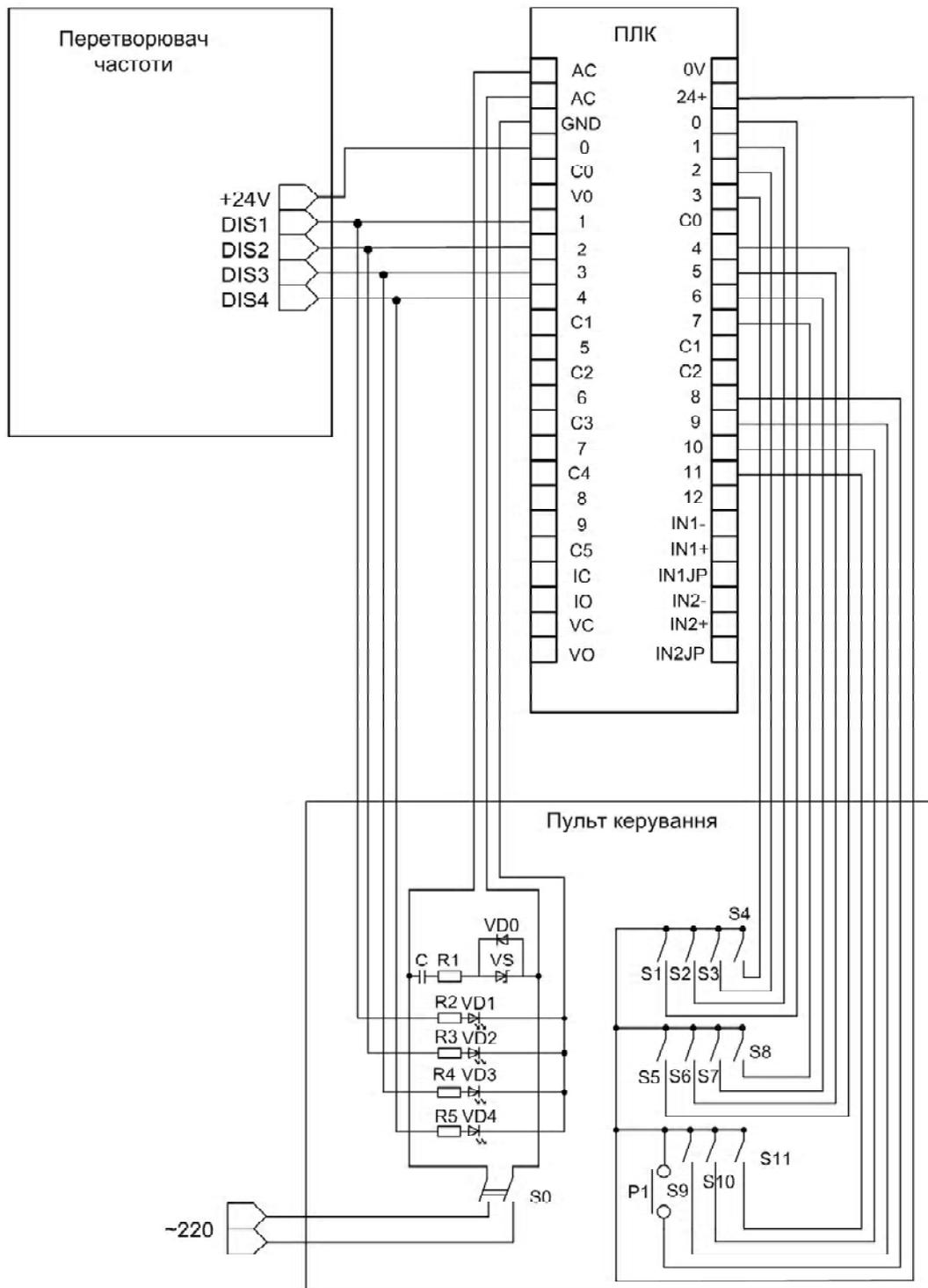


Рис. 5. Електрична схема пристрою автоматизації

Система забезпечує

1. Формування двох типів траєкторій кутової швидкості, які показані на рис. 6, а і рис. 6, б.
2. Можливість вибору для кожної з трьох траєкторій часу розгону/гальмування в діапазоні 0,1–6 с і часу роботи з постійною швидкістю від 0,2 до 12 с.

3. Безпечне аварійне відключення у будь-який момент роботи.

4. Індикацію режимів роботи: готовність до роботи, розгін, гальмування і реверс.

Інтенсивність заданої траєкторії визначається сталими часу T1 і T2. Залежно від вибраної траєкторії три-

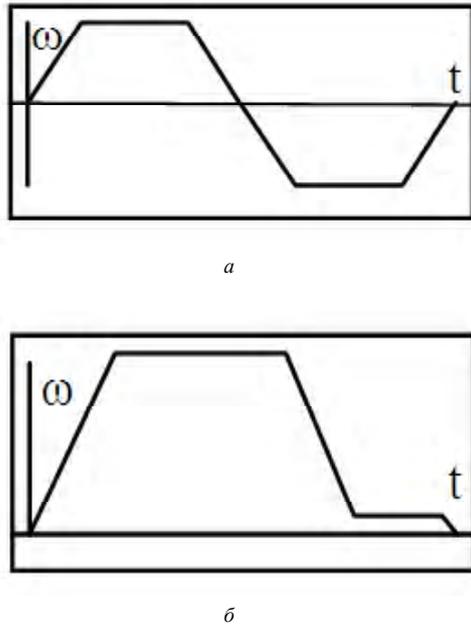


Рис. 6. Форми траєкторії заданої швидкості

валість розгону, гальмування і усталеного руху визначається за допомогою T1 і T2 відповідно до алгоритму, наведеному в табл. 2. Для траєкторії (рис. 6, б) усталений рух 1 відповідає роботі на максимальній швидкості, а усталений рух 2 – робота на швидкості точного позиціонування.

Значення сталої часу T1 встановлюється за допомогою зовнішніх перемикачів S1–S4, як показано у табл. 3.

Значення T2 встановлюється також, як вказано в таблиці 3, із заміною вимикачів S1–S4 на вимикачі S5–S8.

Для перевірки працездатності розробленого пристрою було проведено ряд експериментів, представлених на рис. 7. Візуалізація проводилася за допомогою STEP-2. На рис. 7, а зображено відпрацювання траєкторії точного позиціонування. Як можна побачити з графіка швидкості, час розгону складає 3 с, роботи на усталеній швидкості – 6 с, гальмування до другої усталеної швидкості – 2,7 с, робота на відповідній швидкості – 1,5 с та тривалість зупинки до нульової швидкості 0,3 с. Аварійна зупинка для даної траєкторії показана на рис. 7, б. Також було знято графік перехідного процесу швидкості для відпрацювання траєкторії з реверсом (рис. 7, в). Розгін до усталених швидкостей 2 с, гальмування 3 с, робота на першій усталеній швидкості 6 с, а на другій 4 с. На рис. 7, г було знято графік аварійної зупинки для траєкторії з реверсом.

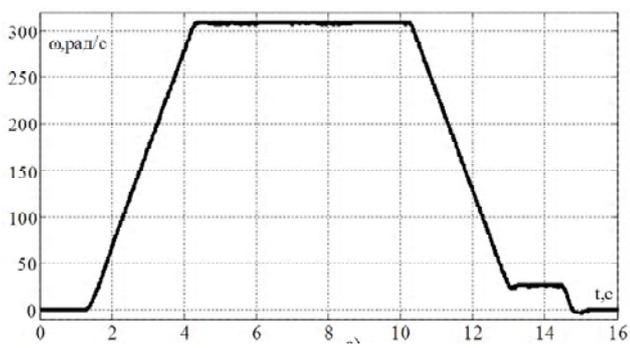
Висновок. Методом графів переходів синтезовано алгоритм роботи системи автоматизації експериментальних досліджень, яка забезпечує формування двох типових траєкторій заданої кутової швидкості з можливістю накидання і скидання моменту. Відповідно до синтезованого алгоритму розроблено програмне забезпечення для логічного контролера, яке додатково реалізує налаштування часових характеристик заданих траєкторій за допомогою пульта керування. Розроблена універсальна установка дозволяє автоматизувати експериментальні дослідження електромеханічних систем, які базуються на сучасних транзисторних перетворювачах.

Таблиця 2 – Визначення часових характеристик заданих траєкторій

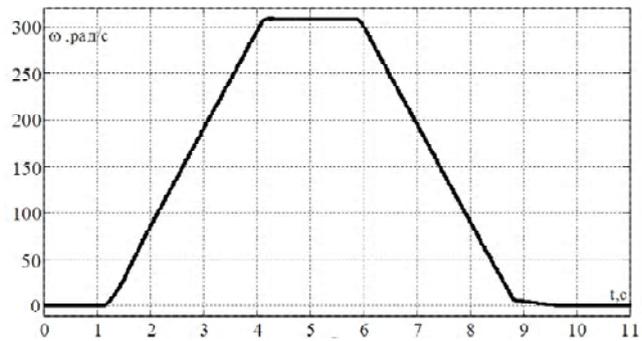
	Розгін 1	Розгін 2	Гальм. 1	Гальм. 2	Уст. рух1	Уст. рух2
Траєкторія а	T1	T1	T2	T2	4*T1	2*T1
Траєкторія б	T1	–	0,9*T2	0,1*T2	4*T1	0,5*T1

Таблиця 3 – Значення таймерів

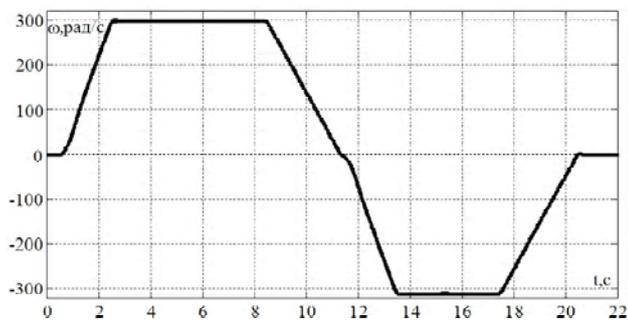
S1	S2	S3	S4	T1,с	S1	S2	S3	S4	T1,с
0	0	0	0	–	1	0	0	0	0,8
0	0	0	1	0,1	1	0	0	1	0,9
0	0	1	0	0,2	1	0	1	0	1
0	0	1	1	0,3	1	0	1	1	2
0	1	0	0	0,4	1	1	0	0	3
0	1	0	1	0,5	1	1	0	1	4
0	1	1	0	0,6	1	1	1	0	5
0	1	1	1	0,7	1	1	1	1	6



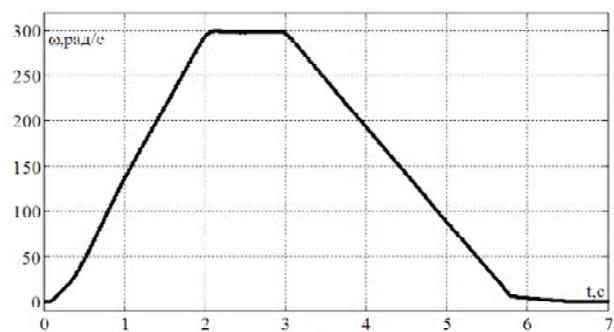
а



б



в



г

Рис. 7. Відпрацювання заданих траєкторій

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ельперін, І. В. Промислові контролери: Навчальний посібник / Ельперін І. В. – К. : НУХТ. – 2003. – 320 с.
2. Федоров, Ю. Н. Справочник инженера по АСУТП: Проектирования и разработка. Учебно-практическое пособие / Федоров Ю. Н. – М. : Инфра-Инженерия. – 2008. – 928 с.
3. Ковальчук, О. В. Логічний синтез дискретних схем автоматики: навчальний посібник / Ковальчук О. В. – К. : НТУУ «КПІ». – 2008. – 168 с.
4. Ковальчук, О. В. Застосування різних методів в синтезу для складних програм для логічних програмованих контролерів / Ковальчук О. В., Бур'ян С. О. // Інформаційний збірник Промелектро. «Промислова електроніка та електротехніка». – Випуск №4. – 2010. – С. 51–53.

Стаття надійшла до редакції 15.02.2011.

Бур'ян С. А., Ворощенко В. Ю., Король С. В., Савич О. Ю., Смирнов С. А.
Автоматизация формирования траекторий при экспериментальном исследовании электромеханических систем

В статье предложено устройство для автоматизации формирования траекторий при экспериментальном исследовании электромеханических систем. Траектории формируются с помощью логического программируемого контроллера, подключенного к промышленному преобразователю частоты. Представлены результаты исследований для различных типов траекторий.

Ключевые слова: логический программируемый контроллер, автоматизация, траектория движения, синтез.

Buryan S., Voroschenko V., Korol S., Savych O., Smirnov S.

Trajectory forming automation in experimental investigation of electromechanical systems

The paper describes the trajectory automation device for electromechanical system experimental investigation.

The trajectories are formed by a logical programmable controller connected to the industrial frequency converter.

The experimental results for various trajectories are presented.

Key words: logical programmable controller; automation, motion trajectory, synthesis.

УДК 621.313.2.001.57

Е. С. Назарова, А. В. Пирожок канд. техн. наук, А. С. Нечпай, П. А. Подпружников

Запорожский национальный технический университет

УЧЕТ ЭФФЕКТА ОБРЫВА ПРОКАТЫВАЕМОЙ ПОЛОСЫ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ДВУХ СМЕЖНЫХ КЛЕТЕЙ СТАНА ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ

Разработана имитационная модель электроприводов двух смежных клеток, в которой учитывается возможность обрыва прокатываемой полосы. Модель предназначена для исследования электромеханических переходных процессов указанных электроприводов при аварийных режимах.

Ключевые слова: стан холодной прокатки, моделирование, обрыв полосы.

При повышении требований к качеству листового проката возникает необходимость в детальном исследовании электромеханических систем для более эффективного использования прокатного оборудования. Эти вопросы рассматривались достаточно большим количеством исследователей, но анализ известных работ показывает, что многие из них (в частности [1, 2]) посвящены исследованию процесса механического движения металла без учета возможности обрыва полосы. В известных работах [3, 4], посвященных исследованию непрерывных станов холодной прокатки, недостаточно внимания уделено вопросам углубленного изучения динамических процессов, связанных с особенностями аварийных ситуаций, исследования электромеханических процессов, создания имитационной модели, учитывающей возможность обрыва прокатываемой полосы.

Имитационные модели позволяют без нарушения производственного цикла прокатного стана исследовать его электромеханические процессы, снизить трудоемкость и затраты на проведение этих исследований, что является **актуальным** при разработке новых систем управления. Использование этих моделей позволит оптимизировать существующие системы защиты и алгоритмы выхода из аварийной ситуации.

Целью является создание имитационной модели электроприводов двух смежных клеток, в которой учитывается эффект обрыва прокатываемой полосы, для исследования электромеханических процессов при аварийных режимах.

Для исследования электромеханических процессов во взаимосвязанных электроприводах смежных клеток прокатного стана разработана в пакете современных прикладных программ [5] имитационная модель (рис. 1), где SAU-1, SAU-2 – обозначены блоки, обеспечивающие регулирование управляющих сигналов двигателей первой и второй клеток (Kletka-1, Kletka-2) [6]. Валы, соединяющие прокатные клетки и приводные двигатели, имитируются блоками VAL-1, VAL-2, которые представляют собой упругости первого рода. Металл, выходящий из первой клетки и входящий во вторую клетку, имитируется блоком Prokat, которые представляют собой упругости второго рода.

Каждая подсистема является самостоятельной моделью с портами входных и выходных координат. Для удобства создан свой логотип (изображенный на ней сверху), интерфейс для ввода и изменения параметров этой подсистемы. Такой подход имеет преимущества, поскольку любая модель имеет возможность соединяться с другой моделью по каналам механических и электрических связей. Механическими координатами являются скорость, момент, сила натяжения полосы; электрическими – токи и напряжения двигателей.

Вращающие моменты, созданные в моделях двигателей постоянного тока с независимым возбуждением (DPT-1, DPT-2), приводят во вращение валки двух клеток. Подсистемы SAU-1, SAU-2 собраны в виде двухконтурной системы автоматического управления скоростью двигателя клетки с внутренним контуром регулирования тока [7].

Для создания модифицированной подсистемы «Prokat» (рис. 2) использовано известное математическое описание упругостей второго рода [8], а также в этой подсистеме заложено следующее условие, при котором имитируется эффект обрыва полосы, то есть, когда текущее значение силы натяжения в полосе F_C достигает критического F'_{Cmax} , происходит обрыв по-

лосы металла, а в модели выходное значение силы натяжения F'_C обнуляется:

$$F'_C = \begin{cases} F_C, & \text{при } F_C < F'_{Cmax}; \\ 0, & \text{при } F_C \geq F'_{Cmax}, \end{cases} \quad (1)$$

где $F'_{Cmax} = K_r \cdot F_{Ctab}$; K_r – коэффициент предела прочности материала (в модели принято $K_r = 1,5$);

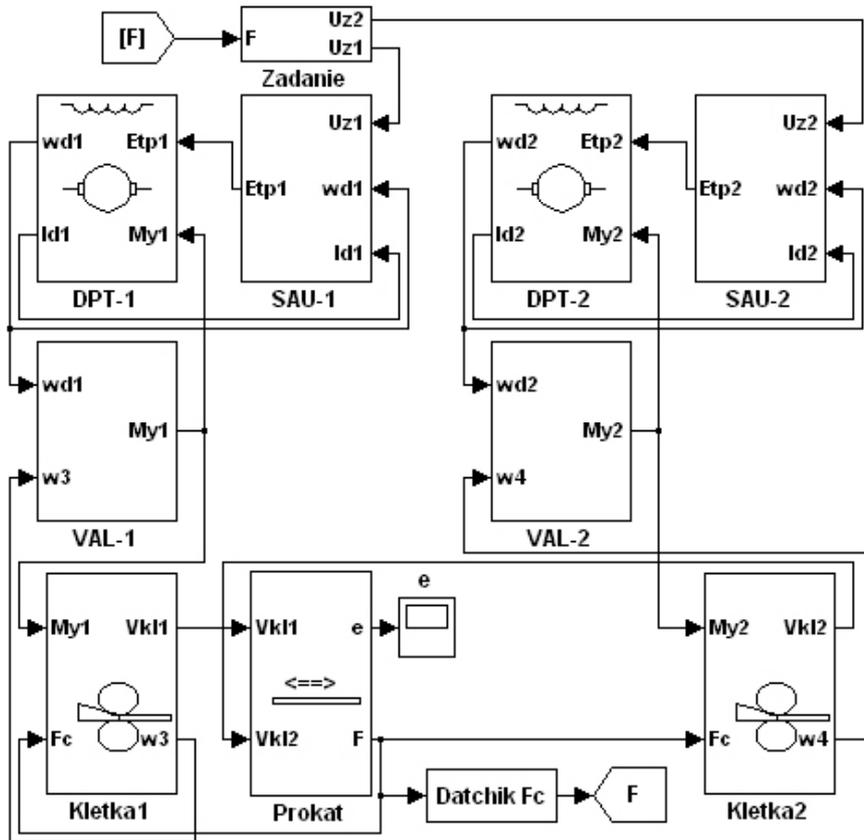


Рис. 1. Имитационная модель электроприводов двух смежных клетей с учетом эффекта обрыва прокатываемой полосы

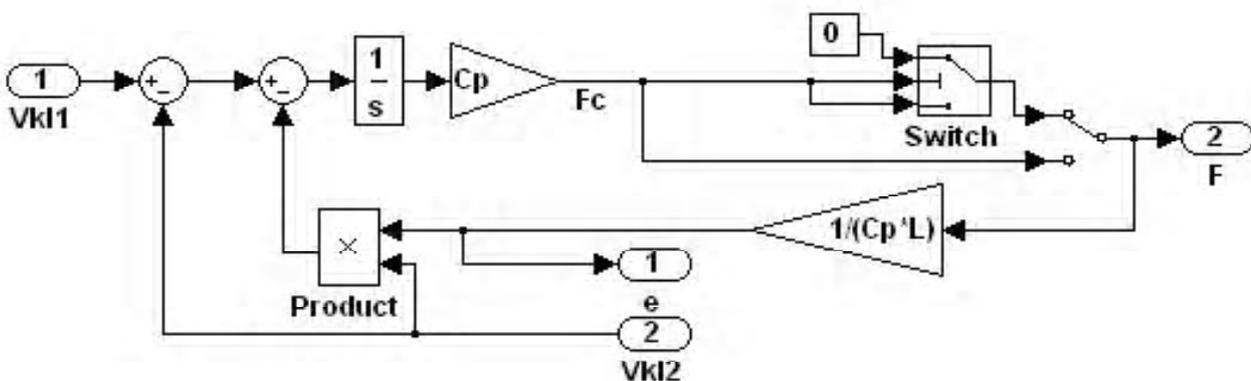


Рис. 2. Модель модифицированной подсистемы «Prokat» с учетом эффекта обрыва полосы

$F_{C\text{rab}}$ – сила натяжения металла при рабочих режимах прокатки.

Величины K_r , $F_{C\text{rab}}$ определяются с учетом физико-механических свойств материала и геометрических размеров прокатываемой полосы.

Моделирование выполнялось в пакете прикладных программ, в котором использование индексов не предусмотрено.

В случае ее обрыва для предотвращения дальнейшей размотки рулона и порчи полосы необходимо остановить прокатку, то есть организовать экстренное торможение. В имитационной модели система защиты реализована по способу моментального отключения электроприводов клетей от питающей сети при обрыве прокатываемой полосы, информация о чем поступает от «Datchik Fc» на блок «Zadanie».

Графики переходных процессов (I_{kl1} , I_{kl2} , U_{kl1} , U_{kl2} , V_{kl} , F'_C – токи в цепи якоря, напряжения двигателей клетки 1 и клетки 2, линейная скорость движения прокатываемой полосы, сила натяжения прокатываемой полосы) полученные на разработанной имитационной модели, показаны на рис. 3.

Из анализа полученных графиков видно, что такая резкая остановка приводит к весьма значительным скачкам и колебательности координат электромеханической системы (ЭМС). Это может негативно влиять на работу реального технологического оборудования, следовательно, в аварийных ситуациях необходимо производить плавную остановку ЭМС (рис. 4). Однако тогда имеет место задача быстрого с ограниченными механическими колебаниями торможения.

С этой целью разработан алгоритм системы управления плавной остановкой ЭМС при условии обрыва прокатываемой полосы. В подсистеме «Zadanie» формируются задающие сигналы, при этом, если система

работает без аварийных режимов, блок F подает в систему единицу, которая умножается на нормальный сигнал задания. Когда же возникает непредвиденная ситуация (авария), F'_C стремится к нулю и при помощи блока «zadanie_ostanov» осуществляется постепенное плавное снижение задающего сигнала до момента появления на выходе блока «zadanie_ostanov» нуля. Вследствие этого происходит переключение и на выходе блока Switch1 также появляется нуль. Он, в свою очередь, является управляющим сигналом для блока Switch2, который подает его на систему управления электроприводами клетей, и происходит окончательная остановка агрегатов.

