

динаміка. – 2007. – № 1. 9. Simon P. L. C. de Vries P. H. S., Middelhoek S. Autocalibration of Silicon Hall Devices // IEEE International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Vol. 2, P. 237–240, June 1995. 10. Кобус А., Тушинский Я. Датчики Холла и магниторезисторы / Пер. с польск. – М.: Энергия, 1971. 11. Дехтяренко П.И. Синхронное детектирование в измерительной технике и автоматике. – К.: Техніка, 1965.

УДК 621.311.2

А.А. Мельник

Донецький національний технічний університет

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ІЗ НЕРІВНОМІРНИМ РУХОМ

О Мельник А.А., 2009

**Показана побудова математичної моделі та виконано моделювання робочих процесів в електромеханічній системі із нерівномірним рухом, змінними моментами інерції та сил опору на прикладі кантувача маніпулятора.**

**Construction of the combined mathematical model is shown and modelling of working processes in electromechanical system of the manipulator which is difficult system with non-uniform movement is executed.**

**Постановка проблеми.** Протягом останніх десяти років, коли на лінії стану “900” ЗАТ “ММЗ “ІСТІЛ” активно почали виробляти сортамент “коло 80”, з’явилися проблеми, пов’язані із різким збільшенням кількості вмикань приводного двигуна кантувача маніпулятора. Кількість вмикань досягала 800–1000, що в кілька разів перевищувало допустиму норму для двигунів краново-металургійної серії МТКФ (МТКН) [1]. Термін експлуатації такого двигуна не перевищував 1,5–2 місяці. Причому вихід двигуна із ладу був можливий під час технологічного процесу прокатки, а спричиняє зупинку усіх ланок технологічного ланцюга. Час заміни зіпсованого двигуна може дорівнювати двом – двом з половиною годинам. Виникає потреба дослідити реальне завантаження двигуна у різні періоди року, та мати можливість враховувати вплив температури навколишнього середовища, кількість вмикань підряд та вплив характеру навантаження без втручання у технологічний цикл цеху. З іншого боку, оцінці підлягає діюча система електроприводу та можливість її заміни на універсальнішу, яка забезпечуватиме нормальне функціонування електромеханічної системи кантувача при різних видах сортаменту.

**Аналіз останніх досягнень та публікацій.** Удосконалення сучасного парку обчислювальної техніки, нестримне зростання обчислювальних потужностей персональних комп’ютерів дозволяє створювати вдосконалені моделі електромеханічних об’єктів, відмовлятися від припущень, які істотно знижують точність чисельних розрахунків на моделі. Математичні моделі процесів перетворення енергії розглядалися взагалі за ознакою чи вони є тепловими, електромагнітними чи електромеханічними. У роботах [2, 3, 4 та ін.] створено та розвинуто методики розрахунку теплових процесів, які супроводжують електромеханічне перетворення енергії, в роботах [5, 6, 7 та ін.] вдосконалюються методики досліджень електромагнітних процесів у електромеханічних перетворювачах енергії. Електромеханічні системи із поглибленим розгляданням процесів у механічній частині наведено у [8, 9 та ін.].

**Задача досліджень.** Виконаний аналіз вказує на можливість розроблення суміщеної математичної моделі механізму кантувача, яка поєднуватиме рівняння рівноваги електромагнітних

контурів і теплового балансу приводного двигуна та опис механічної частини одночасно взаємодіючих у часі за допомогою їхньої комп'ютерної реалізації як інтегральної моделі робочих процесів діючої системи кантувача маніпулятора.

**Виклад основного матеріалу.** Електромеханічна система, що досліджується, повинна бути розглянута із урахуванням існуючих деструктивних факторів як з боку виконавчого органа, вплив динамічного моменту при нерівномірному русі, так і з боку теплового стану, надлишкове нагрівання обмотки статора і ротора асинхронного двигуна. Використовуючи принципи системного підходу, виділимо три підсистеми, три – застосована кількість математичних моделей (ММ), що описують поведінку електромеханічної системи кантувача.

Аналіз кінематичної схеми типового кантувача (рис. 1) дозволяє уявити її у першому наближенні двомасовою розрахунковою схемою (до отримання результатів натурального експерименту) (рис. 2) із моментом сил опору і моменту інерції залежно від узагальненої координати  $\varphi$ .