Созданные имитационные модели отдельных элементов процесса прокатки можно считать универсальными, т. к. они являются составной частью практически любого прокатного стана с различным количеством рабочих клетей. При разработке рассмотренной модели были использованы реальные данные четырехклетьевого стана «Тандем» цеха холодной прокатки №1 (ЦХП-1) ОАО «Запорожсталь». Полученные переход-

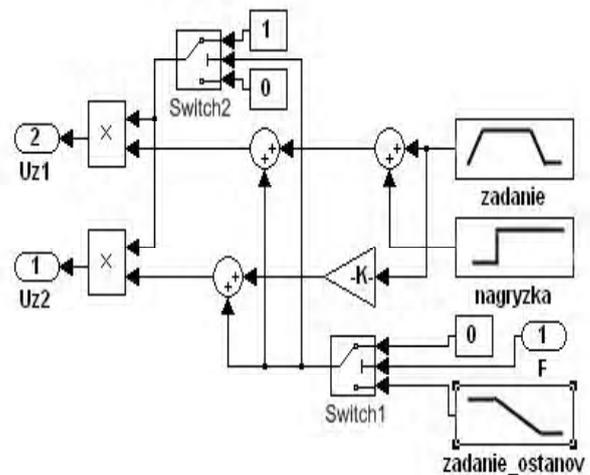


Рис. 4. Модель подсистемы «Zadanie» при плавной остановке

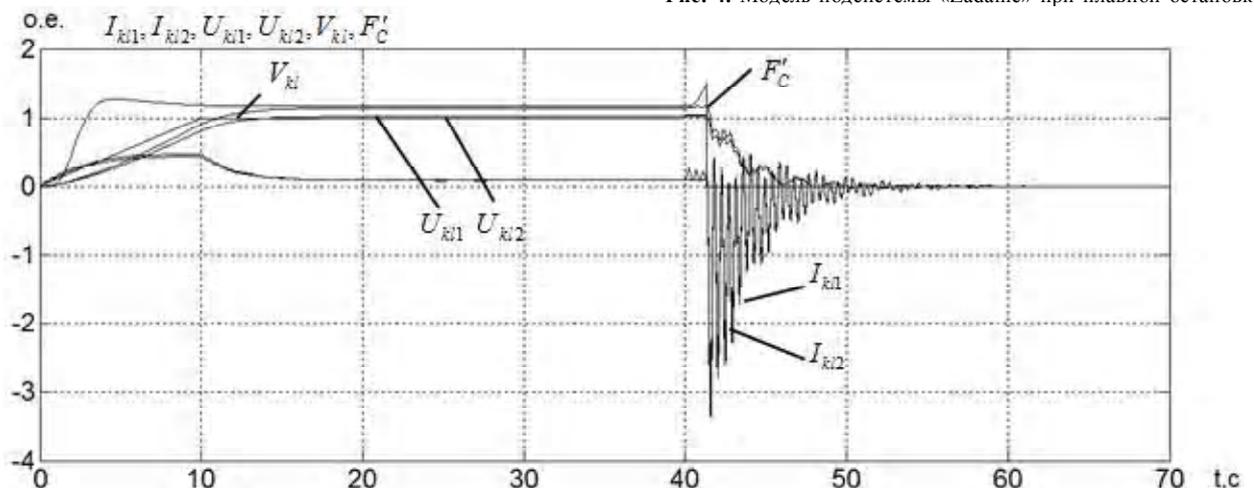


Рис. 3. Переходные процессы электроприводов двух смежных клетей с учетом упругостей первого и второго рода с учетом обрыва полосы при резкой остановке ЭМС

ные процессы в модели двух смежных клеток с упругостями первого и второго рода показаны на рис. 5. В момент времени $t=40$ с к первой клетке прикладывается дополнительное воздействие, при котором натяжение прокатываемой полосы превышает граничное значение силы растяжения $F'_{C\max}$, что согласно технологии прокатки недопустимо, т.к. превышает предел прочности материала прокатываемой полосы.

Для решения задачи мониторинга электромеханических параметров в условиях металлопрокатного производства ЦХП-1 ОАО «Запорожсталь» был разработан многоканальный комплекс, который получает текущую информацию от датчиков скорости, тока и напряжения. Для большего удобства осуществления оценки полученных данных организована система визуализации протекания процесса прокатки, который отображается в графической форме. На рис. 6 приведены реальные переходные процессы при обрыве полосы.

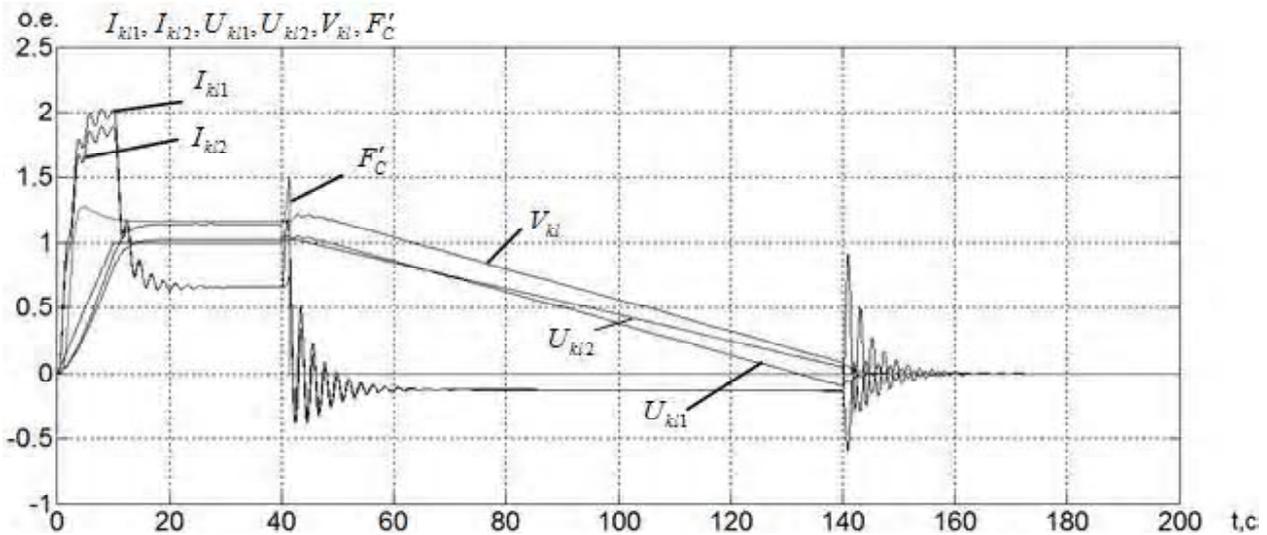


Рис. 5. Переходные процессы электроприводов двух смежных клеток с учетом упругостей первого и второго рода с учетом обрыва полосы при плавной остановке ЭМС

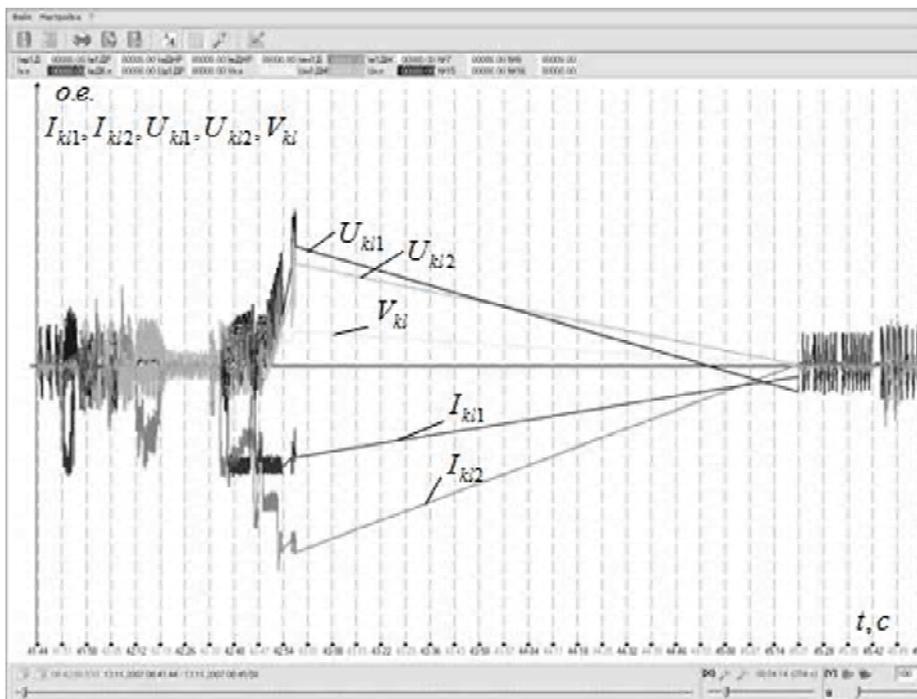


Рис. 6. Реальные переходные процессы при обрыве полосы, полученные при помощи диагностирующего многоканального комплекса

Полученные результаты подтверждают адекватность разработанной имитационной модели и свидетельствуют о ее достоверности при сравнении с экспериментальными данными четырехклетевого стана «Тандем» ЦХП-1 ОАО «Запорожсталь».

Выводы

Разработана имитационная модель электроприводов двух смежных клетей при обрыве прокатываемой полосы, а также системы управления резкой и плавной остановкой электромеханической системы в условиях возникновения аварийной ситуации. Это позволило значительно повысить степень достоверности параметров модели и приближения их к реальным параметрам.

Модели могут быть использованы при оптимизации существующих систем защиты и алгоритмов уменьшения последствий аварийной ситуации. Это позволит сократить время и трудоемкость работ при проектировании и модернизации существующего прокатного оборудования, с учетом упругости транспортируемых материалов.

Полученные результаты можно использовать при настройке и контроле системы управления как отдельного оборудования, так и электромеханического комплекса в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лимонов, Л. Г. Автоматизированный электропривод промышленных механизмов. – Х. [Текст], 2009. – 272 с.
2. Назарова, Е. С. Имитационная модель механического движения металла для реверсивного одноклетевого стана холодной прокатки // Электротехника та електроенергетика / Е. С. Назарова, А. В. Пирожок, Ю. А. Супрун. – 2007. – №1. – С. 9–15.
3. Півняк, Г. Г. Автоматизований електропривод у прокатному виробництві [Текст] / Г. Г. Півняк, О. С. Бешта, М. П. Фількін. – Дніпропетровськ, 2008. – 224 с.
4. Пирожок, А. В. Имитационные модели электромеханических процессов тонколистового стана холодной прокатки // Электротехника та електроенергетика / А. В. Пирожок, А. А. Супрун, Ю. А. Супрун. – 2005. – № 2. – С. 34–42.
5. Ануфриев, И. Е. MATLAB 7 [Текст] / И. Е. Ануфриев, А. Б. Смирнов, Е. Н. Смирнова. – СПб. : БХВ-Петербург, 2005. – 1104 с.
6. Бондаренко, В. И. Моделирование систем управления взаимосвязанных электроприводов процесса прокатки с учетом упругостей первого и второго рода // Спецвыпуск журнала «Техническая электродинамика» [Текст] / В. И. Бондаренко, А. В. Пирожок, Е. С. Назарова. – Киев : НТУ «КПИ», 2010. – Ч.1. – С. 129–134.
7. Зеленов, А. Б. Синтез та цифрове моделювання систем управління електроприводами постійного струму з вентильними перетворювачами. [Текст] Навч. посіб. для студ. вузів / А. Б. Зеленов, І. С. Шевченко, І. Н. Андреева. – Алчевськ : ДГМІ, 2002. – 400 с.
8. Назарова, Е. С. Исследование электромеханических процессов многомерных систем прокатного производства с учетом упругостей первого и второго рода // Вісник КДПУ. [Текст]. – Кременчук : КДПУ, 2010 – Випуск 3/2010 (62). – Ч.1. – С. 22–25.

Стаття надійшла до редакції 21.02.2011.

Назарова О. С., Пирожок А. В., Нечпай О. С., Подпружников П. О.

Врахування ефекту обриву полоси, що прокатується, при моделюванні електроприводів двох суміжних клітей стана холодної прокатки

Розроблено імітаційну модель електроприводів двох суміжних клітей, в якій враховується можливість обриву смуги, що прокатується. Модель призначена для дослідження електромеханічних перехідних процесів вказаних електроприводів при аварійних режимах.

Ключові слова: стан холодної прокатки, моделювання, обрив смуги.

Nazarova E. S., Pirozhok A. V., Nechpay A. S., Podpruzhnikov P. A.

Taking into account the possibility of rolled strip breaking in simulation model of electric drives of two adjacent rolling mills of cold rolling train

The simulation model of electric drives of two adjacent rolling mills is developed, which takes into account the possibility of rolled strip breaking. The model is designed to study electromechanical transition processes in these actuators at emergency operation.

Key words: cold rolling train, modeling, rolled strip breaking .

Т. М. Корнус, С. М. Тиховод канд. техн. наук
Запорожский национальный технический университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПУСКА ТИРИСТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ПИТАНИЯ ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ ТУРБОГЕНЕРАТОРА

Разработана программа на языке MATLAB для моделирования электрических процессов в тиристорных преобразователях, описываемых жёсткими дифференциальными уравнениями. С помощью проведённых исследований разработаны рекомендации пуска преобразователя с большой индуктивной нагрузкой.

Ключевые слова: моделирование, тиристорный преобразователь.

При проектировании тиристорного управляемого выпрямителя для питания обмотки возбуждения турбогенератора током свыше 2000 А возникла проблема запуска. Дело в том, что обмотка возбуждения турбогенератора имеет очень большую индуктивность – 1,75 Гн, ограничивающую скорость нарастания тока в тиристорах. Если напряжение между анодом и катодом тиристора положительное ($U_{ak} > 0$), а на управляющем электроде находится положительный потенциал импульса управления, тиристор находится в открытом состоянии. В течение открытого состояния тиристора ток возрастает незначительно и, в некоторых случаях, не может достигнуть значения тока включения I_L . Поэтому после снятия управляющего импульса тиристор закрывается, и ток нагрузки не увеличивается. Преобразователь запуститься не может. Для решения этой проблемы обычно параллельно нагрузке включают балластное сопротивление. Однако это связано с дополнительными затратами энергии. Поэтому решение проблемы запуска такого преобразователя без дополнительных затрат энергии является актуальной задачей.

Для решения данной проблемы предложено включать параллельно нагрузке RC-цепочку. Проверка эффективности предложенного решения, а также выбор параметров цепочки может быть выполнен с помощью компьютерного моделирования процесса включения преобразователя. Моделирование в системе Simulink положительного результата не дало. Дело в том, что хотя система Simulink поддерживает моделирование тиристорных преобразователей, но при этом игнорируется ряд важных параметров тиристорных преобразователей, например, не учитывается ток включения мощных тиристорных преобразователей. Применение системы PSpice (и других подобных систем) при моделировании устройств силовой электроники также встречает ряд трудностей. При проектировании некоторых тиристорных преобразователей особенностью является то, что система дифференциальных уравнений, описывающих электрические процессы, становится жесткой настолько, что система PSpice не может справиться

с ее интегрированием. Для «смягчения» системы уравнений разработчики включают в модель дополнительные элементы, которых нет в проектируемом устройстве, и корректность включения которых зависит от опыта и интуиции разработчика.

Для устранения указанных недостатков разработан новый программный комплекс Thyrist для моделирования электрических процессов в тиристорных устройствах силовой электроники [1].

Система Thyrist специально разработана так, чтобы жесткая система дифференциальных уравнений, описывающая электрические процессы в тиристорных устройствах, интегрировалась в течение приемлемого времени.

Особенности системы Thyrist изложим на примере моделирования электрических процессов в тиристорном управляемом выпрямителе для питания обмотки возбуждения турбогенератора током свыше 2000 А. Последовательно покажем основные операции, которые выполняет программа Thyrist в процессе моделирования.

Тиристорный управляемый выпрямитель собран по схеме трехфазного моста Ларионова (рис. 1).

Особенностью схемы является то, что постоянная времени нагрузки весьма высока и составляет порядка 15 секунд. Как известно, электрические процессы в произвольный момент времени описываются системой дифференциально-алгебраических уравнений, составленных по законам Кирхгофа. Для того чтобы система Кирхгофа имела единственное решение, предварительно программа строит дерево графа цепи и главные контуры выбираются так, чтобы каждый контур включал только одну хорду. Полная система независимых уравнений Кирхгофа в матричной форме для цепи на рис. 1 имеет следующий вид:

$$A_S X_S' + A_Z X_Z' + B_S X_S + B_Z X_Z = F, \quad (1)$$

где A_S – матрица коэффициентов, стоящих перед производными переменных состояния; B_S – матрица коэф-

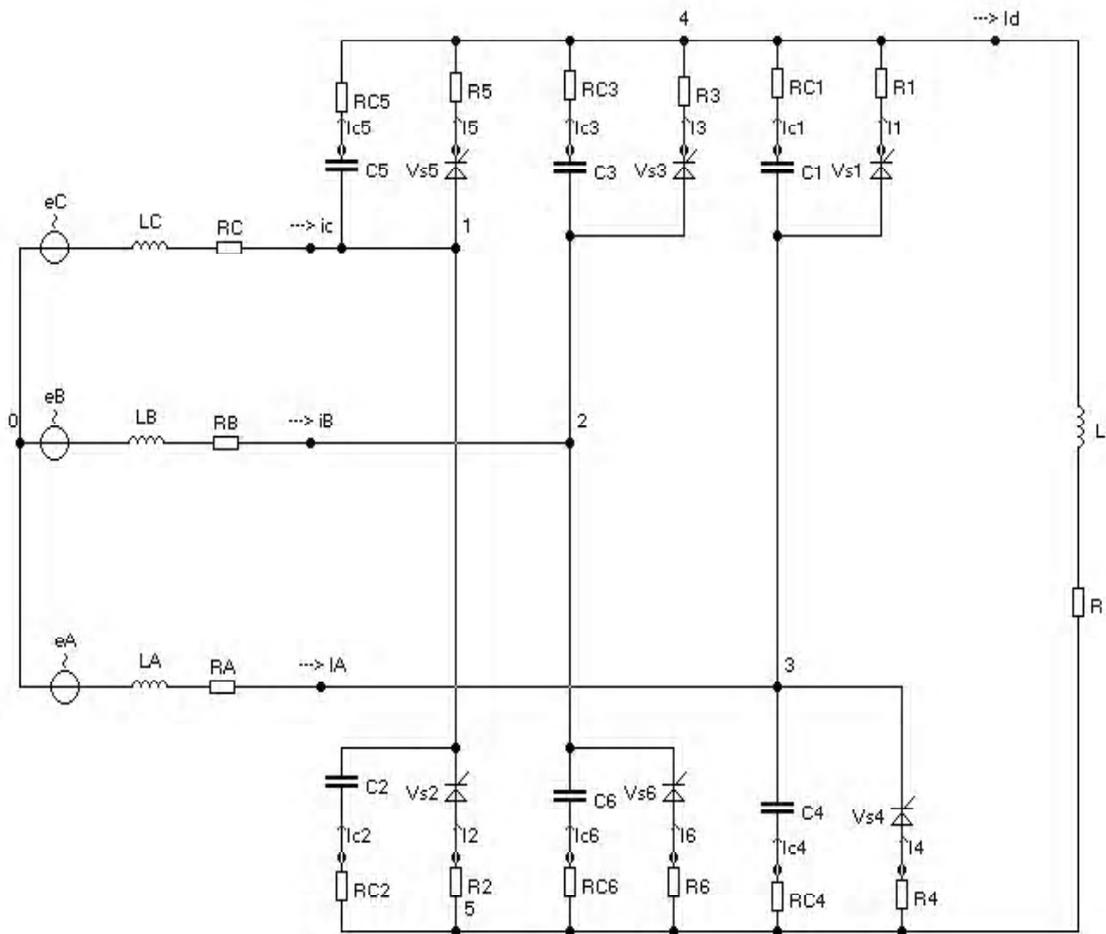


Рис. 1. Схема тиристорного выпрямителя

фициентов, стоящих перед переменными состояния; \mathbf{B}_z – матрица коэффициентов, стоящих перед зависимыми переменными; \mathbf{F} – вектор правых частей уравнений Кирхгофа.

В любой электрической цепи, если в некоторый момент времени известны переменные состояния, то зависимые переменные могут быть однозначно выражены через переменные состояния. Поэтому численные методы достаточно применять для определения на новом шаге интегрирования только переменных состояния и по найденным переменным состояниям находить значения зависимых переменных. Для численного интегрирования дифференциальных уравнений применяют как явные, так и неявные методы [2]. Однако, как известно [2], неявные методы более предпочтительны, чем явные, так как они обладают большей устойчивостью. Более точными и быстрыми являются многошаговые методы, чем одношаговые.

Системы уравнений, описывающие электрические процессы в тиристорных схемах, являются весьма жесткими. Жесткость уравнений появляется потому, что ряд тиристоров в некоторый момент времени открыт, и они имеют весьма малое сопротивление, а другой ряд тиристоров может быть закрыт и, соответственно,

закрытые тиристоры имеют весьма большое сопротивление. При этом индуктивность нагрузки весьма велика, а индуктивности в фазах весьма малы. Через некоторые промежутки времени у тиристоров происходят переключения, после которых в течение весьма короткого промежутка времени происходят быстропротекающие переходные процессы, а затем в течение продолжительного промежутка времени до следующей коммутации какого-нибудь тиристора изменения функции напряжений и токов незначительны. Для интегрирования жестких систем дифференциальных уравнений рекомендуется использовать неявные многошаговые методы Гира [2], которые являются одним из представлений метода дифференцирования назад BDF.

Система уравнений, составленная по законам Кирхгофа, состоит из $s+z$ уравнений. Незвестными в момент времени номер k являются s переменных состояния, z зависимых переменных и s производных переменных состояния, т. е. всего $2s+z$ неизвестных.

Если к системе уравнений Кирхгофа присоединить s уравнений системы Гира, то полная система уравнений будет содержать $2s+z$ независимых уравнений. Тогда решение полученной системы даст все переменные состояния, зависимые переменные и производные

переменных состояния в k -й момент времени. Таким образом, полная система $2s+z$ уравнений в матричной форме имеет вид:

$$\mathbf{AX} = \mathbf{F}. \quad (2)$$

Поскольку матрицы \mathbf{A} и \mathbf{F} в уравнении (2) содержат много нулевых элементов, то для решения этой системы используются специальные методы решения систем линейных уравнений с разреженными матрицами. Эти методы существенно экономят оперативную память компьютера и сокращают время решения системы уравнений.

Будем рассматривать тиристор как резистивный элемент электрической цепи, который может изменять свое сопротивление R_T в зависимости от ряда условий [3]. Такое представление не соответствует физике процессов в полупроводниковых структурах.

Поставим целью, чтобы модель при этом сохранила логику работы тиристора и внешние характеристики с точностью, достаточной для практики, соответствовали реальному прибору. Состояние тиристора в произвольный момент времени охарактеризуем параметром $Flag$, который может принимать целые значения от нуля до пяти (см. табл. 1). Таким образом, тиристор

представим как нелинейный резистивный элемент, который может изменять свое сопротивление как скачком, так и непрерывно, согласно определенной логике. В программе Thyrist состояние всех тиристоров проверяется на каждом шаге интегрирования. Решение уравнения (2) в цикле с пошаговым изменением текущего времени позволяет получить временные зависимости всех переменных электрической цепи. Как отмечалось ранее, система дифференциальных уравнений, описывающих электрические процессы в преобразователе, весьма жесткая. Это приводит к тому, что после коммутации какого-нибудь тиристора происходят быстрые процессы, которые скоро прекращаются, и переменные далее изменяются медленно до следующей коммутации тиристора. Пренебрегать вычислением быстрых процессов, возникающих после коммутации тиристора, нельзя, так как именно они приводят к опасным броскам токов и напряжений, которые нужно учитывать и оптимизировать выбором параметров элементов схемы. Поэтому для правильного отображения быстрых процессов необходимо задавать значение шага интегрирования h весьма малым.

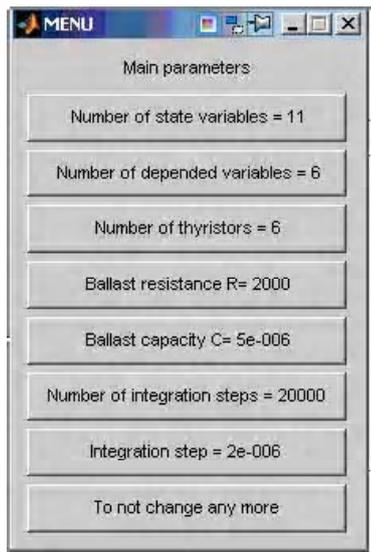
Если выполнить расчет с малым шагом h , то время расчета сильно возрастает и расчет только одного пе-

Таблица 1 – Перечень состояний тиристора

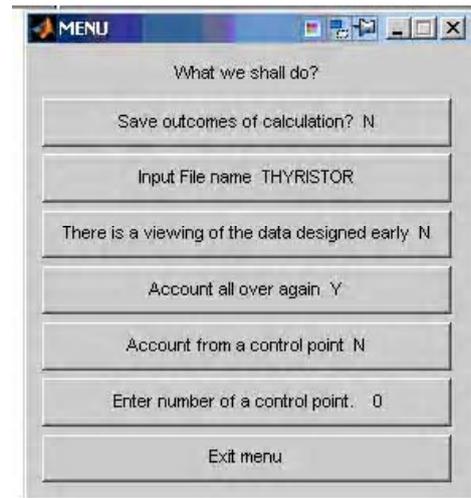
Значение параметра $Flag$	Тип состояния тиристора	Примечание
0	Закрытое удерживаемое состояние.	Тиристор находится в закрытом состоянии, если даже напряжение между анодом и катодом положительное ($U_{ak} > 0$). В этом случае сопротивление тиристора равно сопротивлению в закрытом состоянии: $R_T = R_{off}$.
1	Открытое неудерживаемое состояние.	Тиристор открыт, но ток тиристора I_T не достиг величины тока включения I_L . В этом состоянии тиристор будет находиться до тех пор, пока напряжение между анодом и катодом тиристора положительное ($U_{ak} > 0$), а на управляющем электроде находится положительный потенциал импульса управления ($imp=1$). В этом состоянии сопротивление тиристора равно значению сопротивления в открытом состоянии: $R_T = R_{on}$.
2	Открытое удерживаемое состояние.	Тиристор открыт, и значение тока I_T , протекающего через него, превышает значение тока включения I_L . В этом состоянии тиристор находится до тех пор, пока $U_{ak} > 0$ и ток вентилля I_T превышает величину тока удержания I_H , независимо от наличия на управляющем электроде импульса управления.
3	Открытое состояние при отрицательном напряжении тиристора.	При перемене знака U_{ak} на отрицательный тиристор некоторое время находится в открытом состоянии, пока ток в обратном направлении не достигнет значения I_{rrm} .
4	Переходное состояние при обратном восстановлении заряда.	При отрицательном знаке U_{ak} после достижения током значения I_{rrm} тиристор закрывается не мгновенно. В этом состоянии сопротивление тиристора постепенно изменяется до значения R_{off} .
5	Закрытое неудерживаемое состояние.	После закрытия тиристор в течение некоторого времени tq может открыться, если значение напряжения U_{ak} изменит знак на положительный.

риода может занимать несколько часов времени. Чтобы ускорить расчет, используется следующий прием. После каждой коммутации шаг h уменьшается: делится на заданный коэффициент деления шага K_{del} , который выбирается в зависимости от режима в пределах 10–200. С малым шагом вычисляется заданное число шагов N_T после коммутации, и расчет продолжается далее с исходным шагом h до следующей коммутации. Такой прием позволяет сократить время расчета в несколько раз.

Для ввода исходных данных используется два меню (рис. 2, 3). Расчет переходного процесса можно выполнить с самого начала или с контрольной точки. Контрольная точка создается с помощью меню рис. 2, б. При этом по окончании расчета все данные сохраняются в файле, имя которого задается, а также сохраняются значения всех переменных состояния и флаги состояния тиристоров в массиве $KONTx$ (x -номер контрольной точки). При расчете с заданной контрольной точки начальные значения переменных считываются из массива $KONTx$ и расчет продолжается.



а



б

Рис. 2. Меню, определяющие характер расчета: а) задание количества переменных состояния, зависимых переменных, количества тиристоров, значений RC -цепочки, максимальное количество шагов интегрирования, значение шага интегрирования; б) запрос о сохранении результатов расчета в файле, имя файла, ввод данных с клавиатуры или из файла, расчет с самого начала или с контрольной точки, ввод номера контрольной точки

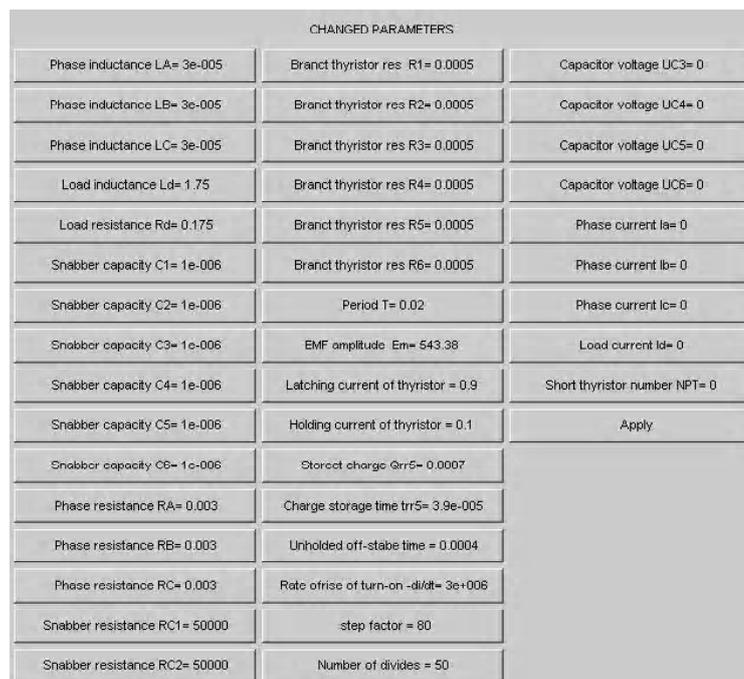


Рис. 3. Меню, позволяющее изменить данные цепи

Програма дозволяє виконати не тільки розрахунок штатного режиму, але й аварійного режиму, коли пробивається тиристор. Перед пробоем тиристора організується контрольна точка, а при розрахунок з новою конт-

рольної точки вказується номер пробитого тиристора, який не переходить в закритий стан ніколи.

На рис. 4, а показані залежності струму та напруги першого тиристора від поточного часу при пуску

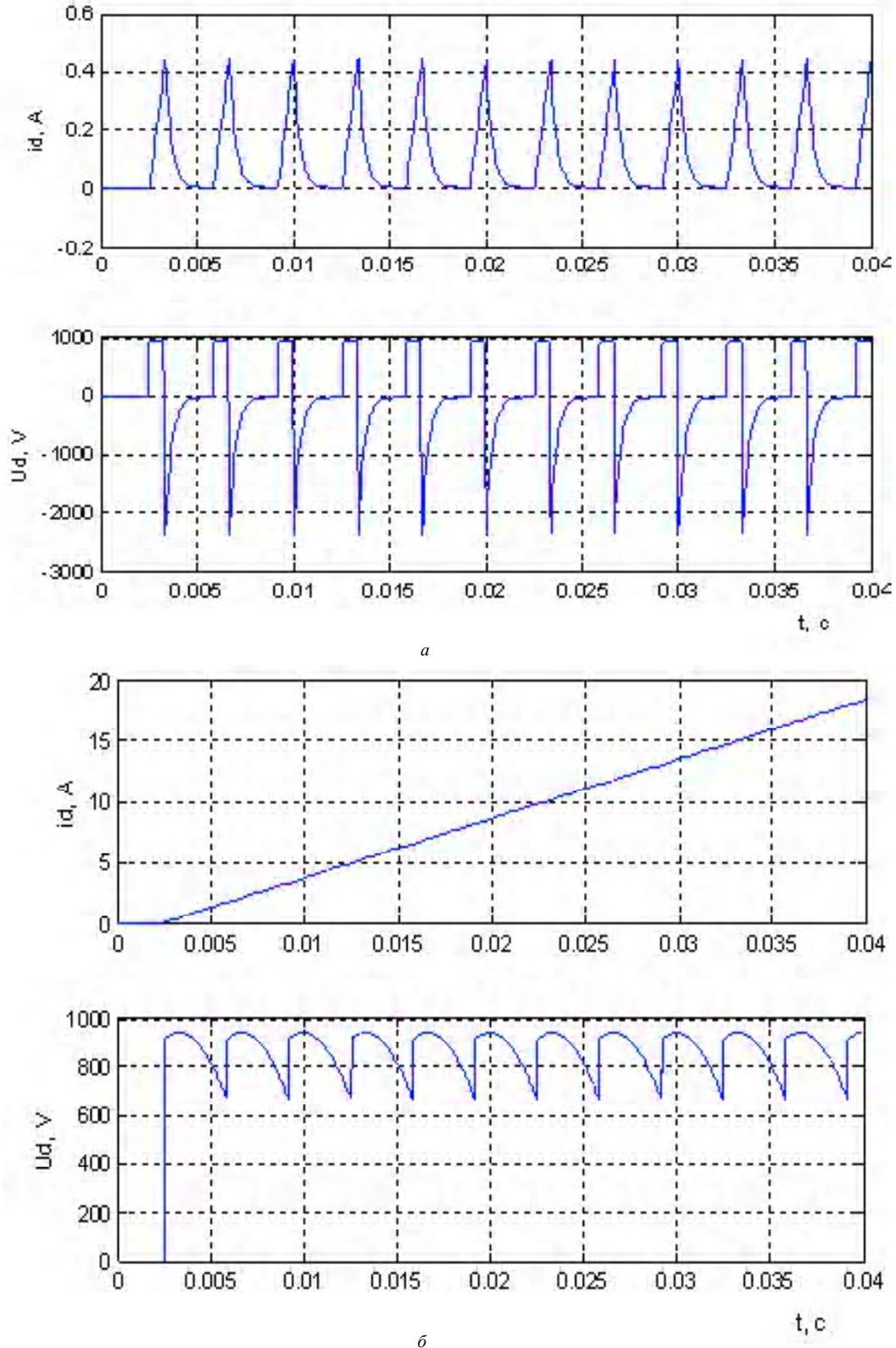


Рис. 4. Залежності струму та напруги першого тиристора від поточного часу при пуску преобразователя: а) без RC-цепочки; б) с RC-цепочкой

преобразователя без RC-цепочки. Эти зависимости показывают, что преобразователь самостоятельно запуститься не может. На рис 4, б показаны те же зависимости, но параллельно нагрузке включена RC-цепочка: $R=2000$ Ом, $C=5$ мкФ. Преобразователь уверенно запускается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тиховод, С. М. Программа для компьютерного моделирования электрических процессов в тиристорных цепях / С. М. Тиховод, Т. М. Корнус // Электротехника та електроенергетика. – 2002. – № 1.

2. Ортега, Дж. Введение в численные методы решения дифференциальных уравнений / Дж. Ортега, У. Пулл. – М. : Наука, 1986. – 288 с.
3. Тиховод, С. М. Разработка компьютерной программы моделирования магнитоэлектрических цепей, содержащих тиристоры / С. М. Тиховод, И. О. Афанасьева, Т. М. Корнус // Технічна електродинаміка. – 2009. – № 3. – С. 9–13.

Стаття надійшла до редакції 03.06.2011.

Корнус Т. М., Тиховод С. М.

Модельювання пуску тиристорного перетворювача для живлення обмотки збудження турбогенератора

Розроблено MATLAB-програму для моделювання електричних процесів в тиристорних перетворювачах, що описуються жорсткими диференціальними рівняннями. За допомогою проведених досліджень розроблено рекомендації пуску перетворювача з [і] великим індуктивним навантаженням.

Ключові слова: моделювання, тиристорний перетворювач.

Kornus T. M., Tykhovod S. M.

Modeling of thyristor converter start for turbogenerator excitation winding power supply

The MATLAB program is developed, modeling electric processes in thyristor converters which are described by rigid differential equations. Based on investigation results recommendations are given for converter start under high inductive load.

Keywords: Modeling, Thyristor Converter.

УДК 621.316.925:621.3.049.77

V. I. Gurevich

Central Electric Laboratory, Israel

RELIABILITY OF MICROPROCESSOR-BASED PROTECTIVE DEVICES – REVISITED

The article is a continuation of a set of the author's previous publications about the reliability of the microprocessor-based protective devices. The statistical data introduced by the author, coincide with data of other authors and confirm higher reliability of electromechanical relays in comparison with microprocessor-based. The inadequacy of the criterion for estimating the reliability of the protective relay is noted and a new normalized criterion for such estimation is offered by author.

Keywords: microprocessor-based protective devices, reliability, relay protection, life expectancy, intensity of failures, failure rate.

1. Introduction

In previous publications the author has already analyzed the transition from electromechanical to a microprocessor-based protective relays, and considered the prospects and problems of microprocessor relays applications [1–4]. The rather sharp reaction of the readers, often arising after these publication, on the one hand, and the author's detailed answers to the criticism of opponents on the other show that among the specialists in this area there is no common opinion about the prospects of

microprocessor protection, there is no unequivocal understanding that, as any other complex device, the microprocessor protection not only possesses obvious advantages, but also has serious weaknesses.

2. Myth about the extremely importance of microprocessor-based protective devices

One of the widely widespread fables [5] justifying the inevitability of transition to microprocessor relay protection is the myth that electromechanical protective relays do

not provide the performance of the technical requirements for relay protection and the further existence of electric power industry of today is not possible without microprocessor protection devices (MPD).

Actually, no new functions in relaying MPD have been introduced. The parameters and facilities of the high-quality electromechanical and semi-conductor, that is, the static analog devices constructed on the basis of discrete solid-state elements and integrated microcircuits, completely provide all relay protection requirements. In relaying there are no actual problems that could not be solved by means of electromechanical or static relays (note: recording emergency modes is not relay protection function). Confirmation of this is the fact that complex electrical networks and systems exist and successfully function all over the world for more than hundred years; whereas microprocessor-based relay protection has appeared in use in not very appreciable numbers just 10–15 years ago. Thus, with the beginning of the use of MPD the functioning logic of an electric power system has not changed, the number of operations that are carried out by an electric power system has not increased, the quantity of the produced electric power has not changed, principles of transmission and distribution of the electric power have not changed.

3. Why has a microprocessor-based protective device become so popular?

The progress in the development of electromechanical relays completely stopped 30–35 years ago since the efforts of developers have been directed first to the creation of electronic protections and then to microprocessor-based ones. The matter is that the production expenses of a completely robotized (down to automatic testing) MPD manufacturing process using cheap high-integrated electronic components is far less than the expenses of manufacture and manual assembly precision mechanical elements of electromechanical relays; therefore it is to the manufacturer's interest to push MPDs. For example, the ordinary electronic component mounting machine, CM402-M/L, can install 60,000 components an hour. Yes, 60 thousand components an hour! It is evidently clear that with such high-efficiency fully automatic manufacture of printed-circuit-boards, of which one is the MPD, brings to manufacturers fabulous profits in comparison to manufacture of mechanical relays. In the manufacturing sphere we see that the most important advantage that MPD has are enormous profits for the manufacturers. Apologists for the widespread use of MPD often bring up such reasons in favour of the MPD as the ability to record emergency modes which is absent in electromechanical relays, the ability interchanging information between the relay units, etc. But all these are advertising gimmicks which have no connection with the reality. Today in the market there are hundreds of versions of microprocessor recorders of the emergency modes capable of transmitting data over

networks, which records emergency modes much better and more fully than MPD. There are information transfer systems, such as SCADA, that have worked well for many years with electromechanical relays. Unlike the relay of protection, microprocessor-based recorders are not capable of affecting the reliability to effect supply and initiate collapses in a network at failures.

In many electric power systems electromechanical relays until now reliably protect many crucial power installations of all voltage classes and other utilities equipment. Sometimes electromechanical protective relays include working in parallel with microprocessor-based relays for maintaining greater reliability of the important electric installations and especially crucial equipment, Fig. 1.

Thus it often appears (especially in cases of complex damages with transition of one kind of short circuit to another) that electromechanical protection works noticeably more quickly than microprocessor-based ones.

In many electric power systems the normalized terms of electromechanical relays work are coming to the end of their lifespan, many of them are in rather sad state and the operational personnel see that transition to MPD is the only alternative for maintaining the working capability of relaying because of the is manufacturers dictatorship (see above). Today in the world market there are simply no electromechanical protection relays being developed using modern materials and technologies, and all leading world protection relay manufacturers have gone over to exclusively manufacturing MPDs. At the same time, progress in the field of new materials, components and



Fig. 1. Fragment of the protection panel at a distance of crucial lines 161 kV containing electromechanical relays of LZ31 type (above) included for working in parallel with an MPD type MiCOM P437 (below)

technologies allow constructing the protective relays on completely new principles in which it is possible to construct, for example, hybrid relays [6]. Unfortunately, today's MPD manufacturers, faced with the increasing functional complication of their products with no significant means to decrease MPD manufacturing costs, are not interested in investing in any alternative kinds of the relays to compete with the profitability of the MPD. And, profitability of the MPD stems not only from the wide difference between the production price and sale price, but also from use of the new production technology (surface mounting of super miniaturized elements and high integrated microcircuits on the multilayered printed-circuit-board) that presupposes no repairing of MPD modules. It is now common to throw out the failed MPD modules made using this technology and replacing it by a new one. Such approach is advertised by MPD manufacturers as high maintainability of their products. But considering that the whole MPD costs 10–15 thousand US dollars consisting of 4–5 of such modules (separate printed-circuit-boards), it becomes clear what the meaning such «maintainability» is to the consumer (that is to electric power systems).

The ageing and service life of would be too expensive protection devices are directly connected with MPD reliability and their costs. For MPD (as well as for electromechanical relays) in many countries the normal life expectation is 20–25 years [8]. Actually, many electromechanical relays are in service about 30 and even 40 years while the computer based devices age much more quickly.

Keep in mind the physical ageing of electronic components, such as electrolytic capacitors (the service life of which does not exceed 7–10 years) and others, and especially the software. So, according to [10] the life expectancy of designed obsolescence (Fig. 2) has sharply decreased from 30 years, for the traditional electromechanical relays to, approximately, 5 years for modern MPD. This means, that MPD users have to spend much greater sums in future for updating of relaying (both hardware and software) and much more often than they had to do earlier when using electromechanical protection.

Despite the problems noted above, the tendencies in relay protection development are such that widespread and increasing use of MPD is made inevitable. The MPD expansion is connected not only with necessity of replacing the old electromechanical relays with finished normative terms, but also with installing in-service new power elements, the last 10–15 years all over the world has seen the gradual transition to relaying of the new generation based on microprocessors. To «push» MPD on the market the manufacturers of these devices, and their numerous sales representatives, are engaged in strong advertising campaigns in eulogizing MPD in every possible way while belittling the advantages of the relay of other types. The basic thesis of these advertising campaigns is the statement that MPD provides very high reliability relaying unlike the

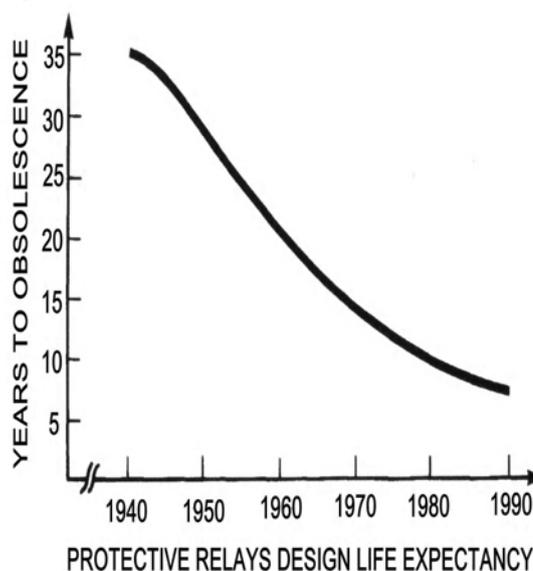


Fig. 2. Protective relays design life expectancy [10]

old and worn out electromechanical relays which are approaching their age limit. At the same time, it is obviously clear that MPD is a complex technical system consisting of many thousand of components. Like any other complex electronic systems, they should have failures and cannot possess absolute reliability, especially if one is to consider the «hothouse» operating conditions in power electrical networks. This being so, one would expect there should be many publications in technical literature considering the technical problems of microprocessor relays. How many such articles considering to MPD problems have you read? It is a significant fact that the overwhelming majority of publications in the technical journals devoted MPD is written by engineers of the MPD manufacturing companies. Naturally enough these publications represent the direct or veiled advertising, and not serious analysis of problems with reliability or other quite real MPD problems which exist in MPD. Since the MPD manufacturers are the advertisers generously paying for significant areas of journal pages, the journals are extremely reluctant to accept articles devoted to the criticism of MPD, and sometimes do not hesitate in declaring this. One gets the feeling that there is a certain taboo imposed on discussion on this theme. If an author happens to break by chance through this «Iron Curtain» [1–4], there is a squall of criticism including personal attacks and even charges of attempts to brake the technical progress.

4. The actual problem with reliability of microprocessor-based protective device

In [4] we have already considered, in detail, problems with the reliability of each of the basic functional units of MPD and have shown, through concrete examples, that the so-called «self-diagnosis» by which 80 % of MPD units are ostensibly captured, is, by and large, an advertising

gimmick and a widespread myth. While it is true that self-diagnosis in MPD can reveal some internal damages, for example, such as failure of the internal power supply or the central processor unit (CPU), how it is possible to speak seriously about this as about a great «advantage» of MPD against of electromechanical relays if in the electromechanical relays there are no internal power supplies and CPUs, that is, there is simply nothing to «self-diagnose»?!

As brought out in [4] the analog input modules (current and voltage transformers), digital inputs, output relays are not captured by a self-diagnosis in MPD. In addition, as shown in [4], the system of a self-diagnosis is constructed on microprocessors and memory elements, so it is an additional source for malfunctions of MPD. Actually the self-diagnostics is not an advantage of MPD against electromechanical relays, and is only a partial compensation for very serious MPD disadvantages: concentration of many protective functions in the single module. For example, only single MPD type M-3430, Fig. 3, provides a full protection of the generator on power station from all possible emergency modes and combined functions of 14 separate protective relays. It is only possible to speculate what would occur if this MPD malfunctions at emergency mode due to fault of any cheap internal component in the power supply or CPU. The high power and very-very expensive generator WOULD STAY WITHOUT ANY PROTECTION!

It is absolutely clear that without self-diagnostics it would be impossible to admit such combined protection device on a gun shot to protection of electrical power installations. So, the self-diagnostics in MPD is a forced measure, and not so beautiful application; therefore to advertise it as a great achievement in relaying is absolutely not justified.