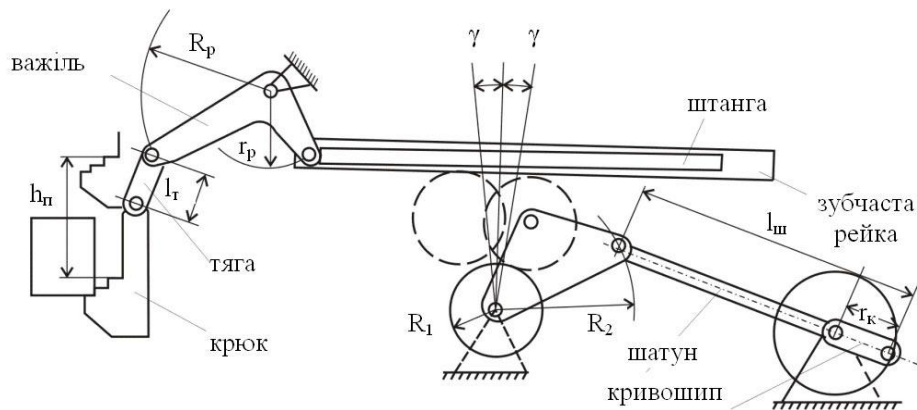


Рис. 1. Кінематична схема механізму

Вважається, що характер  $M_{C2}(a)$  є вхідним даним до розрахунку (рис.3)

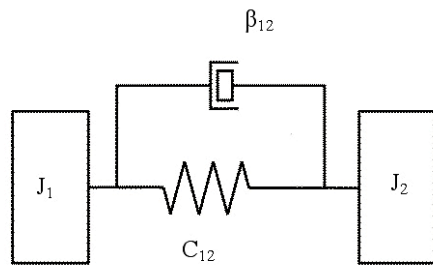


Рис. 2. Розрахункова схема системи від кута повороту зведеного до першої

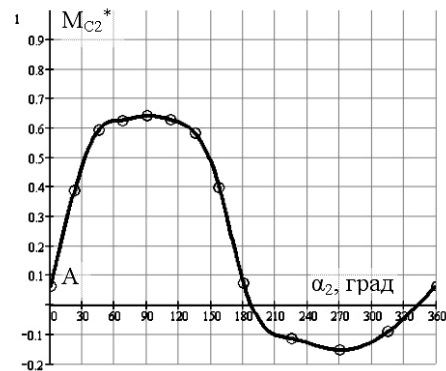


Рис. 3. Залежність значення моменту сил опору зосередженої маси у (відносних одиницях)

Система диференціальних рівнянь двомасової електромеханічної системи із урахуванням змінного характеру моменту інерції і моменту сил опору – ММ1:

$$\begin{cases} M_{ДВ} - M_{C1} - M_{12} = J_1 \frac{dw_1}{dt} \\ M_{12} - M_{C2}(a_2) = J_2(a_2) \frac{dw_2}{dt} + \frac{1}{2} \frac{dJ_2(a_2)}{da_2} \cdot w_2^2 \\ M_{12} = C_{12}(w_1 - w_2) + b_{12}(\dot{w}_1 - \dot{w}_2) \end{cases} \quad (1)$$

де  $M_{дв}$  – рушійний момент,  $M_c$  – момент сил опору першої маси,  $M_{12}$  – пружний момент,  $\omega_1, \omega_2$  – кутові швидкості обертання першої та другої зосереджених мас,  $M_{c2}$  – момент сил опору,  $C_{12}$  – коефіцієнт жорсткості,  $\alpha_2$  – кут обертання,  $J_1, J_2$  – зведені до обертального руху моменти інерції зосереджених мас: двигуна і редуктора, маса заготовлі із елементами конструкції механізму,  $\beta_{12}$  – коефіцієнт опору.

Для моделювання теплового стану приводного двигуна кантувача в режимі частих пусків складено теплові схеми заміщення (ТСЗ) [3]. У зазначеному режимі тепловий зв'язок між статором і ротором незначний та ним можна знехтувати, тому окремо складується ТСЗ для статора і ротора.

Теплова схема заміщення статора (рис. 4) описується системою з 8 тіл (розглядається половина довжини двигуна, зважаючи на симетрію).