Strangely enough, but opponents of the author’s position do not deny the our position on the problems of the MPD units, rather they concentrated only on criticism of some general opinions and reasons about MPD

reliability, borrowed by the author (with corresponding numerous references) from others who investigated the problem. We decided to carry out our own research by using statistical data on protective relay malfunctions for 2007–2008 of one of the electrical power companies (for ethical reasons we do not publish the name of this company).

Initial statistical data on relay protection failures and calculations are given in Tables 1 and 2.

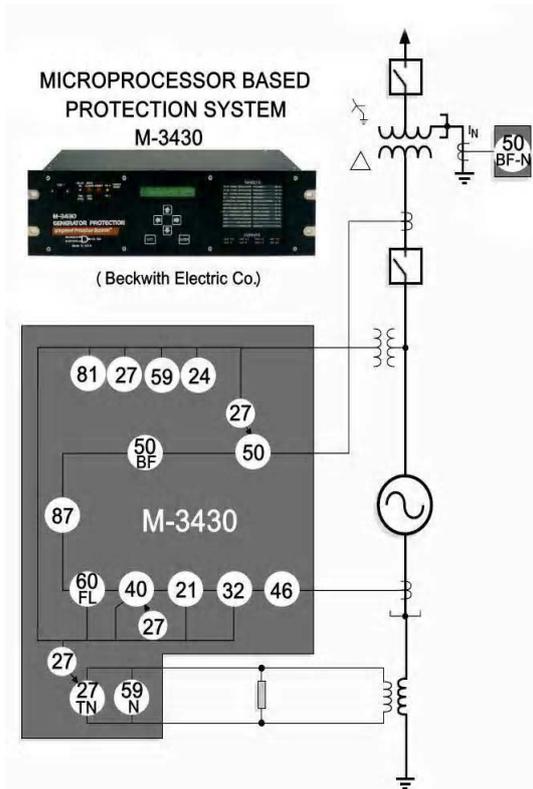


Fig. 3. Structure of the microprocessor-based system M-3430 type (Beckwith Electric Co.) for complete protection of power generator

Table 1 – Failure rate of protective relays of various kinds

Parameter / Relay kind	Electromechanical		Static		Microprocessor-Based	
	2007	2008	2007	2008	2007	2008
Total number of relays in service	2312		2745		3787	
Number of failures	1	4	8	8	43	51
Relative failures ¹ , %	0,043	0,173	0,291	0,291	1,135	1,347
Average relative yearly failures ² , %	0.11		0.29		1.24	
Yearly intensity of failures ³	1		2.6		11.3	

¹Relative failures is relation of failure numbers for some relay kinds to total number of relays of same kind

²Average relative yearly failures is average number of relative failures for two years (2007 and 2008)

³Yearly intensity of failures is ratio of average numbers of relative yearly failures of different kinds of relays to the same parameter of electromechanical relays (defined as 1).

Table 2 – Growth of relay protection failures at usage of new kinds of relays

Start service year	Relay kinds	Total number of relays	Failures					
			Total number		Relative, %		Average relative yearly, %	Failures yearly intensity
			2007	2008	2007	2008		
1970 1975	Electromechanical	2312	1	4	0,043	0,173	0.11	1
1975 1980	Electronic (Static)	2745	8	8	0,291	0,291	0.291	2.6
1990 1995	Microprocessor-based Type 1	1423	19	25	1,33	1,76	1.54	14
2000 2005	Microprocessor-based Type 2	342	6	5	1,75	1,46	1.61	14.6
2003 2005	Microprocessor-based Type 3	49	3	1	6,12	2,04	4.08	37
2005 2008	Microprocessor-based Type 4	10	3	1	30	10	20	182

It is possible to come to two important conclusions (which can seem paradoxical to someone) resulting from our calculations:

1. Yearly intensity of failures for microprocessor-based protective relays is much more than electromechanical.
2. Yearly intensity of failures of protective relays significant by increased over the past few years in connection with usage of new kinds of protective relays. That is, for the past few years the tendency for decrease in MPD reliability, Fig. 4, is taken place.

Actually, there is nothing unusual in these conclusions. According to other statistic data, presented in [11], it is quite visible that electronic (static) relays have three times greater damageability than electromechanical, and microprocessor-based relays have 50 times greater damageability, Table 3.

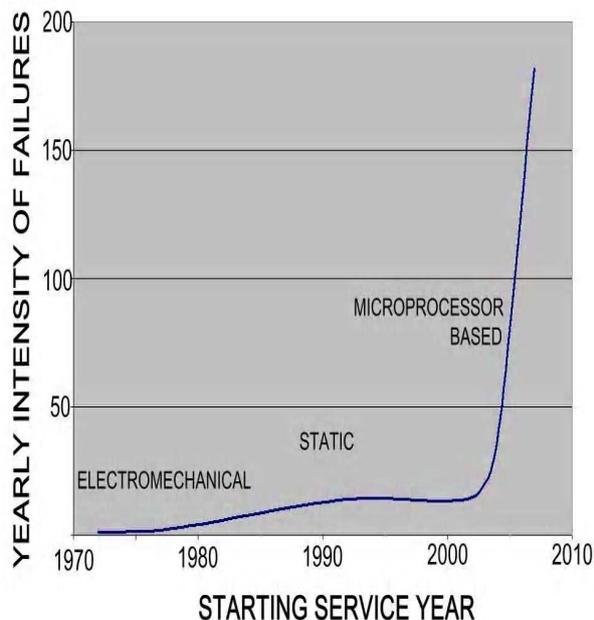


Fig. 4. The tendency of increasing failures for MPDs of new types (according to Table 2)

However, as was noted, insofar as one microprocessor protection incorporates the functions of several relays, this should be taken into account when making a comparative estimation of reliability. For example, if one MPD carries out protective functions of 10 single electromechanical relays, the difference between them in damageability will be only 5 times, not 50. At first sight, such an approach is quite logical; however, it does not consider the fact that MPD contains such common units as power supplies, CPUs, input analogue electronic circuits, etc., faults of which lead to failure of all these 10 virtual relays at once. That is to say, that weight factor of a single fault in a multifunction MPD is more (in our instance: 10 times) than in the single-functional electromechanical relay. For this reason it is possible for us, in order not to complicate the business, to continue the comparison of to compare the failure rate of microprocessor-based and electromechanical relays without taking into account the difference in number of functions carried out by them.

Important factors, such as mistakes of the personnel (that is, so-called «the human factor»), were not considered in programming the MPD and in working with it. Modern multifunction MPD contain hundreds parameters and set points, tens of inputs and outputs, and can generate thousands of various messages. According to [10] «traditional methods of assessing relays by hardware

Table 3 – Typical failure rates of protective relays (according to [11])

Relay kind	Failure rate per year %	Life without obsolescence
Characteristic		
Electromechanical	0,1	> 30
Electronic (Static) single function	0,3	>20
Microprocessor based	5,0	>20

inspection and testing are no longer adequate, since up to 80 % of the engineering design content of contemporary digital relays in the software area». It has therefore become increasingly important for the new generation of relay engineers to have basic knowledge in computers, software, and programming. Absence of such knowledge leads to repeatedly increase of the number of the mistakes related to the «human factor». According to [7] in 2000 the share of guilt of the operational personnel in wrong actions of relay protection in Russia is 61,6 %. Also the explanation of the reasons for this is clear: «Insufficient qualification of the personnel of the power enterprises for service of the equipment on new element base».

An additional aggravation of the condition is the presence in single power system of many types MPDs of different manufacturers with very essential differences from each other of the program interface, programming principles, and testing. All this leads to further complication of the process of transition from electromechanical to microprocessor-based protection. In [12] this is directly underscored: *«the situation becomes complicated also that the purpose of such transition – substantial increase of efficiency of relay functioning – as a rule, is not attained»* and further: *«The percent of wrong acts of modern relay panels and cabinets often appears much more than for the old electromechanical relays»*. This is confirmed in [13]: *«the statistics shows, that use of digital protective relays (DPR), despite of its essentially best technical characteristics in comparison with previous generations of protective devices, has not increased, and in many cases even has decreases in number of correct acts of relaying of power equipment»*.

5. Criterion for estimation reliability (failures) of microprocessor-based protective device

In attempting to carry out a similar analysis on failures of relaying in Russia, we have run into an unforeseen problem: it appears that in Russia a base parameter of a reliability assessment in relaying is the percent of correct (or not correct, i.e., faulty) operations [12], instead of the number of relay damages, as in the case considered above.

So, for example, in [14] it is noted that in the most advanced Russian power company «Mosenergo» (Moscow) at the end of 2001 there were already 2332 MPD units of 4 different firms in service and during 4 years only 8 cases faulty operation of MPD have been registered. On this basis authors conclude that *«it specifies their high reliability and high service characteristics»*. In [7] it is also marked that the percent of their correct operations is accepted as the basic reliability index for MPD.

But why is the reliability of the devices and systems estimated by the frequency of their faulty operations instead of the number of damages of their basic internal elements thereby making impossible proper functioning of the device or system? If the signal about damage of its internal power supply (meaning the incapability of the MPD

to perform its functions) from MPD installed in protection system was received, but there was no emergency mode in a power network controllable by this MPD (that is, there were no faulty actions of the relaying), this event should not be fixed as failure of MPD and not be considered in the analysis of MPD reliability. Only if the internal damage of the MPD coincides with the time of the emergency mode in a protected network this damage would be considered in a reliability assessment; and if does not coincide, it would not be.

A well known definition for Reliability and Failure [15] is:

Reliability: the ability of an item to perform a required function under stated conditions for a stated period of time.

Failure: refers to the state or condition of not meeting a desirable or intended objective, and may be viewed as the opposite of success.

Failure Rate: the number of failures experienced or expected for a device divided by the total equipment operating time.

However, accident in a power system is the RESULT of relay protection failure, yet the Reliability and Failure definition doesn't even take into account the RESULT stemming from low reliability or high failure rate. It is just not clear why the failure of a single protective unit is taken into consideration only in the case that it is the RESULT of the accident in the power system without any consideration of the accident itself.

It is difficult to see the logic in such approach. Such an approach simply does not lead to the proper analysis of the protective relays failures, similar to the analysis that we have used above.

In our opinion, in the estimation of the relay of protection it is necessary to consider three types of events:

1. The damages (D) of the relay which were not connected with faulty actions of the relaying, but require repair or replacement of the failed elements, unit and modules.

2. Faulty actions (FA) of a relay that is improper operations in the absence of emergency mode or inability to operate (or faulty operation also) in the emergency mode.

3. Personnel mistakes (PM) connected with operation, testing or programming of the relay. Keeping in mind the personal actions that have an influence on the relay functioning properly, but detected before relay improper action occurs.

All these components should be taken into account, in our opinion, when calculating the generalized normalized criterion of failures F_{Σ} of relaying:

$$F_{\Sigma_i} = \left(\frac{F_{D_i} + F_{FA_i} + F_{PM_i}}{N_i} \right) \times 100\%$$

Where $F_{D_i}, F_{FA_i}, F_{PM_i}$ – number of failures of each type for the relay of i kind for the considered period of time; N_i – number of the relay i kind, being in operation during the considered period of time.

The suggested parameter could serve as the tool for an estimation of the quality of the relay protection when analyzing a situation and decision-making.

6. Summary

In summary, it is desirable to cite the well known expert in the field of MPD, former leading expert of All-Russian Relay Research, Design & Technology Institute (VNIIR), who worked for a long time at Siemens, Doctor of Science (DSc), prof. M. Shneerson who in the monograph [16] on p. 491 writes:

«In itself increasing technological level of protective relays not necessarily leads to increase of efficiency in reaction on incipient faults. So, for example, become out-of-date electromechanical and partly electronic static protective relays at a correct choice of protective functions and setting will certainly provide more effective protection of a network, than microprocessor based without enough proved choice of the specified parameters»

And further, on p. 508:

«As shows a practice, the percent of the wrong actions at usage of digital protective relays, at an initial stage essentially does not decrease, and in some cases even increases».

And in summary, on p. 522:

«Despite of essentially higher technical perfection of the digital protective relays their real operational efficiency, especially at initial stages, appears below, than at protection devices of the previous generation».

REFERENCES

1. Gurevich, V. Microprocessor Protection Relays: New Prospects or New Problems? / V. Gurevich // Electr. Engineering and Electromechanics. – 2006. – No 3. – P. 18–26.
2. Gurevich, V. I. Microprocessor Protective Relays: Alternative View / Gurevich V. I. // «Energo-Info». – 2006. – No 4 (30). – P. 40–46.
3. Gurevich, V. I. How to Equip a Relay Protection: Opinions of Russian Experts and a View from Outside / V. I. Gurevich // Electric Power's News. – 2007. – No 2. – P. 52–59.
4. Gurevich, V. Reliability of Microprocessor-Based Relay Protection Devices – Myths and Reality / V. Gurevich // Serbian Journal of Electr. Engineering. – 2009. – No 1 (vol. 6).
5. Gurevich, V. I. Answer from author of the article: «Reliability of Microprocessor-Based Relay Protection Devices – Myths and Reality» on critical review by O. Zacharov, Published on the Web Portal «All about relay protection» (<http://www.rza.org.ua/article/a-64.html>).
6. Gurevich, V. Hybrid Reed-Solid-State Devices are a New Generation of Protective Relays, / V. Gurevich // Serbian Journal of Electr. Engineering. – 2007. – No 1 (vol. 4) – P. 85–94.
7. Konovalova, E. V. Main results of relay protection devices maintains in power systems in the Russian Federation / E. V. Konovalova // Relay protection and automatics of power systems : Collection of reports of XV scientific and technical conference. – Moscow, 2002 (Rus.).
8. General technical requirements on microprocessor based protective devices and automatics for power systems – ПД 34.35.310-97, Moscow, 1997.
9. The review on article by O. Zaharov «The combined power supplies. Characteristics of output circuits» / O. Zaharov // Published in the magazine «Electric Power's News». – 2009. – No 2.
10. Heising, C. R. Digital Relay Software Quality / C. R. Heising, R. C. Patterson, E. Y. Weintraub // General Electric, GER-3660.
11. Heising, C. R. Reliability Expectations for Protective Relays. Developments in Power Protection / C. R. Heising, R. C. Patterson // Fourth International Conference in Power Protection, 11–13 Apr., 1989, Edinburgh, UK.
12. Shalin, A. I. About efficiency of new relay protection devices / A. I. Shalin // Power and industry of Russia (the selected publications), vol. 203.
13. Shneerson, E. M. Operational efficiency of relay protection devices: a reality and abilities / E. M. Shneerson // Energoexpert. – 2007. – No 4–5. – P. 70–77.
14. Kudryashov V. N. Experience with using a microprocessor based protection in Mosenergo / V. N. Kudryashov, V. V. Balashov, A. G. Korolyov, A. V. Sdobin // Relay protection and automatics of power systems : Collection of reports of XV scientific and technical conference. – Moscow, 2002.
15. Ward, S. Improving Reliability for Power System Protection / Ward, T. Dahlin, W. Higinbotham // 58th Annual Protective Relay Conference, Atlanta, GA, April 28–30, 2004.
16. Shneerson, E. M. Digital relay protection / E. M. Shneerson. – Energoatomizdat, 2007. – 548 p.

Стаття надійшла до редакції 1.06.2009.

Гуревич В.

Еще раз о надежности микропроцессорных устройств релейной защиты

Статья является продолжением цикла публикаций автора, посвященных надежности микропроцессорных устройств релейной защиты. Приведенные в статье статистические данные, полученные автором, совпадают с данными других авторов и подтверждают более высокую надежность электромеханических реле по

сравнению с микропроцессорными. Отмечен недостаток применяемого критерия оценки надежности реле защиты и предложен обобщенный критерий для такой оценки.

Ключевые слова: микропроцессорные устройства релейной защиты, надежность, релейная защита, срок эксплуатации, интенсивность отказов, относительное количество поврежденных.

Гуревич В.

Ще раз про надійність мікропроцесорних пристроїв релейного захисту

Стаття є продовженням циклу публікацій автора, присвячених надійності мікропроцесорних пристроїв релейного захисту. Наведені у статті статистичні дані, отримані автором, збігаються з даними інших авторів і підтверджують більш високу надійність електромеханічних реле у порівнянні з мікропроцесорними. Відзначено недолік критерію оцінки надійності реле захисту, який зазвичай застосовується, і запропоновано узагальнений критерій для такої оцінки.

Ключові слова: мікропроцесорні пристрої релейного захисту, надійність, релейний захист, термін експлуатації, інтенсивність відмов, відносна кількість пошкоджень.

УДК 621.51: 681.5.015

Э. М. Кулинич, В. В. Зиновкин д-р техн. наук
Запорожский национальный технический университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ДОЗИРОВАНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРИГОТОВЛЕНИЯ ГАЗОБЕТОНА

Предложены математическая и компьютерная модели системы автоматизированного управления многокомпонентным дозированием технологического процесса приготовления газобетона совместно с симуляцией режимов работы на базе ПЛК и пакетов (PlcSim, Step-7 и WinCC Flexible) фирмы Siemens. Это позволяет разработать инженерные методы снижения простоев исполнительных механизмов и повысить эффективность технологической линии. Приведено моделирование многокомпонентного процесса дозирования жидких составляющих газобетона.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, дозирование жидких компонентов, многопараметрическая автоматизированная система управления технологическим процессом, газобетон.

Введение. Технологические линии производства газобетонов, как объекты автоматизированного управления, являются многомерными, с линейными и нелинейными взаимосвязями между параметрами различной физической природы. В отдельные моменты времени это приводит к несогласованности режимов исполнительных механизмов и работе электротехнического и электротехнологического оборудования в режимах холостого хода. Это является причиной снижения эффективности технологической линии и качества выпускаемой продукции, непроизводительных потерь электроэнергии и аварийных ситуаций. Для достижения более эффективного управления многопараметрическим технологическим процессом приготовления газобетонов необходимо учитывать возможные несогласованности между каналами управления в процессе дозирования и сократить технологические простои исполнительных механизмов.

Для повышения эффективности и оптимального управления технологическим процессом необходимо исследовать влияние различных факторов и возможных режимов на динамику процесса дозирования технологической смеси газобетона [1]. Для решения этой задачи целесообразно использовать интегральный критерий оптимальности многопараметрической системы автоматизированного управления [1–5]. Его сущность состоит в том, что управление осуществляется по трем обобщенным параметрам. Каждый такой параметр состоит из совокупности сигналов одноименной физической природы и их соответствующего количества [1–5]. Такой методологический подход использовался в системе многопараметрического автоматизированного управления многокомпонентного дозирования технологической линии приготовления газобетона [3, 4]. Технологический процесс состоит из ряда операций: приготовления смеси из сухих и жидких компонентов,

а также использования отходов после порезки готовой продукции. Наиболее ответственным является процесс дозирования сухих и жидких компонентов смеси газобетона.

Целью настоящей работы является разработка математической и компьютерной моделей оптимального автоматизированного управления дозированием жидких компонентов смесей многопараметрического технологического процесса приготовления газобетона.

Материал и результаты исследования. Математическая и компьютерная модели эффективного управления технологическим процессом приготовления газобетона должны удовлетворять условиям оптимального сочетания совокупности параметров различной физической природы. При этом обобщенный критерий оптимальности должен удовлетворять следующему интегральному функционалу [1, 2]:

$$\xi(x, t) = \int_{t_1}^{t_2} \zeta(x, t) \cdot q(x, t) \cdot \rho(x, t) dt, \quad (1)$$

где $\zeta(x, t) = \sum_{i=1}^{139} \alpha_i(t)$ – совокупность сигналов управления;

$q(x, t) = \sum_{j=1}^{37} \gamma_j(t)$ – контролируемые параметры;

$\rho(x, t) = \sum_{k=1}^{151} \chi_k(t)$ – совокупность сигналов состояния исполнительных механизмов; x – параметр, зависящий от состояния техпроцесса.

Структурная схема взаимосвязей между обобщенными управляющими, контролирующими параметрами и параметрами состояния исполнительных механизмов многопараметрической системы автоматизированного управления технологическим процессом приготовления газобетона показана на рис. 1, а на рис. 2 показан многокомпонентный дозатор. Оптимизационный программно-аналитический поиск наиболее эффективного управления технологической линией приготовления газобетона осуществляем по этим обобщенным параметрам. Такими параметрами являются: непосредственно управляющие воздействия на соответствующие исполнительные механизмы; сигналы, характеризующие состояние технологического процесса и оборудования (контролирующие параметры); совокупность сигналов состояния исполнительных механизмов. Эффективность достижения оптимального управления зависит от степени согласованности соответствующих параметров, точностных характеристик датчиков, инерционности исполнительных механизмов, контроля потоков сухих и жидких компонентов газобетонной смеси. При этом процесс дозирования компонентов газобетона и является одним из определяющих. Он зависит

от оптимального управления и формирует эффективность и качество конечной продукции согласно (1). Оптимальное управление обеспечивает минимальное

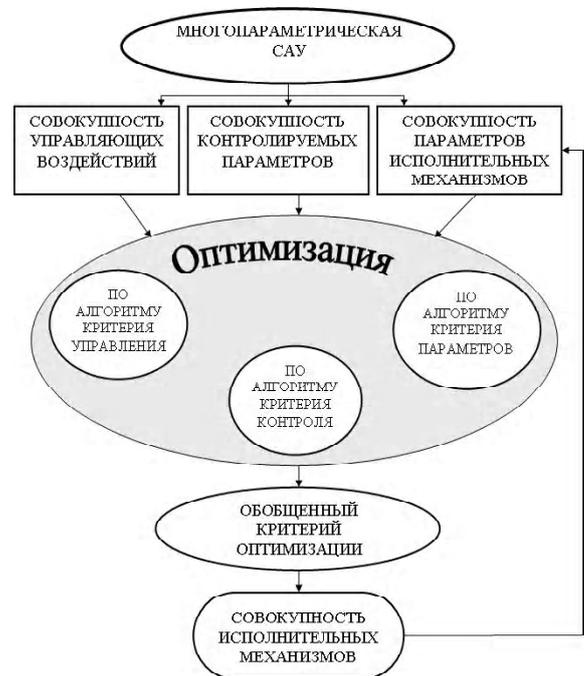


Рис. 1. Структурная схема взаимосвязи между параметрами многопараметрической системы автоматизированного управления технологическим процессом приготовления газобетона

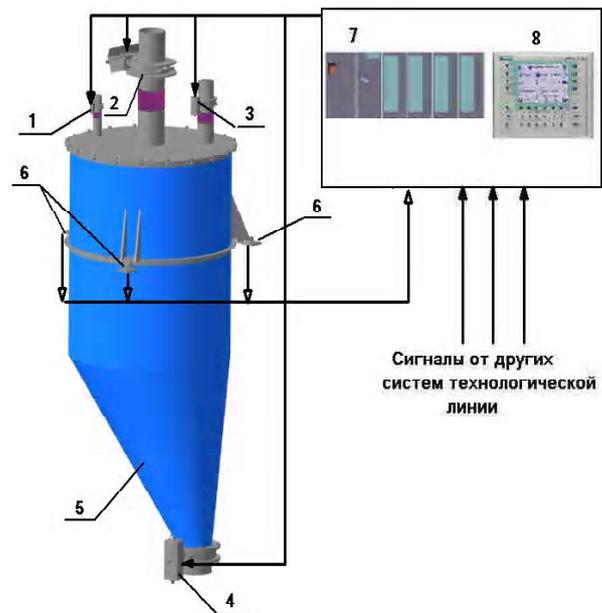


Рис. 2. Многокомпонентный дозатор жидких составляющих компонентов и шламов технологической линии приготовления газобетона и взаимосвязи с системой управления

время дозирования компонентов в пределах заданной точности

$$t_{\xi(x,t)} = \sum_{i=1}^3 t_{iД} \rightarrow \min, \quad \delta_{\min} \leq \delta \leq \delta_{\max}$$

где δ – точность дозирования, δ_{\min} , δ_{\max} – заданные пределы точности дозирования, $t_{iД}$ – время дозирования i -го компонента.

При производстве газобетонов используется способ весового дозирования жидких и сухих компонентов. Следует отметить, что на практике используется процесс либо многокомпонентного дозирования (в один общий дозатор несколько компонентов), либо однокомпонентное дозирование (в отдельный дозатор один компонент). В данной статье рассматривается управление многопараметрическим процессом многокомпонентного дозирования жидких компонентов на примере дозатора шламов. В технологической линии этот дозатор используется для дозирования трёх компонентов: песчаного и возвратного шламов и воды обмыва. Внешний вид и расположение исполнительных механизмов дозатора, а также каналы управления и совокупность контролируемых параметров показаны на рис. 2. Здесь приняты следующие обозначения

основных элементов системы техпроцесса: трёхпозиционные заслонки (1, 2, 3); выходная двухпозиционная поворотная заслонка (4); бункер дозатора (5); тензометрические датчики с узлами встройки (6); контроллер управления (7); устройство операторного контроля (8). Компоненты дозируются поочередно: обычно сначала песчаный, затем возвратный шлам, после этого дозируется вода обмыва. Каждый компонент дозируется своей трёхпозиционной заслонкой из соответствующей расходной ёмкости. Они образуют один канал потока компонентов газобетонной смеси. Применительно к решаемой задаче необходимым условием является использование текущей информации о динамике наполнения дозатора компонентами газобетонных смесей. Эффективное дозирование достигается путем нахождения оптимального момента переключения исполнительных механизмов в соответствующие позиционные состояния заслонок. Оценка количества жидких компонентов смеси в дозаторе осуществляется по весовым показателям. Для измерения веса используются тензометрические датчики (6).

Структурно-логическая схема математической модели многокомпонентного дозирования технологического процесса приготовления газобетона показана на рис. 3. Основными элементами этой модели являются узлы электропневмопривода заслонок дозатора и технологических емкостей, структурно-логическая

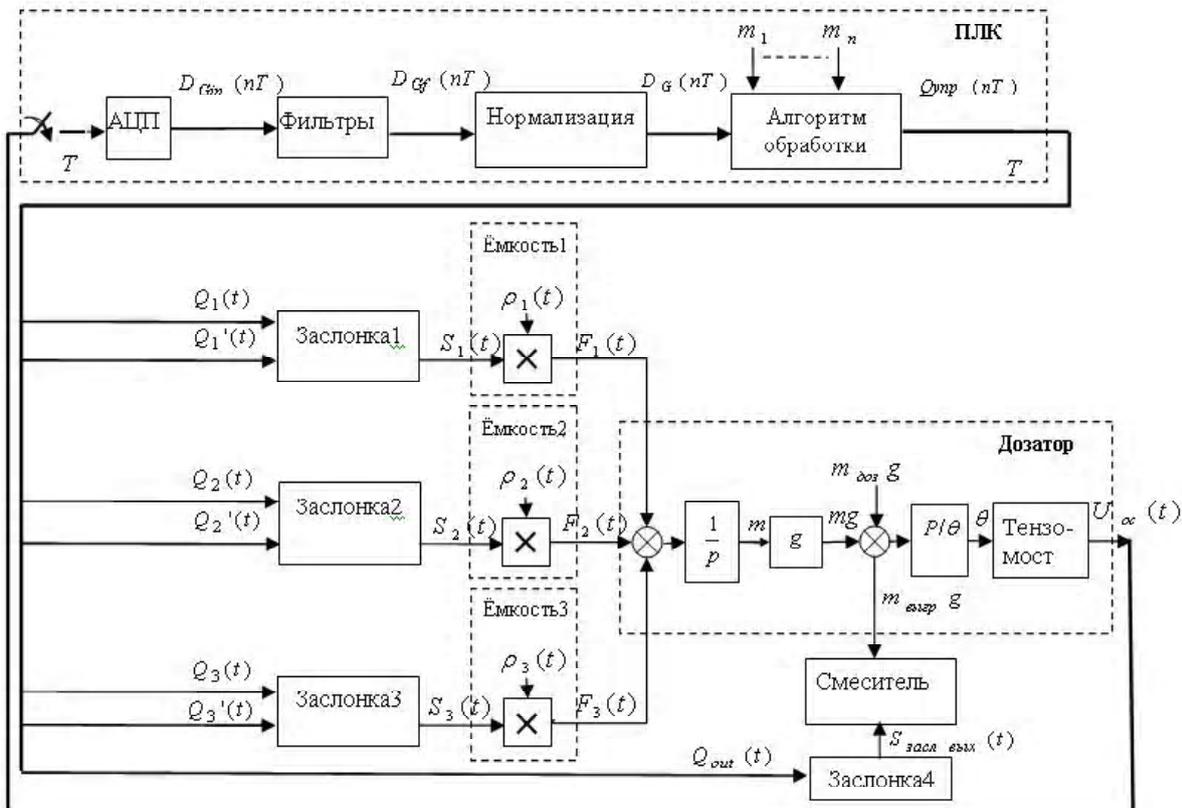


Рис. 3. Структурно-логическая схема математической модели многокомпонентного дозирования технологической линии

модель ПЛК и непосредственно многокомпонентный дозатор технологической линии приготовления газобетона. Предлагаемая математическая модель имеет существенные отличия от разработанной ранее для дозатора сухих компонентов [7]. Отличия состоят в использовании в качестве исполнительных механизмов пневмоприводов. Для набора компонентов используются трехпозиционные заслонки. Управляющие воздействия осуществляются только дискретными сигналами $Q_i(t)$. Назначение и функции остальных блоков соответствуют своему прямому назначению, как в [7].

На рис. 3. суммарный вес дозатора получается последовательным преобразованием изменяющегося потока жидких компонентов газобетонной смеси в весовые показатели в дозаторе и представляет собой сигнал обратной связи, который поступает для дальнейшего анализа в блок ПЛК.

На рис. 3 приняты следующие обозначения блоков: «ПЛК» – программируемый логический контроллер, осуществляющий анализ информации обратных связей и формирующий сигналы управления, оптимального для данного временного интервала; блоки «Заслонка i » предназначены для обеспечения поступления i -го компонента смеси; блоки «Емкость» формируют сигнал, пропорциональный потоку дозируемого компонента из расходной емкости. Они отображают пропускную способность заслонок и плотность дозируемого компонента. Блок «Дозатор» отображает степень загрузки дозируемыми компонентами и формирует сигнал обратной связи $U_{oc}(t)$, пропорциональный суммарной массе компонентов в дозаторе, согласно следующему выражению:

$$G(t) = G_{\text{доз}} + \sum_{i=1}^3 \int_{t_1}^{t_2} F_i(t, q) dt - \int_{t_1}^{t_2} F_{\text{выгр}}(t, q) dt = \\ = m_{\text{доз}} \cdot g + \sum_{i=1}^3 m_i(t) \cdot g - m_{\text{выгр}}(t) \cdot g, \quad (2)$$

где q – параметр, характеризующий особенности системы управления использующихся управляющих и исполнительных устройств и механизмов, i – определяет количество дозируемых компонентов, поступающих в один дозатор, α – угол открытия заслонки, $F_i(t, q)$ – поток соответствующего компонента, зависящий от пропускной способности заслонки. Он пропорционален площади открытия заслонки $S_i(t, q, \alpha)$ и плотности дозируемого компонента ρ_i

$$F_i(t, q) = S_i(t, q, \alpha) \cdot \rho_i \cdot Q_i(t). \quad (3)$$

Масса компонента в дозаторе m_i определяется по усилию P , которое создается массами компонентов

$\sum m_i$ и пустого дозатора $m_{\text{доз}}$, пропорциональному весу дозатора с компонентами газобетонной смеси $G(t)$. Под воздействием этого усилия происходит деформация $\theta(t)$ механической части системы тензодатчиков, в результате чего генерируется сигнал обратной связи $U_{oc}(t)$. Сигнал $U_{oc}(t)$ поступает на вход блока аналогового ввода ПЛК. Этот блок содержит АЦП, который с периодом квантователя T преобразует сигнал обратной связи $U_{oc}(t)$ из аналоговой формы в 16-разрядный цифровой код $D_{Gin}(nT)$. Этот цифровой сигнал содержит как полезный сигнал о весе дозатора, так и всевозможные шумы и помехи различного происхождения. Для выделения полезного сигнала в блоке ПЛК производится цифровая обработка сигнала в следующей последовательности: сначала осуществляется фильтрация и формирование сигнала $D_{Gf}(nT)$. Затем выполняется нормализация для отображения веса компонентов смеси в килограммах $D_G(nT)$. На основании последнего $D_G(nT)$, текущего состояния техпроцесса x , задания набора материалов m_i и совокупности сигналов состояния исполнительных механизмов $\rho(x, t)$ формируются соответствующие сигналы управления

$$\zeta(x, t) = u(x, q(x, t), \rho(x, t), t) = u(x, G(t), \rho(x, t), t). \quad (4)$$

Применительно к рассматриваемому техпроцессу, для трёхкомпонентного дозирования, уравнение (4) примет следующий вид:

$$u(x, G(t), \rho(x, t), t) = \sum_{i=1}^3 u_i(x, G(t), \rho(x, t), t) + \\ + u_{\text{вых}}(x, G(t), \rho(x, t), t). \quad (5)$$

Уравнение (5) представляет собой совокупность выходных цифровых сигналов $Q_{\text{упр}}(nT)$, генерируемых ПЛК. Они используются для управления заслонками набора компонентов смеси в дозатор, а также при выгрузке газобетонной смеси. Взаимосвязи между рассмотренными параметрами описываются следующим выражением:

$$Q_{\text{упр}}(nT) = \sum_{i=1}^3 (Q_i(t) + Q_i'(t)) + Q_{\text{out}}(t). \quad (6)$$

В выражении (6) $Q_i(t)$ – сигнал управления привода заслонкой? грубого набора i -го компонента смеси. В этом режиме открытие и закрытие заслонок осуще-

ствляется в соответствии логическому состоянию, определяемому следующими условиями:

$$Q_i(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } G_i(t) < (G_{i3} - \Delta G_{iT}) \\ 0, & \text{если } G_i(t) \geq (G_{i3} - \Delta G_{iT}) \end{cases} \quad (7)$$

Сигнал управления заслонкой точного набора $Q_i'(t)$ i -го компонента смеси осуществляется в соответствии следующим условиям логического состояния (см. рис. 4):

$$Q_i'(t) = \begin{cases} 0, & \text{если } [G_i(t) > (G_{i3} - \Delta G_{iупр})] \vee \\ & \vee [G_i(t) < (G_{i3} - \Delta G_{iT})] \\ 1, & \text{если } (G_{i3} - \Delta G_{iT}) \geq G_i(t) \geq (G_{i3} - \Delta G_{iупр}) \end{cases} \quad (8)$$

Согласно рис. 4 в (7) и (8) приняты следующие обозначения: ΔG_{iT} – разность веса от заданного веса компонента G_{i3} , при которой происходит переход в режим точного дозирования i -го компонента смеси, в (8) $\Delta G_{iупр}$ – величина веса (упреждение) от заданного веса G_{i3} , при которой производится закрытие заслонки в режиме точного дозирования i -го компонента газобетонной смеси.

Компьютерная модель многопараметрической системы дозирования построена в редакторе Simulink пакета Matlab. При этом использована математическая модель [1, 2]. Режимы ПЛК симулированы в связке пакетов фирмы Siemens: PlcSim, технологической линии приготовления газобетона для дозирования трёх компонентов показана на рис. 5. Модель позволяет отслеживать изменение потока компонентов газобетонной смеси и веса дозатора $G(t)$ в зависимости от функции параметров системы управления, определяемых программой ПЛК.

Данная схема позволяет моделировать динамические режимы системы управления в соответствии фазе техпроцесса. Кроме этого, она позволяет обрабатывать режимы при последовательной дозировке. Моделирование выполнялось в следующей последовательности.

На первом этапе имитировалась загрузка дозатора 200 кг прямого шлама, а затем 180 кг обратного шлама. После выгрузки шламов производился набор и выгрузка 180 кг воды для обмыва. Результаты моделирования показаны на рис. 6, где индексы а, в и е соответствуют параметрам ($Q1(t), Q2(t), Q3(t)$). Они представляют дискретные сигналы управления заслонками, соответственно для грубого дозирования прямого, обратного шлама и воды обмыва; б, з и ж ($Q1'(t), Q2'(t), Q3'(t)$) – дискретные сигналы управления заслонками для точного дозирования соответственно прямого, обратного шлама и воды обмыва; з) $G(t)$ – текущее значение веса дозатора (на рис. 5 этот сигнал подается на вход контроллера IW322). Грубое и точное регулирование дозирования компонентов осуществлялось путем изменения соответствующих сигналов управления ПЛК.

Анализ результатов исследований показал, что при изменении режимов дозирования наблюдается инерционность работы исполнительных механизмов, обусловленная особенностями их динамических характеристик, а также особенностями протекания техпроцесса. В связи с этим весовые показатели жидких компонентов в дозаторе изменяются с задержкой до 0,5 с относительно подачи сигналов управления на исполнительные механизмы.

После стабилизации режимов исполнительных механизмов процесс заполнения дозатора жидкими компонентами смеси газобетона возрастает по линейному закону до момента соответствующего наполнения. После отключения исполнительных механизмов в течение 0,5 с вес дозатора стабилизируется. Это сопро-

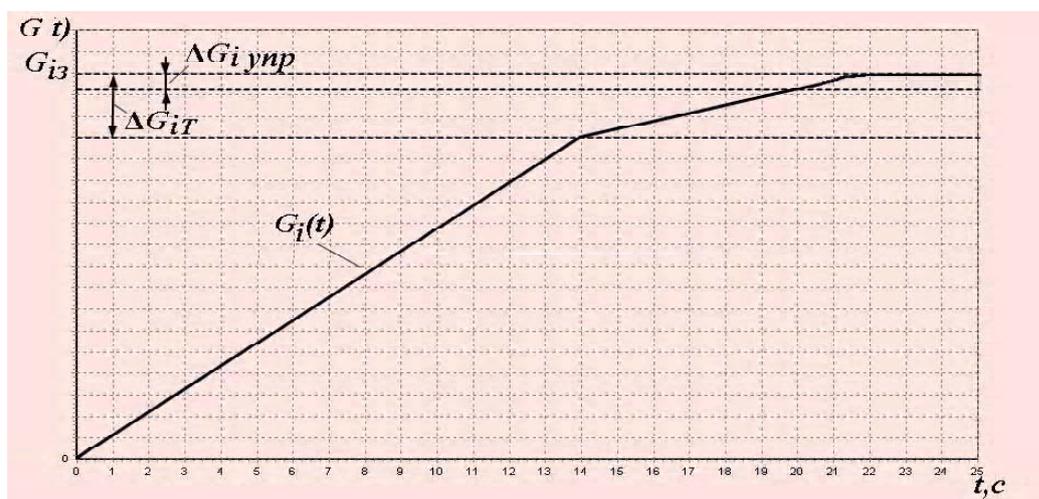


Рис. 4. Диаграмма процесса дозирования компонентов газобетонной смеси с помощью трёхпозиционной заслонки

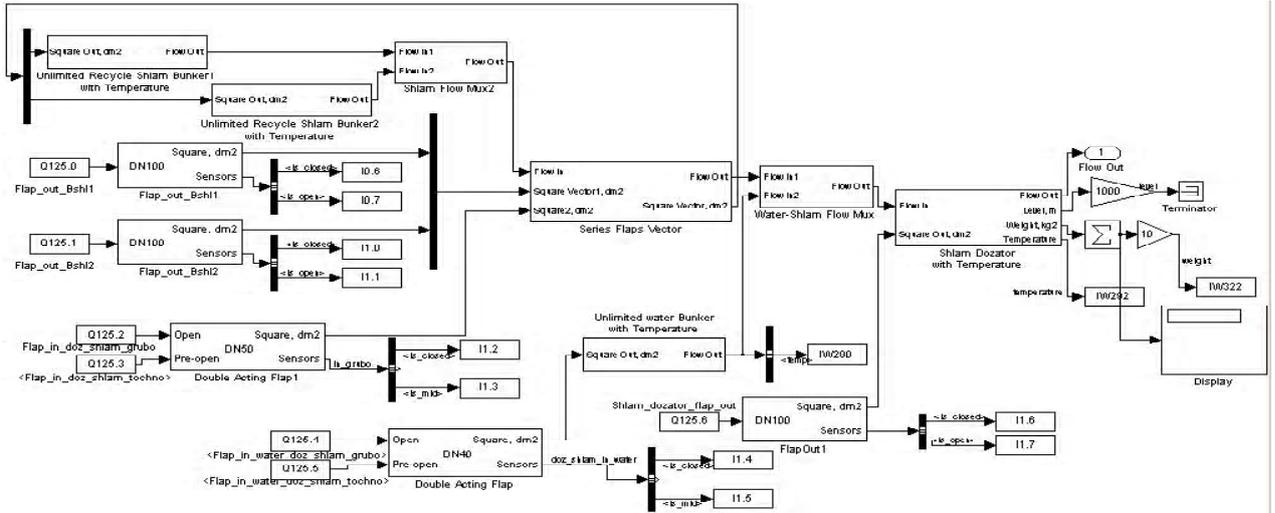


Рис. 5. Структурно-логическая схема компьютерной модели многокомпонентного дозатора газобетонной смеси технологической линии

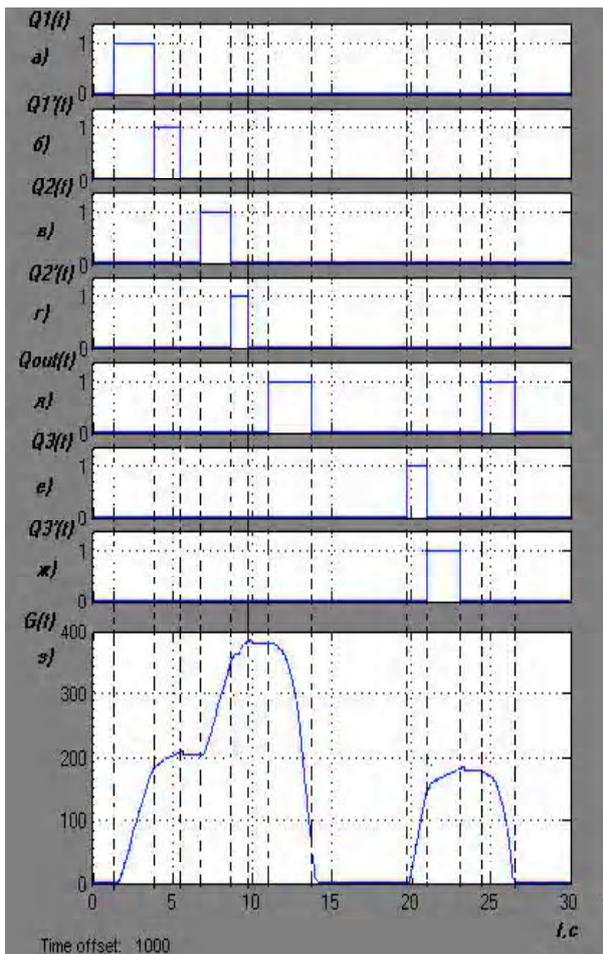


Рис. 6. Результаты моделирования динамических режимов дозатора

вождается некоторым перерегулированием веса, а стабилизация достигается при меньшем значении. Это поясняется тем, что после окончания набора смеси на тензодатчики действует вес остатков компонентов, падающих в дозатор после закрытия заслонок. Ввиду того, что плотность шламов больше плотности воды, в теппроцессе наблюдается большее перерегулирование на этапе дозирования шламов. Эти перерегулирования носят систематический характер и зависят от плотности материалов, высоты падения и равномерности потока дозируемого материала. Снижение влияния перерегулирования на точность дозирования производится программным путём с помощью введения в самонастраивающейся системе коррекции упреждения работы исполнительных механизмов. Как видно на рис. 6, з, смоделированная система дозирования обеспечила отработку задания (набор 200 кг прямого и 180 кг обратного шламов, а затем 180 кг воды) с точностью до 1%. Приведённые результаты согласуются с экспериментальными данными с достаточной для инженерных задач точностью. Как видно из рис. 4 и рис. 6, моделирование позволяет оперативно отыскивать оптимальное время перехода ΔG_{IT} для каждого компонента смеси и обеспечивает их дозирование с точностью до 1%.

Выводы. 1. Разработаны математическая и компьютерная модели оптимального автоматизированного управления многокомпонентным дозированием компонентов газобетонных смесей технологической линии приготовления газобетона в среде Simulink пакета Matlab совместно с симуляцией работы системы управления на базе ПЛК и пакетов (PlcSim, Step-7 и WinCC Flexible) фирмы Siemens.

2. Предложенная методика позволяет моделировать возможные режимы исполнительных механизмов в соответствующих технологических процессах на стадиях проектирования и наладки технологической линии,

а также обрабатывать алгоритмы оптимального поиска момента перехода в режим точного дозирования ΔG_{IT} соответствующих компонентов, что сокращает время дозировки и повышает эффективность технологической линии.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Зиновкин, В. В.* Многопараметрическая система автоматизированного управления технологическим процессом приготовления газобетона / Зиновкин В. В., Кулинич Э. М. // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2009. – №3/3(39). – С. 38–43.
2. *Зиновкин, В. В.* Многокритериальная автоматизированная система управления технологическим процессом приготовления газобетона [Текст] / В. В. Зиновкин, Э. М. Кулинич // Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту (ISDMCI-2009) : міжнар. конф., 19–22 травня 2009 р. : тези докл. – Євпаторія, 2009. – Т. 2. – С. 608–611.
3. *Зиновкин, В. В.* Самонастраивающаяся система оптимизации автоматизированного управления многопараметрическим технологическим процессом приготовления газобетона / В. В. Зиновкин, Э. М. Кулинич // Автоматизація технологічних і бізнес процесів. – 2010. – № 2. – С. 39–42.
4. *Зиновкин, В. В.* Критерии оптимального управления многопараметрическим технологическим процессом приготовления газобетона / В. В. Зиновкин, Э. М. Кулинич, В. И. Бондаренко, Е. В. Васильева // «Электротехнические комплексы и системы» междунар. конф., 21–22 октября 2010 г.: тезисы докл. – Комсомольск-на-Амуре, 2010. – Т. 3. – С. 57–64.
5. *Зиновкин, В. В.* Критерии оптимального управления многопараметрическим технологическим процессом приготовления газобетона / В. В. Зиновкин, Э. М. Кулинич // Радиоелектроніка, інформатика, управління. – № 1(22). – 2010. – С. 158–163.
6. *Зиновкин В. В.* Моделирование автоматизированного электропривода дозатора технологической линии приготовления газобетона / Зиновкин В. В., Кулинич Э. М. // Електротехніка та електроенергетика. – 2009. – № 2. – С. 49–53.
7. *Зиновкин, В. В.* Моделирование автоматизированного управления двухкомпонентным дозированием многопараметрического процесса приготовления газобетона / В. В. Зиновкин, Э. М. Кулинич / Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 6 (65) – Дніпропетровськ, 2009. – С. 53–64.
8. *Зиновкін, В. В.* Моделювання режимів дозування системи автоматизованого керування багатопараметричним технологічним процесом / В. В. Зиновкін, Е. М. Кулинич // Вісник КДПУ. – Кременчук: КДПУ, 2010. – Вип. 3/2010 (62). Ч. 1, С. 146–148.
9. *Зиновкин, В. В.* Моделирование процесса утилизации отходов в технологии производства газобетона / В. В. Зиновкин, Э. М. Кулинич // Стратегія якості у промисловості і освіті: міжнар. конф., 6–13 червня 2009 р.: тези докл. – Варна, Болгарія, 2009. – Т. 2. – С. 176–179.
10. *Кулинич, Э. М.* Методологические основы моделирования системы управления технологическим процессом производства газобетона / Э. М. Кулинич, С. Е. Шаповалов // Стратегія якості у промисловості і освіті : міжнар. конф., 4–11 червня 2010 р. : тези докл. – Варна, Болгарія, 2010. – Т. 1(2). – С. 231–234.

Стаття надійшла до редакції 03.06.2011.

Після доробки 12.03.11.

Кулинич Е. М., Зиновкін В. В.

Моделювання оптимального керування процесом дозування багатокomпонентного технологічного процесу приготування газобетону

Запропоновано математичну і комп'ютерну моделі системи автоматизованого керування дозуванням багатокomпонентного технологічного процесу приготування газобетону спільно з симуляцією режимів роботи на базі ПЛК і пакетів (Plcsim, Step-7 і WINCC Flexible) фірми Siemens. Це дозволяє розробити інженерні методи зниження простоїв виконавчих механізмів і підвищити ефективність технологічної лінії. Наведено моделювання багатокomпонентного процесу дозування рідких складових газобетону.

Ключові слова: комп'ютерне моделювання, дозування рідких складових, багатопараметрична автоматизована система керування технологічним процесом, газобетон.

Kulynych E.M., Zinovkin V.V.

Modelling of optimum batching control in the multicomponent technological process of aerocrete preparation

The authors propose the mathematical and computer models of the automatic batching control system for the multicomponent technological process of aerocrete preparation simultaneously with operating modes simulation based on PLC and Siemens packages (Plcsim, Step-7 and WINCC Flexible). That permits to develop engineering approaches for decreasing actuators downtime and increasing the processing line efficiency. Modeling of aerocrete liquid components batching is described.

Keywords: computer modeling, liquid components batching, multiparametric automatic control system, aircrete.

II. ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.316

А. А. Гилёв, канд. техн. наук, В. С. Миронов

Севастопольский национальный технический университет

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПОДВИЖНОГО КОНТАКТА НА ДУГОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В МЕЖКОНТАКТНОМ ПРОМЕЖУТКЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

Рассматривается влияние скорости перемещения подвижной части электрических аппаратов, включая подвижный контакт, на процессы дугогашения в межконтактном промежутке при коммутации электрических цепей среднего напряжения.

Ключевые слова: электрический аппарат, вакуумный выключатель, межконтактный промежуток, скорость перемещения.

В настоящее время в выключателях среднего напряжения скорость перемещения подвижной части аппарата вместе с контактом лежит в пределах 0,8...1 м/с, что обусловлено низким быстродействием штатно выпускаемых приводов.

В вакуумных выключателях скорость разведения контактов ограничена паспортными данными вакуумных дугогасительных камер, то есть скорость не должна превышать 1,8...2 м/с (см. табл. 1).

Это ограничение обусловлено конструкцией сильфона, отделяющего внутреннюю вакуумную часть камеры от атмосферы. При эксплуатации фидерных выключателей на железных дорогах с номиналами 27 кВ и 1600 А такое быстродействие не удовлетворяет требованиям отключения подвижного состава по фактору времени, поскольку при разведении контактов дуга,

возникающая при между ними, нередко загорается вторично, что приводит к повышенному износу контактов камеры и серьезным повреждениям отключаемой нагрузки. Исследования, проведенные рядом авторов [1], [2] показывают, что повышение быстродействия выключателей приводит к улучшению условий коммутации, а также к более благоприятному режиму отключения нагрузки. В связи с этим нами предложено использовать сильфон с повышенной допустимой скоростью его перемещения.

В качестве примера в табл. 2 приведены данные по некоторым типам сильфонов для различных ВДК.

Здесь D – внешний диаметр сильфона; S – толщина стенки; t – шаг гофрировки;

Превышение допустимых скоростей приводит к деформации первых и последних гофров сильфона и снижению его срока службы. На рис. 1 представлены две типовые конструкции сильфонов: a – катаная, b – сварная. Для очень высоких скоростей перемещения подвижных частей ВДК необходимо использовать сварную

конструкцию сильфонов, для которых $\frac{\Delta l}{l} \approx 1$ и допус-

Таблица 1 – Параметры вакуумных камер

Страна	Фирма	Тип камеры	U_n , кВ	I_n , А	Макс. допуст. скорость v_{max} , м/с	Мин. время срабат. t_{min} , мс
Украина	ПО «Полярон»	КДВ-21	15	300	1...1,6	2,1
	ПО «Октава»	КДВ-10-20/1600	10	1600	1,5...1,9	4,2
Россия	ВЭИ	КДВ-35	35	1600	1,1...1,5	10
	НПП «Контакт»	КДВХ-40-1600	12	1600	1,6...1,9	5,2
Германия	ABB	VG 6	36	2000	1,2...1,5	10
Великобритания	Vacuum Interrupters Limited	V-204	10	800	0,8...1	6
США	Вестингаус	WZ23328	38	1200	1,8	9
Япония	«Мейденс»	SS-3020-835	36	1250	1,5...1,8	10

Таблица 2 – Технические характеристики сильфонов, выпускаемых в России

D , мм	S , мм	t , мм	N , н	a , м/с ²	v_{max} , м/с
16	0,12	1,5	2,4	33,5	4,5
20	0,12	1,7	1,6	22,5	4,0
28	0,16	2,6	3,9	22,3	3,6

тимая скорость может быть повышена до 25–30 м/с. Из выражения для σ

$$\sigma = \sigma_0 \pm K \frac{dU}{dx},$$

где $K = \text{const}$, σ_0 – начальные механические напряжения, следует, что создавая в сильфоне предварительное напряжение, обратное рабочему (например, растягивая сильфон, работающий на сжатие) можно повысить

допустимые относительные перемещения $\frac{dU}{dx}$ и вместе с этим увеличить предельную рабочую скорость.

Предприятие-разработчик сильфонов для вакуумных камер КДВ-35 (ОАО «Пирамида», г. Смоленск, Россия) по нашей просьбе спроектировало и изготовило новую модель сильфона 60*22*0,16 с рабочим ходом 14 мм, который рассчитан на давление 10^{-12} мм рт. ст., с допустимым временем срабатывания 2,3 мс. То есть, он обеспечивает среднюю скорость перемещения подвижных частей, равную 6 м/с (рис. 1, б). Такая скорость позволит с высоким качеством осуществить синхронное отключение силовой цепи с номинальным напряжением 35 кВ. Теоретическое число циклов механического ресурса камеры составляет 25000.

Это решение связано с серьезными конструктивными разработками и материальными затратами и может рассматриваться в качестве перспективного.

При увеличении скорости расхождения контактов величина d за одно и то же время растет, что приводит к увеличению пробивного напряжения при прочих равных условиях. Это предотвращает вторичное возникновение дуги в межконтактном промежутке.

Как показано в работе [3], зависимость восстанавливающегося напряжения в межконтактном промежутке в функции от скорости имеет зависимость, приведенную в табл. 3.

По данным табл. 3 построен график зависимости $U_{пр} = f(v)$, представленный на рис. 2.

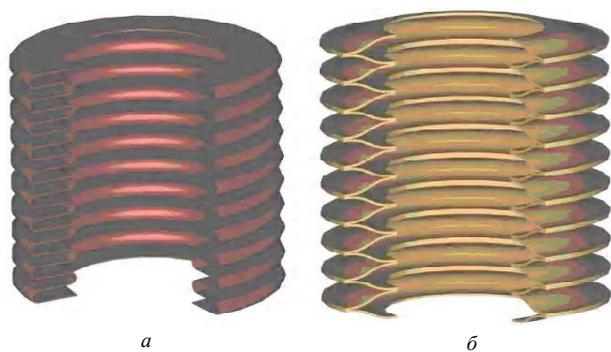


Рис. 1. Конструкции сильфонов вакуумных камер: а) катаного типа; б) сварного типа

Таблица 3 – Зависимость $U_{пр} = f(v)$

$U_{пр}, \text{кВ}$	40,14	56,83	69,49	80,21	113,7	127,17	139,41	60,63
$v, \text{м/с}$	0,5	1	1,5	2	4	5	6	8

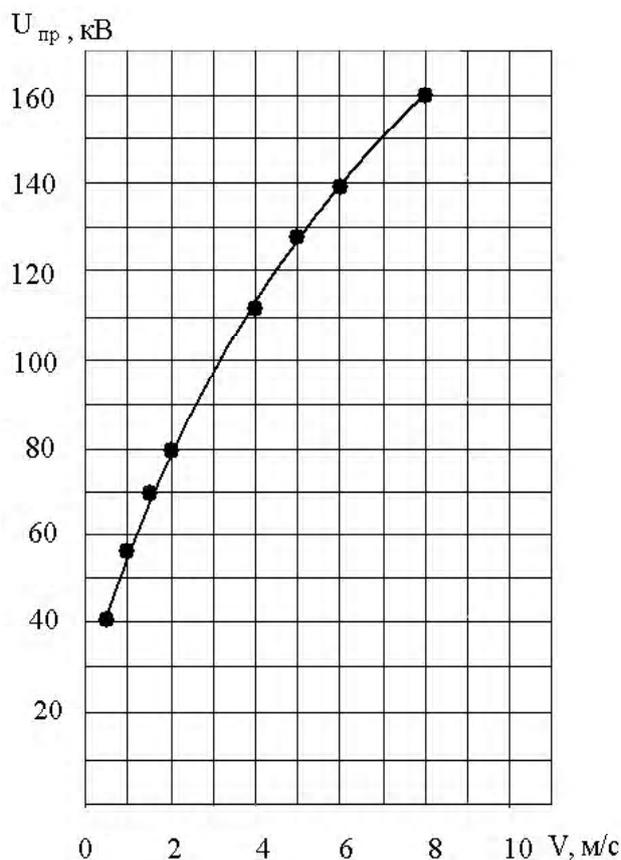


Рис. 2. Зависимость $U_{пр} = f(v)$

Аналитически данная кривая описывается формулой, где численное значение b для $\tau = 2$ мс равно $56,8 \text{ кВ} \cdot (\text{сек/м})^{1/2}$.

Данное выражение позволяет оценить коммутационные свойства аппарата при синхронном отключении с временем опережения 2 мс при данной скорости перемещения его подвижных частей.

В лаборатории электрических аппаратов Севастопольского национального технического университета в течение значительного периода времени проводятся работы по исследованию и созданию быстродействующих приводов электроаппаратов, в которых скорость перемещения подвижных частей достигает 10 м/с и более. Применение таких приводов в совокупности с вакуумной дугогасительной камерой позволяет создавать не только быстродействующие выключатели, но и в совокупности с системой управления, синхронные вакуумные выключатели.

Отрицательным фактором повышения быстродействия является появление среза тока между контактами, что приводит к перенапряжениям в отключаемой

цепи и может создать аварийную ситуацию в нагрузке и соединительных проводах.

Существует два подхода для борьбы с опасными уровнями перенапряжений.

1. Использование специальных материалов контактов, которые наряду с износостойкостью дают низкие значения срезов тока. Такие характеристики имеют хромомедные контакты, в которых хром увеличивает срок службы контактов, а медь обеспечивает малую работу выхода электронов и, соответственно, низкий уровень среза тока. Это касается вакуумных выключателей.

2. Использование нелинейных ограничителей перенапряжений (ОПН), подключаемых параллельно контактам, которые шунтируют перенапряжения, предотвращая аварийные ситуации.

Совместное применение этих двух подходов в совокупности с использованием быстродействующих при-

водов позволяет создавать аппараты с улучшенными коммутационными характеристиками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лафферти, Дж.* Вакуумные дуги / Лафферти Дж. – М. : Мир, 1982. – 428 с.
2. *Сливков, И. Н.* Процессы при высоком напряжении в вакууме / Сливков И. Н. – М. : Энергоатомиздат. – 255 с.
3. *Гилев, А. А.* Аналитическое выражение условий синхронного отключения переменного тока в вакууме / А. А. Гилев, В. Н. Данилов, В. С. Миронов // Вестн. КГПИ им. М. Остроградского: Сб. науч. тр. – Кременчуг, 2009. – Вып. 4(57). – Т.І. – С. 71–73.

Стаття надійшла до редакції 11.11.2010.

Після доробки 14.05.2011.

Гільов О. О., Міронов В. С.

Вплив швидкості переміщення рухомого контакту на дугові процеси в міжконтактному проміжку вимикачів середньої напруги

Розглядається вплив швидкості переміщення рухомої частини електричних апаратів, включаючи рухомий контакт, на процеси дугогасіння в міжконтактному проміжку при комутації електричних кіл середньої напруги.

Ключові слова: електричний апарат, вакуумний вимикач, міжконтактний проміжок, швидкість переміщення.

Hilyov A. A., Mironov V. S.

The influence of sliding contact speed on arc control process in average voltage circuit breakers contact gap

The influence of electrical apparatus movable part speed, including sliding contact, on arc control process in the contact gap is observed.

Keywords: electric apparatus, vacuum circuit breaker, contact gap, moving speed.

УДК.621.3.048.1

П. Д. Андриенко д-р техн. наук, А. А. Сахно

Запорожский национальный технический университет

РЕЗУЛЬТАТЫ ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМЫ НЕПРЕРЫВНОГО КОНТРОЛЯ ХАРАКТЕРИСТИК ОСНОВНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА НА ПОДСТАНЦИИ «ДНЕПР-ДОНБАСС 330»

В статье представлен анализ результатов внедрения системы непрерывного автоматизированного контроля основной изоляции трансформаторов тока 330 кВ на основе разработанных алгоритмов измерения и модели прогноза остаточного ресурса.

Ключевые слова: результаты внедрения, система непрерывного контроля, трансформатор тока.

Введение

В последние годы в ведущих странах мира сложились тенденции к интеллектуализации электроэнерге-

тических систем, например SmartGrid – в США, интеллектуальная электроэнергетическая система – в России. Концепция «интеллектуальной электроэнергетики»

подразумевает повышение надежности и качества работы системы при снижении затрат. Одним из важнейших этапов реализации таких проектов является усовершенствование существующей системы диагностики высоковольтного оборудования. Действующий на настоящий момент в Украине подход к диагностике и техническому обслуживанию (ТОиР) сводится к следующей схеме:

- измерение диагностического критерия (одного или нескольких);
- проверка на соответствие критерия граничным значениям, указанным в нормах, или для ненормируемых критериев – на соответствие опыту диагноста;
- выдача экспертного заключения на основании опыта или требований норм о необходимости вывода оборудования или продолжения его эксплуатации.

Система ТОиР и межремонтной диагностики у нас в стране, как и во многих других странах, периодическая и регламентируется нормами [1]. Большинство измерений проводится с выводом оборудования из работы. Очевидно, что такая система диагностики не встраивается в концепцию интеллектуальных сетей, которая подразумевает «необслуживаемые» подстанции и ТОиР по реальному состоянию оборудования. Первым этапом усовершенствования системы диагностики должно быть массовое внедрение систем автоматизированного непрерывного контроля (СНК) оборудования подстанций, в первую очередь, на напряжение 220 кВ и выше. Автоматизированный контроль имеет ряд преимуществ перед периодическим, таких как: отсутствие человеческого фактора, сокращение межконтрольного периода, учет эксплуатационных факторов, накопление диагностической информации, удаленное предоставление информации разного уровня и др. [2].

Цель работы

Оценка эффективности внедрения системы непрерывного контроля характеристик изоляции трансформаторов тока 330 кВ с применением алгоритмов измерения и модели прогноза остаточного ресурса, представленных в [2, 3, 4, 5, 6], и анализ эффективности усовершенствованной системы диагностики трансформаторов тока (ТТ) на основе непрерывного контроля и прогноза остаточного ресурса (ОР) в процессе эксплуатации в сравнении с существующей системой.

Результаты исследования

Методики и алгоритмы непрерывного контроля [2, 3, 4, 5] и модель прогноза [6] были применены при создании системы непрерывного контроля состояния трансформаторов тока 330 кВ Safe-СТ™ производства ООО «Энергоавтоматизация», установленной на ПС «Днепр-Донбасс 330 кВ» Запорожских магистральных электрических сетей (ЗМЭС) Днепропетровской электроэнергетической системы КП НЭК «Укрэнерго». Количество контролируемых ТТ – 30 шт., типы ТТ: ТФРМ-330, ТФУМ-330, ТФКН-330 и ТОГ-330.

Результаты автоматизированных непрерывных измерений, вероятность безотказной работы (ВБР), а также прогноз остаточного ресурса (ОР) по состоянию на 12.08.2010 г., выполненный СНК, представлены в табл. 1. В таблице также приведена информация о конструктивных особенностях ТТ. Буквы «Н» и «Г» означают негерметичное и герметичное исполнение ТТ, соответственно.

Серии ТФКН и ТФУМ – маслонаполненные трансформаторы с бумажно-масляной изоляцией конденсаторного типа (БМКИ), где основная изоляция наложена на U-образную первичную обмотку. Серия ТФРМ – маслонаполненные ТТ с БМКИ, где основная изоляция наложена на вторичные обмотки, выполненные в форме рыма. Серия ТОГ – газонаполненные ТТ с внешней силиконовой крышкой.

Ошибку определения ВБР и, соответственно, ОР определяют стандартные отклонения коэффициентов модели, описанной в [6]. Модель выполнена на базе метода пропорциональных интенсивностей отказов Кокса и теоретическом законе распределения ВБР Гомпертца. Отличительной особенностью модели является то, что она основывается не только на фактической наработке аппарата, но и учитывает его реальное техническое состояние на основании значений диагности-

Таблица 1 – Результаты контроля

№	Тип	Исполнение	Срок эксп., лет	tgδ, %	ВБР	ОР (max), лет	ОР (min), лет	Q, мкКл
1	ТФКН	Н	47	0.71	0.0058	0.00	0.00	245
2	ТФРМ	Г	39	0.3	0.9386	27.3	14.3	22
3	ТФКН	Н	39	0.71	0.0282	0.00	0.00	295
4	ТФКН	Н	41	0.65	0.0266	0.00	0.00	209
5	ТФРМ	Г	20	0.28	0.9629	31.7	26.7	58
6	ТФУМ	Г	7	0.33	0.8187	28.7	24.1	116
7	ТФРМ	Г	18	0.38	0.9201	24.6	8.70	62
8	ТФУМ	Г	26	0.3	0.7818	9.90	4.40	110
9	ТФУМ	Г	26	0.4	0.6911	5.70	0.00	93
10	ТФРМ	Г	9	0.32	0.9860	40.7	32.6	50
11	ТФРМ	Г	16	0.34	0.9536	30.1	17.3	48
12	ТФРМ	Г	16	0.43	0.9600	29.5	20.1	64
13	ТФУМ	Г	21	0.27	0.8993	17.1	16.2	64
14	ТФУМ	Г	21	0.43	0.6658	7.70	0.00	67
15	ТФУМ	Г	22	0.41	0.7807	10.2	2.20	36
16	ТФРМ	Г	11	0.53	0.9120	23.1	3.30	49
17	ТОГ	Г	1	0.4	0.9908	34.4	28.1	101
18	ТФУМ	Г	22	0.7	0.4147	0.00	0.00	43
19	ТФРМ	Г	14	0.39	0.9515	29.2	14.9	49
20	ТФУМ	Г	8	0.32	0.9722	28.7	25.1	116
21	ТФУМ	Г	8	0.32	0.9463	23.1	10.9	84
22	ТФКН	Н	39	0.39	0.6161	10.8	7.10	85
23	ТФКН	Н	39	0.46	0.4059	6.50	0.00	85
24	ТФКН	Н	39	0.49	0.4749	6.00	0.00	74
25	ТОГ	Г	5	0.58	0.9152	27.3	2.80	56
26	ТОГ	Г	5	0.21	0.9841	33.7	32.1	16
27	ТОГ	Г	5	0.09	0.9867	34.0	33.2	30
28	ТОГ	Г	8	0.33	0.9803	31.3	31.3	26
29	ТФРМ	Г	5	0.22	0.9942	46.4	41.4	61
30	ТОГ	Г	8	0.16	0.9486	28.5	22.9	29

ческих критериев. Оценка текущего состояния вводится в модель в виде коэффициента, полученного как сумма произведений значения диагностического критерия на весовой коэффициент. Система рассчитывает минимальный (OP min) и максимальный (OP max) прогнозируемый остаточный ресурс исходя из наилучшего и наихудшего отклонения всех весовых коэффициентов в модели. Средняя величина диапазона прогнозируемого времени отказа ТТ по контрольной выборке составляет 6,88 года.

В табл. 1 также приведены результаты измерений кажущегося заряда частичных разрядов (ЧР) в основной изоляции ТТ (Q), проведенные в автоматизированном режиме прибором MPD600 (OMICRON electronics) параллельно с работой СНК. Связь прогнозируемого ОР с результатами измерения кажущегося заряда ЧР представлена на рис. 1. Полученные данные свидетельствуют о сходимости результатов диагностики двух независимых методов.

Измерение характеристик ЧР в основной изоляции является наиболее эффективным методом диагностики ее состояния [7, 8, 9], однако применение этого метода в условиях эксплуатации требует решения ряда проблем [7, 10]. Существующие проблемы в данной работе рассматриваться не будут, а полученные данные измеренных значений кажущегося заряда ЧР будут использованы как дополнительный критерий, подтверждающий или опровергающий рассчитанную с помощью СНК оценку состояния трансформатора.

В табл. 2 представлен анализ результатов диагностики по трем методам:

- метод отбраковки, действующий в энергосистемах (по завышению $tg\delta_1$);
- метод отбраковки по расчету остаточного ресурса на основе показаний СНК, предложенный авторами [6] (при нулевом максимальном и минимальном значении ОР ТТ относился к группе «критическое состояние», при ненулевом максимальном и нулевом минимальном значении ОР ТТ относился к группе «плохое состояние»);

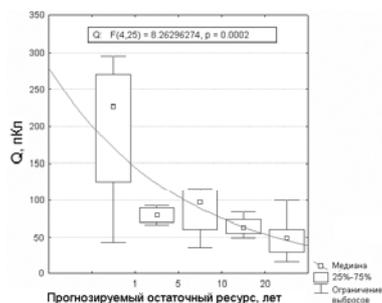


Рис. 1. Зависимость уровня кажущегося заряда ЧР в основной изоляции ТТ от прогнозируемого ОР (F – критерий Фишера, и уровень его значимости (p), для проверки на соответствие экспоненциальному закону распределения)

Таблица 2 – Результаты анализа

№ (табл. 1)	Анализ полученных данных
1	Измерения ЧР подтверждают расчет ОР и существующий метод отбраковки. ТТ в критическом состоянии.
3	Измерения ЧР подтверждают расчет ОР и существующий метод отбраковки. ТТ в критическом состоянии.
4	Измерения ЧР подтверждают расчет ОР. Согласно существующему методу отбраковки ТТ может продолжать эксплуатацию. ТТ в критическом состоянии.
6	ТТ имеет высокий остаточный ресурс и завышенный уровень ЧР. ТТ в нормальном состоянии.
8	ТТ имеет не высокий остаточный ресурс и завышенный уровень ЧР. ТТ в ухудшенном состоянии.
17	Уровень ЧР завышен, ОР высокий. Возможно, неправильный расчет ОР, т.к. группа ТОГ не исследовалась в работе, или наличие приработочного дефекта. ТТ в нормальном состоянии, эксплуатация при наличии СНК допустима.
18	Измерения ЧР не подтверждают расчет ОР и существующий метод отбраковки. ТТ в критическом состоянии.
20	Измерения ЧР не подтверждают расчет ОР и существующий метод отбраковки. Возможно, из-за наличия мощного источника помех (острый край шины и т.д.) вблизи или на самом ТТ. ТТ в нормальном состоянии.

– метод отбраковки по измерению кажущегося заряда частичных разрядов под рабочим напряжением в процессе эксплуатации.

В табл. 3 представлен сводный анализ диагностических заключений по ТТ с развивающимися дефектами, полученных тремя методами. Согласно полученным данным 4 трансформатора находятся в критическом состоянии, еще 4 ТТ находятся в плохом состоянии, один ТТ типа ТОГ-330 имеет высокий расчетный ОР и завышенный уровень ЧР. В данном случае вывод о необходимости отбраковки ТТ сделать нельзя, т.к. отсутствует необходимый опыт по данному типу ТТ. В тоже время для ТТ типа ТОГ характерно достаточно высокое количество приработочных дефектов. При наличии СНК допустимо продолжать эксплуатацию данного ТТ до появления признаков, подтверждающих развитие дефекта (изменение $tg\delta_1$, емкости, изменение плотности элегаза, рост уровня ЧР).

Таблица 3 – Сводные результаты диагностики ТТ в процессе эксплуатации

Метод	В критическом состоянии, шт	В плохом состоянии, шт	Ошибочно диагностировано критическое состояние, шт
Состояние ТТ	4	4	–
Существующий метод (по $tg\delta_1$)	3	не предусмотрено	1
Предложенный (по ОР на основе показаний СНК)	4	4	0
Контроль характеристик ЧР	3	4	2

Предложенный в работе метод отбраковки ТТ по расчету прогнозируемого остаточного ресурса на основе показаний СНК является наиболее чувствительным к развивающимся дефектам в основной изоляции ТТ. Утвержденный действующими нормами метод не позволил отбраковать ТТ, находящийся в критическом состоянии, в одном случае. Диагностика по уровню кажущегося заряда частичных разрядов, полученных при измерении под рабочим напряжением в процессе эксплуатации, ложно не позволила отбраковать ТТ, находящийся в критическом состоянии, а также один ТТ ложно отнесен к плохому состоянию. Однако, направление контроля характеристик ЧР для целей диагностики развивающихся дефектов в основной изоляции ТТ достаточно перспективно и после соответствующей доработки методологической базы может использоваться как дополнительный диагностический критерий состояния ТТ. В ходе проведенных исследований были впервые установлены количественные критерии, характеризующие состояние ТТ 330 кВ по измерениям параметров ЧР в изоляции, при эксплуатационных измерениях под рабочим напряжением: неудовлетворительное состояние – уровень кажущегося разряда ЧР более 200 пКл, нормальное состояние – 100 пКл и ниже. Проведенный анализ экспериментальных данных показал, что разброс значений расчетного ОР (по кумулятивной оценке диагностических критериев) от значений прогнозируемого ОР по единичным параметрам подтверждает необходимость использования кумулятивной модели, предложенной в работе [6].

Исследование влияния конструктивного исполнения ТТ на диагностические критерии и остаточный ресурс показали, что:

- среди маслонаполненных ТТ наименьшее характерное значение температурного коэффициента тангенса угла диэлектрических потерь (α) имеют герметичные ТТ типа ТФРМ-330. Это объясняется большей теплоемкостью ТТ типа ТФРМ, а также погрешностью допущения о равенстве температуры окружающей среды и изоляции ТТ (масса заполненного маслом ТФРМ-330 составляет 3070 кг, а ТТ типа ТФУМ-330 – 2050 кг). Поэтому наиболее характерное значение α будет одинаковым для всех типов ТТ с БМКИ, так как этот показатель определяется не конструктивным исполнением, а физическими свойствами БМКИ и для бездефектной изоляции, согласно проведенным исследованиям, составляет около $0,004 \cdot 10^{-2}$ ед/°С;

- уровень диэлектрических потерь колеблется в процессе эксплуатации в зависимости от внешних факторов, характеристик масла и др. Наименьшие значения этого параметра – у трансформаторов тока с U-образной первичной обмоткой, что является следствием меньшего количества масла в трансформаторах этого типа, так как масло может оказывать решающее воздействие на величину $\text{tg} \delta_1$.

Данные представленные на рис. 2 и 3 подтверждают, что ВБР и ОР связаны со сроком эксплуатации ТТ, однако разброс значений в группах достаточно велик, при этом, чем больше срок эксплуатации аппарата тем больше становится этот разброс. Прогноз остаточного ресурса для трансформаторов отработавших 10 лет и более, по методикам, предложенным исследователями, например, в [11, 12] может иметь ошибку до 15 лет и больше подходит для прогноза количества отказов в выборке, чем для пообъектного прогноза ОР, так как не учитывает состояние конкретного аппарата.

На рис. 4 представлено сравнение результатов прогноза остаточного ресурса ТТ по модели, учитывающей текущее состояние ТТ [6] (на основе кумулятивной оценки диагностических критериев), и по наиболее

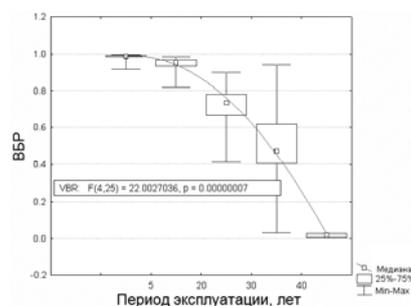


Рис. 2. Распределение вероятностей безотказной работы ТТ

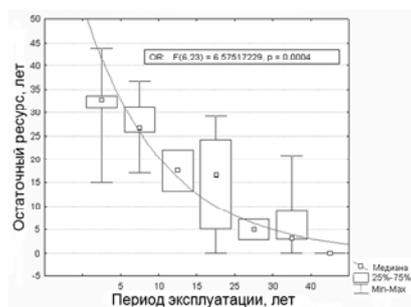


Рис. 3. Распределение прогнозируемого остаточного ресурса

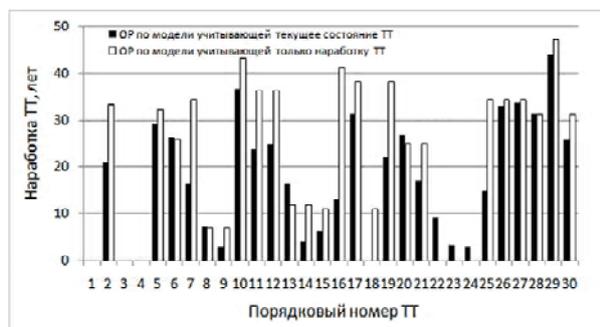


Рис. 4. Сравнение результатов прогнозирования ОР по модели, учитывающей текущее состояние ТТ, и по модели, учитывающей только наработку ТТ

лее распространенной модели [11, 12] (учитывающей только наработку ТТ). Сравнение показало, что модель, основанная на наработке аппарата, прогнозирует в ряде случаев заниженный остаточный ресурс. При использовании ее результатов выводить из эксплуатации необходимо большую часть стареющего оборудования, хотя оно находится в нормальном состоянии. Ухудшение технического состояния основной изоляции ТТ происходит непрерывно, как при работе в номинальных, так и в аварийных и недогруженных режимах. Разработанная модель [6] учитывает этот факт.

Расчет ОР в модели [6] базируется на предположении, что дальнейший износ ресурса будет происходить только из-за старения. После аварийного воздействия значения критериев изменяются, а значит, ресурс должен пересчитываться. Применение такой модели возможно только в составе СНК, когда прогноз будет корректироваться с учетом получаемых в непрерывном режиме данных о состоянии аппаратов.

Из представленных данных на рис. 5 и 6 видно, что существует прямая связь величин $tg\delta_1$ и $\Delta tg\delta_1$ с наработкой аппаратов, однако разброс значений в группах достаточно велик и не зависит от отработанного ресурса, что также подтверждает необходимость использования кумулятивной оценки, а не единичных диагностических критериев.

Исходя из граничных значений уровней кажущегося заряда ЧР в группах выборки по периоду эксплуатации (рис. 7), установленных в работе, можно сделать заключение о том, что недопустимые уровни ЧР воз-



Рис. 5. Распределение значений $tg\delta_1$ в группах по периоду эксплуатации



Рис. 6. Распределение значений $\Delta tg\delta_1$ в группах по периоду эксплуатации

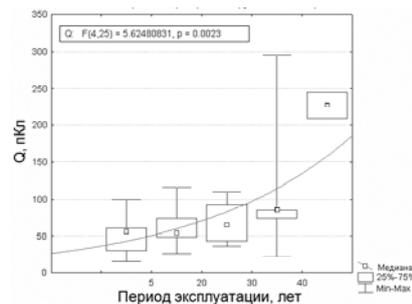


Рис. 7. Распределение уровней кажущегося заряда частичного разряда в группах выборки по периоду эксплуатации

никают в основной изоляции высоковольтных ТТ после 30 лет эксплуатации.

Так как кажущийся заряд ЧР характеризует степень развития местных дефектов в изоляции, можно говорить о том, что номинальный ресурс ТТ производства ОАО «ЗЗВА» реально выше указанного (25 лет) и составляет 30 лет.

Выводы

1. По результатам работы системы непрерывного контроля на ПС «Днепр-Донбасс 330» было выявлено 4 трансформатора тока, находящихся в предаварийном состоянии, однако использование СНК позволило продолжить их эксплуатацию до выделения средств для их замены или до критического ухудшения их состояния.

2. Конструкция ТТ типа ТОГ наиболее новая и обладает повышенным количеством «приработочных» дефектов, однако элегазовое оборудование – наиболее перспективный класс аппаратов высокого напряжения, поэтому необходимо продолжать внедрение в эксплуатацию ТТ данного типа, но с системами автоматизированного непрерывного контроля для предупреждения аварийных режимов.

3. Предложенный в работе метод отбраковки ТТ по расчету прогнозируемого остаточного ресурса на основе показаний СНК является наиболее чувствительным к развивающимся дефектам в основной изоляции ТТ. Действующий подход к диагностике ТТ по отклонениям диагностических критериев от значений, указанных в нормах, не позволяет отбраковывать часть трансформаторов тока, находящихся в критическом состоянии.

4. Существующие модели прогноза показателей надежности высоковольтного маслонаполненного оборудования, использующие только данные о наработке трансформатора, имеют большие ошибки при определении остаточного ресурса по сравнению с предложенной моделью. Прогноз остаточного ресурса и оценку текущего состояния трансформаторов тока 330 кВ следует осуществлять по модели [6], учитывающей текущее состояние ТТ при помощи кумулятивной оценки диагностических критериев. Данная модель позволяет более достоверно прогнозировать остаточный ресурс трансформаторов тока при диагностике под рабочим напряжением в процессе эксплуатации.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Норми випробування електрообладнання : СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007 – Офіц. вид., приказ Мінпаливенерго 2007-01-15 г. №13. – К. : ОЕП «ГРИФРЕ» : М-во палива та енергетики України, 2007. – 262 с. – (Нормативний документ Мінпаливенерго України).
2. *Рассальский, А. Н.* Источники погрешности при контроле характеристик основной изоляции трансформаторов тока и вводов 330-750 кВ под рабочим напряжением [Электронный ресурс] / Рассальский А. Н., Сахно А. А. Конограй С. П., Спица А. Г., Гук А. А. // Доклады XII международной научно-технической конференции «Трансформаторостроение– 2009». – Энерго-инфо. – 2009. – Режим доступа к журналу: <http://www.energo-info.ru/content/view/12648/173/>
3. *Сахно, А. А.* Алгоритм измерения тангенса угла диэлектрических потерь основной изоляции трансформаторов тока и вводов 330–750 кВ при непрерывном контроле, под рабочим напряжением / А. А.Сахно // Електротехніка і електромеханіка. – 2010. – №2. – С. 54–56.
4. *Рассальский, А. Н.* Методика измерения и обработки сигнала тока комплексной проводимости основной изоляции высоковольтной аппаратуры при диагностике под рабочим напряжением. / А. Н. Рассальский, А. А. Сахно, С. П. Конограй, А. В. Козлов // Електротехніка та електроенергетика. – 2010. – №2. – С. 12–17.
5. *Рассальский, А. Н.* Анализ методов непрерывного контроля характеристик изоляции трансформаторов тока и вводов на подстанциях 330–750 кВ / Рассальский А. Н., Сахно А. А., Конограй С. П., Спица А. Г., Гук А. А. // Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського. Кременчуг. – 2009. – № 3 (56), часть 1. – С. 67–70.
6. *Сахно, А. А.* Математическая модель прогноза остаточного ресурса трансформаторов тока 330–750 кВ с бумажно-масляной изоляцией конденсаторного типа / А. А. Сахно // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – 2010. – № 55. – С. 97–106.
7. *Сви, П. М.* Контроль изоляции оборудования высокого напряжения. – 2-е изд., перераб. и доп. / П. М. Сви. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 128 с.: ил.
8. *Вдовико, В. П.* Образование и развитие частичных разрядов в бумажно-масляной изоляции высоковольтного оборудования в условиях эксплуатации / Вдовико В. П. // Электро. – 2004. – № 1. – С. 36–40.
9. *Renforth, L.* On-Line PD Testing – Now A Field Reality [Электронный ресурс] / Lee Renforth, Malcolm Seltzer-Grant, Ross Mackinlay // Fifth AVO : New Zeland International Technical Conference, 6–10 Oct. 2006. – 8 с. – Режим доступа : www.ipceng.com.
10. *Конограй, С. П.* Методы непрерывного контроля и оценки состояния высоковольтного оборудования подстанций [Электронный ресурс] : Материалы VII Международной научно-технической конференции «Силовые трансформаторы и системы диагностики» / С. П. Конограй, А. Н. Рассальский, А. А. Сахно – 80 Min / 700 MB. – Москва : МА ТРАВЭК, – 2010. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM) ; 12 см. – Систем. вимоги: Pentium ; 32 Mb RAM ; Windows 95, 98, 2000, XP ; Adobe Acrobat Reader 5.0. – ДЗ9. – Назва з контейнера.
11. *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. – С. 857–879.
12. *Nordman, D.* Weibull Prediction Intervals for a Future Number of Failures. / Daniel J. Nordman and William Q. Meeker // Technometrics. – 2002. – Vol. 44, No. 1 – С. 15–23.

*Стаття надійшла до редакції 13.01.2011.
Після доробки 11.03.2011.*

Андрієнко П. Д., Сахно О. А.

Результати впровадження системи безперервного контролю характеристик основної ізоляції високовольтних трансформаторів струму на підстанції «Дніпро-Донбас 330»

У статті описано результати впровадження системи безперервного автоматизованого контролю основної ізоляції трансформаторів струму 330 кВ на основі розроблених алгоритмів вимірювання і моделі прогнозу залишкового ресурсу. Проведено аналіз отриманих результатів, зроблено висновки за результатами діагностики та ефективності існуючих методів і моделей і методів, реалізованих у системі.

Ключові слова: результати впровадження, система безперервного контролю, трансформатор струму.

Andrienko P. D., Sakhno A. A

Results of installation of 330 kV current transformers main insulation on-line monitoring system at «Dnepr-Donbass 330» substation

The article describes the results of implementing the current transformers (CT) main insulation on-line monitoring system, based on the developed measurement algorithms and the model of residual life prediction. The obtained results have been analyzed; conclusions have been drawn by the results of diagnostics and effectiveness of the existing methods and models implemented in the system.

Key words: results of installation, on-line monitoring, current transformer.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ СТЕКЛА

В статье разработана математическая модель ионно-плазменной модификации поверхности стекла при атмосферном давлении.

Ключевые слова: плазма, математическая модель, поверхностная модификация, стекло, ионно-плазменная обработка.

Введение модифицирующих элементов в поверхностный слой стекла позволяет повысить его эксплуатационные свойства, механическую прочность, обеспечить регулирование оптических свойств, а также получить возможность окрашивания стекла в различные цвета.

Качество модифицированного поверхностного слоя стекла зависит от таких параметров, как вид исходного материала внедрения, состав обрабатываемого стекла, расход и вид плазмообразующего газа, геометрических и энергетических параметров плазмотрона.

Возможность предварительного определения оптимальных диапазонов изменения технологических параметров процесса для обеспечения внедрения элементарных частиц модифицирующего материала (атомов и ионов) и равномерного их распределения в диффузионном слое приводит к снижению удельного расхода материала внедрения при формировании высококачественных проникающих покрытий на поверхности стекла с одновременным повышением производительности процесса обработки.

Распределение температуры $T(r)$ в сечении цилиндрического дугового столба описывается уравнением баланса энергии, известным как уравнение Эленбааса-Хеллера [1–3]:

$$-\frac{1}{r} \left(\frac{d}{dr} r \lambda \frac{dT}{dr} \right) = \sigma E^2 - \psi, \quad (1)$$

где напряженность электрического поля $E = E_z(r) = \text{const}$ имеет только аксиальную составляющую, не зависящую от радиальной координаты. Уравнение (1) описывает установившийся процесс, при котором выделяющееся джоулево тепло σE^2 за вычетом потерь на излучение ψ переносится к охлаждаемым стенкам теплопроводностью.

Необходимые для решения задачи свойства плазмы λ , σ , ψ при постоянном давлении являются функциями только температуры [1–3]. Реальные зависимости $\lambda(T)$, $\sigma(T)$, $\psi(T)$ (рис. 1) существенно нелинейные,

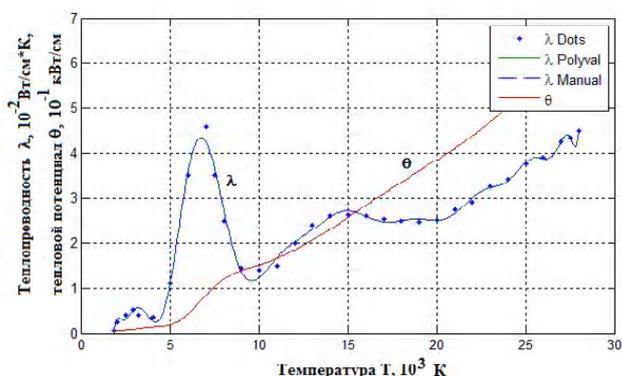


Рис. 1. Зависимости теплопроводности λ и теплового потенциала θ воздуха от температуры

что затрудняет аналитическое рассмотрение (1). Его вид можно несколько упростить известным приемом введения новой независимой переменной – потенциала теплового потока (рис. 1)

$$\theta = \int_0^T \lambda(T) dT, \quad (2)$$

являющегося при $p = \text{const}$ однозначной функцией температуры.

При этом уравнение (1) записывается следующим образом:

$$d\theta = \lambda(T) dT,$$

$$-\frac{1}{r} \left(\frac{d}{dr} r \frac{d\theta}{dr} \right) = \sigma(\theta) E^2 - \psi(\theta). \quad (3)$$

Полный ток дуги I определяется интегральным законом Ома

$$I = 2\pi E \int_0^R \sigma r dr. \quad (4)$$

Каналовая модель Штеенбека-Райзера основана на сильной зависимости электрической проводимости плазмы от температуры [3, 4]. При температурах ниже 3000 К $\sigma(T) = 0$ и существенно возрастает при температурах выше 4000 К. Таким образом электрическую дугу можно представить в виде двух областей – проводящей и непроводящей (рис. 2).

Нелинейная зависимость электропроводности от функции теплопроводности представляется в виде

$$\sigma(\theta) = \begin{cases} b^2(\theta - \theta_*) & \text{для } \theta_* < \theta < \theta_0; \\ 0 & \text{для } \theta < \theta_*, \end{cases}$$

где b – постоянная; θ_0 – максимальное значение θ (на оси); θ_* – значение на границе зоны проводимости плазмы.

Благодаря этой аппроксимации сечение канала разбивается на две области: область проводимости ($\sigma \neq 0$) и непроводящую область ($\sigma = 0$).

В области проводимости уравнение (3) принимает следующий вид.

Введем переменную

$$x = rE\sqrt{b}, \quad dx = E\sqrt{b}dr, \quad dr^2 = \frac{dx^2}{E^2 \cdot b}.$$

$$E^2 \cdot b \frac{d^2\theta_I}{dx^2} + \frac{(E\sqrt{b})^2}{x} \frac{d\theta_I}{dx} + E^2 \cdot b \cdot (\theta_I - \theta_*) = 0,$$

$$\frac{d^2\theta_I}{dx^2} + \frac{1}{x} \cdot \frac{d\theta_I}{dx} + (\theta_I - \theta_*) = 0. \quad (5, a)$$

В непроводящей области уравнение (3) преобразуется в

$$\frac{1}{r} \left(\frac{d}{dr} r \frac{d\theta_{II}}{dr} \right) = 0. \quad (5, б)$$

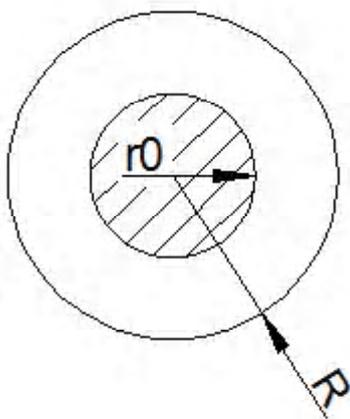


Рис. 2. Каналовая модель электрической дуги

Общее решение уравнения (5, б) можно представить в виде

$$\theta_{II} = C_1 + C_2 \cdot \ln |r|.$$

Используя граничные условия

$$\theta_I(0) = \theta_0, \quad \left. \frac{d\theta_I}{dr} \right|_{r=0} = 0;$$

$$\theta_{II}(R) = 0, \quad \theta_{II}(r_0) = \theta_*,$$

получаем $C_1 = -C_2 \cdot \ln |R|$,

$$\theta_I = -C_2 \cdot \ln |R| + C_2 \cdot \ln |r_*| \quad \Rightarrow \quad C_2 = \frac{\theta_*}{\ln \frac{r_*}{R}}.$$

$$\theta_{II}(r) = -\frac{\theta_*}{\ln \frac{r_*}{R}} \cdot \ln |R| + \frac{\theta_*}{\ln \frac{r_*}{R}} \cdot \ln |r| \quad \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \quad \theta_{II}(r) = \theta_* \cdot \frac{\ln \frac{r}{R}}{\ln \frac{r_*}{R}}.$$

Решением уравнения (5, а) является функция Бесселя первого рода нулевого порядка. С учетом граничных условий решение можно записать в виде:

$$\theta_I(r) = \theta_* + (\theta_0 - \theta_*) \cdot J_0(x),$$

где $J_0(x)$ – функция Бесселя первого рода нулевого порядка.

Таким образом, решения уравнения (3) в проводящей и непроводящей области записываются в следующем виде:

$$\begin{cases} \theta_I(r) = \theta_* + (\theta_0 - \theta_*) \cdot J_0(x) \\ \theta_{II}(r) = \theta_* \cdot \frac{\ln \frac{r}{R}}{\ln \frac{r_*}{R}} \end{cases}.$$

Учитывая, что диаметр проводящей области электрической дуги намного меньше диаметра разрядного канала, распределение температуры на срезе сопла плазмотрона можно записать в виде:

$$T(r) = T_m \cdot \left(\ln \frac{r}{r_0} \right)^{1/n+1}.$$

Температура на оси столба электрической дуги определяется [3]:

$$T_m = \sqrt{\omega \cdot \frac{I_i}{8\pi\lambda_m}}$$

Температура T по оси турбулентной струи определяется следующей зависимостью [5]:

$$\frac{T - T_\infty}{T_m - T_\infty} = \left[\left[1 - \left(\frac{z}{Z_m} \right)^{1.5} \right]^2 \right]^{\text{Pr}_T}$$

где T_m – осевое значение температуры на срезе сопла плазмотрона; T_∞ – температура окружающей среды, $T_\infty = 300$ К; Z_m – ордината внешней границы струи; Pr_T – турбулентное число Прандтля, для осесимметричных струй $\text{Pr}_T = 0,8$.

Процесс накопления диффундирующего вещества в различных точках среды как функцию времени описывает второй закон Фика:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2},$$

где D – коэффициент диффузии, c – концентрация диффундирующего вещества, x – координата.

Для диффузии в полубесконечное твердое тело:

$$c(x,t) = \frac{c_0}{\sqrt{\pi \cdot D \cdot t}} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{4 \cdot D \cdot t}\right),$$

где c – концентрация диффундирующего вещества при данных t и x ; c_0 – концентрация вещества при $t=0$ и $x=0$.

Зависимость коэффициента диффузии атомов и ионов меди от температуры описывается следующим выражением [6]:

$$D_{Cu} = 1.91 \cdot 10^{-2} \cdot \exp\left(-\frac{27000}{R \cdot T}\right).$$

Для определения температурного поля и теплового потока при стационарной теплопроводности рассмотрим поверхность стекла как однородную плоскую стенку толщиной δ .

Стенка имеет одинаковый по всей толщине коэффициент теплопроводности $\lambda_{ст}$. Температура на границах стенки – T_{w1} и T_{w2} , а изотермические поверхности имеют форму плоскостей, параллельных поверхностям стенки.

При рассматриваемых условиях тепло может распространяться только вдоль оси x , и температурное

поле будет одномерным. Температурные градиенты вдоль остальных осей координат равны нулю, следовательно,

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0.$$

С учетом этого дифференциальное уравнение теплопроводности для плоской стенки будет иметь вид

$$\frac{d^2 T}{dx^2} = 0.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T(r) = T_m \cdot \left(\ln \frac{r}{r_0} \right)^{1/n+1}, \\ T_m = \sqrt{\omega \cdot \frac{I_i}{8\pi\lambda_m}}, \\ \frac{T - T_\infty}{T_m - T_\infty} = \left[\left[1 - \left(\frac{z}{Z_m} \right)^{1.5} \right]^2 \right]^{\text{Pr}_T}, \\ c(x,t) = \frac{c_0}{\sqrt{\pi \cdot D \cdot t}} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{4 \cdot D \cdot t}\right), \\ D_{Cu} = 1.91 \cdot 10^{-2} \cdot \exp\left(-\frac{27000}{R \cdot T}\right), \\ \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0. \end{array} \right.$$

Решение полученной системы уравнений позволяет установить связь между технологическими характеристиками процесса плазменной модификации поверхности стекла (величиной тока, геометрическими размерами разрядной камеры, теплофизическими свойствами материала внедрения) и распределением материала внедрения в поверхностном слое обработанного изделия.

Концентрация материала внедрения в поверхностном слое стекла описывается следующим уравнением:

$$c(x,t) = \frac{c_0}{\sqrt{\pi \cdot 1.91 \cdot 10^{-2} \cdot \exp\left(-\frac{27000}{R \cdot T(r)}\right) \cdot t}} \times \exp\left(-\frac{x^2}{4 \cdot 1.91 \cdot 10^{-2} \cdot \exp\left(-\frac{27000}{R \cdot T(r)}\right) \cdot t}\right)$$

$$T(r) = T_m \cdot \left(\ln \frac{r}{r_0} \right)^{1/n+1}$$

Профили температуры плазменного потока представлены на рис. 3, 4. Распределение материала внедрения в поверхностном слое стекла показано на рис. 5 (время обработки $t = 20$ сек).

Разработанная математическая модель ионно-плазменной модификации поверхности стекла позволяет установить связь технологических параметров ионно-плазменного процесса с характеристиками поверхности обработанных изделий и выбрать оптимальные диапазоны изменения рабочих параметров процесса.

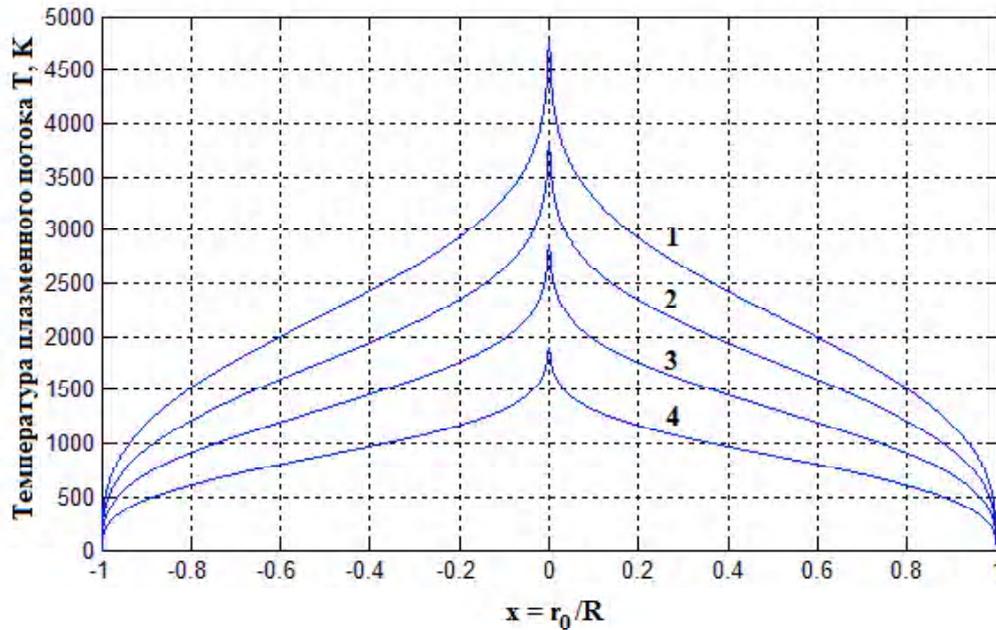


Рис. 3. Профили температуры плазменного потока при работе плазматрона на воздухе: 1 – $Z = 10$ мм, $G = 0.0021$ кг/с; 2 – $Z = 30$ мм, $G = 0.0021$ кг/с; 3 – $Z = 50$ мм, $G = 0.0021$ кг/с; 4 – $Z = 70$ мм, $G = 0.0021$ кг/с.

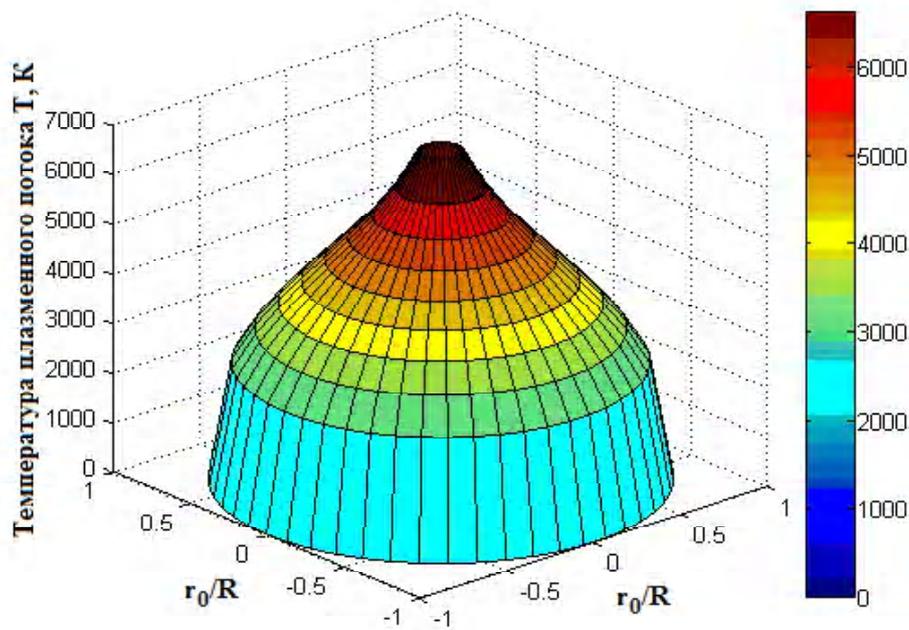


Рис. 4. Температурное поле плазменного потока на срезе сопла плазматрона

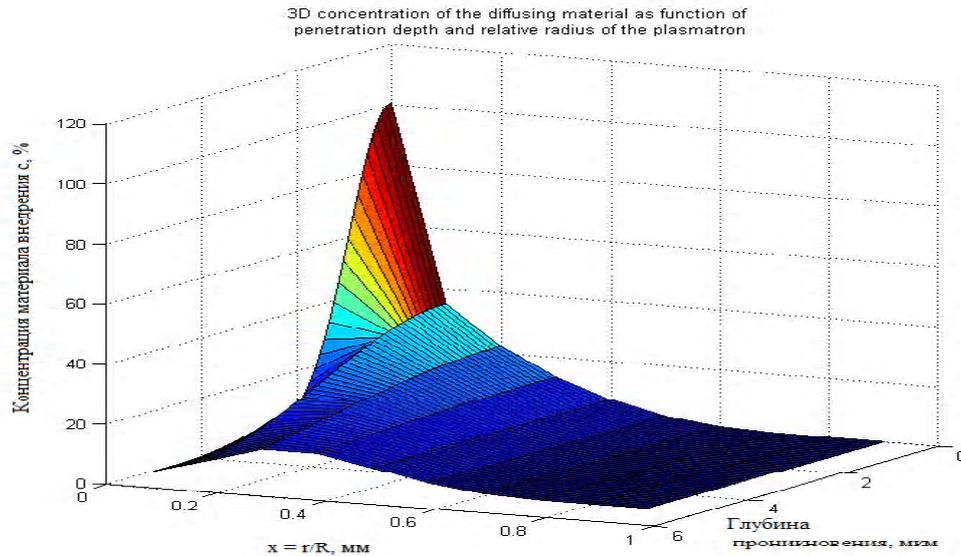


Рис. 5. Распределение материала внедрения в поверхностном слое стекла ($t = 20$ сек)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теория столба электрической дуги / В. С. Энгельшт, В. И. Гурович, Г. А. Десятков и др. – Новосибирск : Наука, 1990. – 376 с.
2. Физика и техника низкотемпературной плазмы / [С. В. Дресвин, А. В. Донской, В. М. Гольдфарб, В. С. Клубникин]; под общ. ред. С. В. Дресвина. – М. : Атомиздат, 1972. – 352 с.
3. *Fridman, A. Plasma chemistry / Alexander Fridman . – New York: Cambridge University Press, 2008. – 978 p.*
4. *Грановский, В. Л. Электрический ток в газе (установившийся ток) / В. Л. Грановский. – М. : Наука, 1971. – 544 с.*
5. *Петров, С. В. Плазменное газоздушное напыление / С. В. Петров, И. Н. Карп. – К.: Наук. думка, 1993. – 495 с.*
6. *Евстропьев, К. К. Диффузионные процессы в стекле / К. К. Евстропьев. – Л. : Стройиздат. – 1970. – 168 с.*

Стаття надійшла до редакції 25.06.2011.

Шрам О. А.

Математична модель іонно-плазмової модифікації поверхні скла

У статті розроблено математичну модель іонно-плазмової модифікації поверхні скла при атмосферному тиску.

Ключові слова: *плазма, математична модель, поверхнева модифікація, скло, іонно-плазмова обробка.*

Shram A. A.

Mathematical model of glass surface ion-plasma modification

The paper describes the mathematical model of glass surface ion-plasma modification at atmospheric pressure.

Keywords: *plasma, mathematical model, surface modification, glass, ion-plasma treatment.*

ДО ВІДОМА АВТОРІВ

Журнал «Електротехніка та електроенергетика»-призначений для публікації найбільш значущих наукових і практичних результатів досліджень вчених вищих навчальних закладів і наукових організацій, розробок і продукції промислових підприємств.

Журнал занесено до переліку наукових видань України, у яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття вчених ступенів доктора і кандидата технічних наук. Підписний індекс журналу за каталогом Укрпошти 22913.

Основною метою журналу є пропаганда сучасних наукових та виробничо-практичних знань за вибраним напрямом. Основний зміст журналу вміщується в таких рубриках:

1. Електротехніка

1.1. Загальні питання електротехніки та електроенергетики.

1.2. Матеріали загального плану (методичні, навчальні розробки; історія електротехніки та енергетики; організація науково-дослідних, дослідно-конструкторських та проектних робіт, конференцій, симпозіумів, семінарів і т. д.).

1.3. Теоретична електротехніка (фізичні основи електротехніки, теорія електромагнітного поля, теорія електричних та магнітних ланцюгів).

1.4. Охорона праці (умови праці, техніка безпеки, електробезпека).

1.5. Електротехнічні матеріали, електричні конденсатори, дроти й кабелі.

Загальні питання, магнітні, напівпровідникові, надпровідникові, провідникові, діелектричні, електроізоляційні матеріали. Електричні ізолятори. Конденсатори. Дроти й кабелі.

1.6. Електромеханіка та електротранспорт.

1.6.1. Електричні машини й трансформатори.

1.6.1.1. Електричні машини (загальні проблеми, машини постійного та змінного струму, спеціальні).

1.6.1.2. Трансформатори та електричні реактори.

1.6.1.3. Електротехнічне обладнання спеціально-призначення (термоядерних установок, прискорювачів, лазерів).

1.6.2. Електричні апарати високої та низької напруги.

1.6.3. Силова перетворювальна техніка (силові вентилі; статичні перетворювачі; загальні питання; випрямлячі та ведені інвертори; перетворювачі постійної та змінної напруги, числа фаз; системи керування, захисту й діагностики; конструкції та силове обладнання).

1.6.4. Електропривод та автоматизація промислових установок (загальні проблеми, привод постійного та змінного струмів, комплексно автоматизований).

1.6.5. Електрообладнання транспорту (загальні питання; електротехнічне обладнання та електропостачання залізничного, міського, промислового транспорту; рухомого складу, нетягових навантажень, автомобілів, електромобілів, засобів безрейкового наземного електротранспорту; ракетно-космічних систем та літальних апаратів, суден).

1.7. Електротехнологія (електротермія, електрозварювальне устаткування, електротехнічне обладнання електротехнологічних установок).

1.8. Електрифікація сільського господарства та побуту.

1.8.1. Електрифікація й автоматизація сільського господарства (загальні питання, електропривод,

електропостачання, автоматизація, електронагрівальні установки, освітлення, випромінюючі прилади та установки).

1.8.2. Електрифікація побуту (електроприлади, системи опалення й гарячого водопостачання, вентиляції, кондиціонування повітря й холодопостачання, медична електротехніка).

1.9. Освітлення й електровипромінювальна техніка. Світлотехніка та інфрачервона техніка (загальні проблеми; стан та перспективи розвитку; фізичні та фізіологічні основи; методи та прилади для визначення характеристик джерел світла, світлових приладів та світлотехнічних матеріалів; джерела світла, прилади вмикання та керування; освітлювальні та світлові прилади й установки ультрафіолетового, видимого й інфрачервоного випромінювань).

2. Електроенергетика

2.1. Електросистеми та їх автоматизація: загальні питання; стан та перспективи розвитку, надійність, проектування, експлуатація, тарифи на електроенергію, режими, характеристики. Параметри й показники. Якість електроенергії. Автоматизація. Захист. Вимірювання електричних величин. Телемеханіка. Зв'язок.

2.2. Електричні станції. Підстанції й мережі: загальні питання. Проектування й будівництва електричної частини. Техніко-економічні розрахунки, схеми електричної частини, розподільчі пристрої й компонування; вибір монтажу, нормальні експлуатаційні режими. Ремонт та обслуговування, власні потреби; аварії, короткі замкнення та спеціальні режими; рухомі електричні станції й підстанції, установки аварійного та гарантованого живлення; повітряні електричні мережі та лінії електропередачі, їхні основні характеристики й параметри, конструктивні рішення, проектування й розрахунок, основні конструктивні елементи; будівництво і монтаж, експлуатація; кабельні електричні мережі та лінії, основні характеристики й параметри, проектування та розрахунки, основні та допоміжні конструктивні елементи, спорудження кабельних ліній, мереж, машини, механізми, інструменти; техніка високих напруг, загальні питання, ізоляція, перенапруги, заземлення та заземлювачі, лабораторії високих напруг та випробувальні стенди, електромагнітна сумісність в системах керування та зв'язку, електропостачання міст, промислових підприємств, житлових та громадських домів та споруд, проектування й експлуатація, електропостачання галузей промисловості, житлових та громадських споруд, електромонтажні роботи, виробни, матеріали.

2.3. Традиційні, нетрадиційні й альтернативні джерела електроенергії.

3. Критичні матеріали: статті, відзиви, рецензії, погляди і т. д. стосовно окремих публікацій за різними аспектами досліджень, вироблення, споживання, перетворення і т. д. електрики та електроенергії; перспективні задачі, вибір напрямів у дослідженнях, розробках, застосуванні електрики, захисті електричних пристроїв та систем, охороні праці та навколишнього середовища; матеріали з різними підходами та поглядами відносно методики розрахунку, конструювання, оцінки економічної ефективності електричних пристроїв та систем; статті та погляди різних авторів відносно термінології, визначень, державних стандартів, норм і т. і., які стосуються електрики та її використання.

Редакція сподівається на активну участь кореспондентів (авторів) у кожному виданні. В теперішній час журнал видається два рази на рік. Зі збільшенням потоку статей періодичність виходу журналу буде збільшуватись (до 3-4 номерів на рік).

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ

На початку статті автори обов'язково пояснюють актуальність досліджуваних питань та об'єктивно викладають їх існуючий стан (у тому числі з посиланням на джерела, видані не пізніше п'яти років тому), а також формулюють мету статті. У змісті статті лаконічно та доведено наводяться використані авторами припущення, методи, підходи та сутність одержаних наукових результатів, доводиться їхня достовірність. У висновках коротко формулюються найважливіші наукові результати та положення, одержані у статті.

Статті приймаються підготовленими у редакторі Word for Windows (v.6 і вище).

Параметри сторінки:

- розмір сторінки – А4 (210x297);
- орієнтація – книжна;
- шрифт – Times New Roman Cyr, розмір - 12 pt;
- міжрядковий інтервал – 1,5;
- поля – 20 мм.

Структура статті

Послідовність розміщення матеріалу статті: індекс УДК, місто та повна назва установи, в якій працює автор; прізвище та ініціали автора(ів), назва статті, анотація та ключові слова трьома мовами: російською, українською та англійською; текст статті, список літератури. Рукопис статті має бути підписаний всіма авторами. Наявність анотації обов'язкова.

Текст статті: приймаються статті російською, українською і англійською мовами. Розмір статті складає (4–14) сторінок (у тому числі, не більше 5 рисунків).

У статті необхідно уникати зайвої деталізації, проміжних формул і висновків, громіздких математичних виразів; не слід наводити відомі факти, повторювати зміст таблиць і ілюстрацій у тексті. Текст статті не повинен мати рукописних виправлень і позначок. Стаття не повинна вміщувати граматичних або інших помилок, а також - повинна відповідати тематиці журналу «Електротехніка та електроенергетика» й вимогам ВАК щодо фахових видань.

Анотація

Об'єм анотації не повинен перевищувати 40 слів.

Ілюстрації

Ілюстрації подають на окремих листах та у окремих файлах (формат .TIF з роздільною здатністю не менш 200 dpi, двоколірні або напівколірні (у градаціях сіро-

го), .PCX, .BMP). Ілюстрації нумерують та підписують унизу. Якщо ілюстрації вставлено у документ Word, подати окремі файли з ними. Мінімальний розмір фотографій 6x5 см.

ВИКОНАННЯ ІЛЮСТРАЦІЙ РЕДАКТОРОМ MICROSOFT WORD (А ТАКОЖ ІНШИМИ РЕДАКТОРАМИ), ТА ВСТАВКА ЇХ БЕЗПОСЕРЕДНЬО У ТЕКСТ СТАТТІ НЕ ДОЗВОЛЯЄТЬСЯ.

Таблиці

Таблиці мають бути розраховані на ширину колонки (8,5 см), або на ширину сторінки. Таблиці повинні містити лише необхідну інформацію.

Формули

Формули виконуються за допомогою убудованого у Word for Windows редактора Microsoft Equation. Їх нумерують у дужках праворуч:

$$Z(\Theta) = 10 \log \left(\frac{\bar{y}^2}{s^2} \right). \quad (3)$$

Бажано, щоб ширина формули не перевищувала 8 см. Формули більшого розміру записують декількома рядками.

Перелік посилань

Перелік посилань у кінці рукопису подається мовою оригіналу згідно з послідовністю посилання в тексті статті та вимогами відповідного ДСТУ. Посилання на літературу у тексті позначаються цифрою у квадратних дужках.

У довідці про авторів необхідно навести прізвища, ім'я, та побатькові (повністю), місто роботи, посаду, вчений ступінь, адресу, номери телефонів, e-mail. Необхідно вказати, з ким вести переговори у разі необхідності.

У редакцію журналу необхідно подати:

- 1). роздруковану статтю у 2-х примірниках;
- 2). експертний висновок про можливість опублікування;
- 3). довідку про авторів;
- 4). диск CD-RW з текстом статті, файлами ілюстрацій, довідкою про авторів. Дозволяється замість пред'явлення дискети направити зазначені файли електронною поштою на адресу редакційно-видавничого відділу. Файл статті називати прізвищем першого автора (латинськими літерами).

Гонорар авторам не сплачується, рукописи, дискети, коректура та відбитки статей авторам не надсилаються. Редакція залишає за собою право на літературну редакцію та скорочення тексту статті без повідомлення авторів.

СТАТТІ, ЯКІ НЕ ЗАДОВОЛЬНЯЮТЬ ВКАЗАНИМ ВИМОГАМ, НЕ РОЗГЛЯДАЮТЬСЯ.

Адреса редакції: 69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64, ЗНТУ, редакція журналу.
Тел.: (061) 7-698-296 – редакційно-видавничий відділ.
E-mail: rvv@zntu.edu.ua

Наукове видання

Електротехніка та електроенергетика №2/2011

науковий журнал

Головний редактор д.т.н., професор
Заст. гол. редактора к.т.н., доцент

Потапенко Е. М.
Байша О. І.

Оригінал-макет підготовлено у редакційно-видавничому відділі ЗНТУ

Комп'ютерна верстка
Редактор англійських текстів

Зуб С. В.
Войтенко С. В.

Підписано до друку 08.11.2011. формат 60×84/8, 8,84 др. арк.
Тираж 300 прим. Зам. № 1643
69063 м. Запоріжжя, ЗНТУ, друкарня, вул. Жуковського, 64

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції від 27.12.2005 р., серія ДК № 2394