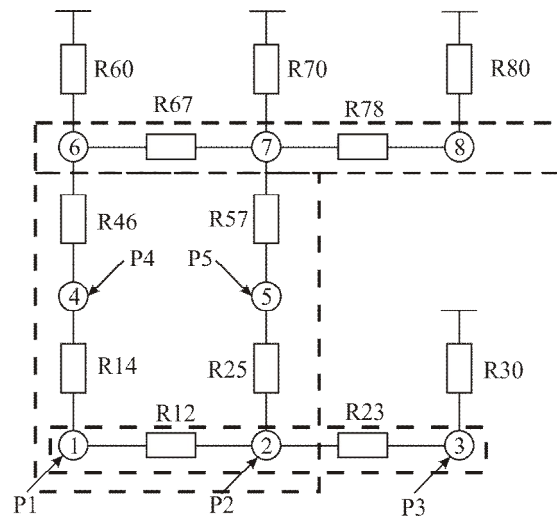


Рис. 4. Теплова схема заміщення статора, що описана системою з 8 тіл:  
1, 2 – частини обмотки в пазах; 3 – лобова частина обмотки; 4, 5 – осердя статора;  
6, 7 – частини корпусу над сердечником статора; 8 – кінцева частина корпусу

Система диференціальних рівнянь має відповідно ТСЗ вісім рівнянь – ММ2 – запишемо їх у компактній матричній формі (2).

$$C \frac{d\Theta}{dt} = \Lambda \Theta - P, \quad (2)$$

де  $C$  – вектор-стовпець теплоємностей елементів ТСЗ;  $\Lambda$  – матриця питомої теплопровідності ТСЗ;  $P$  – вектор-стовпець втрат у вузлах ТСЗ;  $\Theta$  – вектор-стовпець поточних значень перевищень температур вузлів ТСЗ.

Математичний опис процесів перетворення енергії у асинхронних машинах дозволяє отримати всі необхідні складові втрат потужності в динамічних і статичних режимах роботи для розрахунків теплового стану: втрати в обмотці статора і ротора, втрати в сталі, які послужать вхідними даними до розрахунку теплового стану [6, 7]. З іншого боку, уточнені значення температури вузлів теплової схеми заміщення, згруповані по елементах, можуть бути використані для корекції значень активних опорів Т-подібної схеми заміщення.

Параметри асинхронного двигуна подано у вигляді параметрів Т-подібної схеми заміщення (рис. 5): активний опір обмотки статора  $R_s=f(\Theta_s)$ , індуктивність розсіювання обмотки статора  $L_s=f(f_s)$ , активний опір обмотки ротора  $R_r=f(f_r, \Theta_r)$ , індуктивність розсіювання обмотки ротора  $L_r=f(f_r, I_r)$ , індуктивність контуру намагнічування  $L_m=f(I_m)$ ,  $R_m=f(M_c)$ , вважаються функціями відповідних аргументів (рис.6), всі параметри зведені до відносних одиниць.

Схемі заміщення рис. 5 відповідає система диференціальних рівнянь рівноваги напруг статора і ротора короткозамкненого АД у нерухомій ортогональній системі координат статора  $\alpha, \beta$ , в якій еквівалентний нерухомий ротор замінено ротором, що обертається:

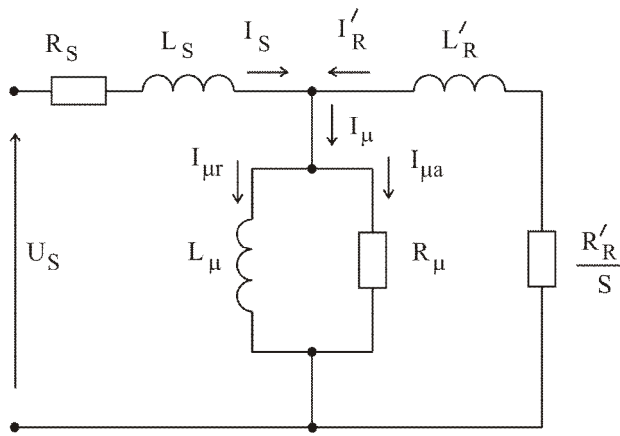


Рис. 5. Повна еквівалентна схема заміщення із розщепленням контуру намагнічення

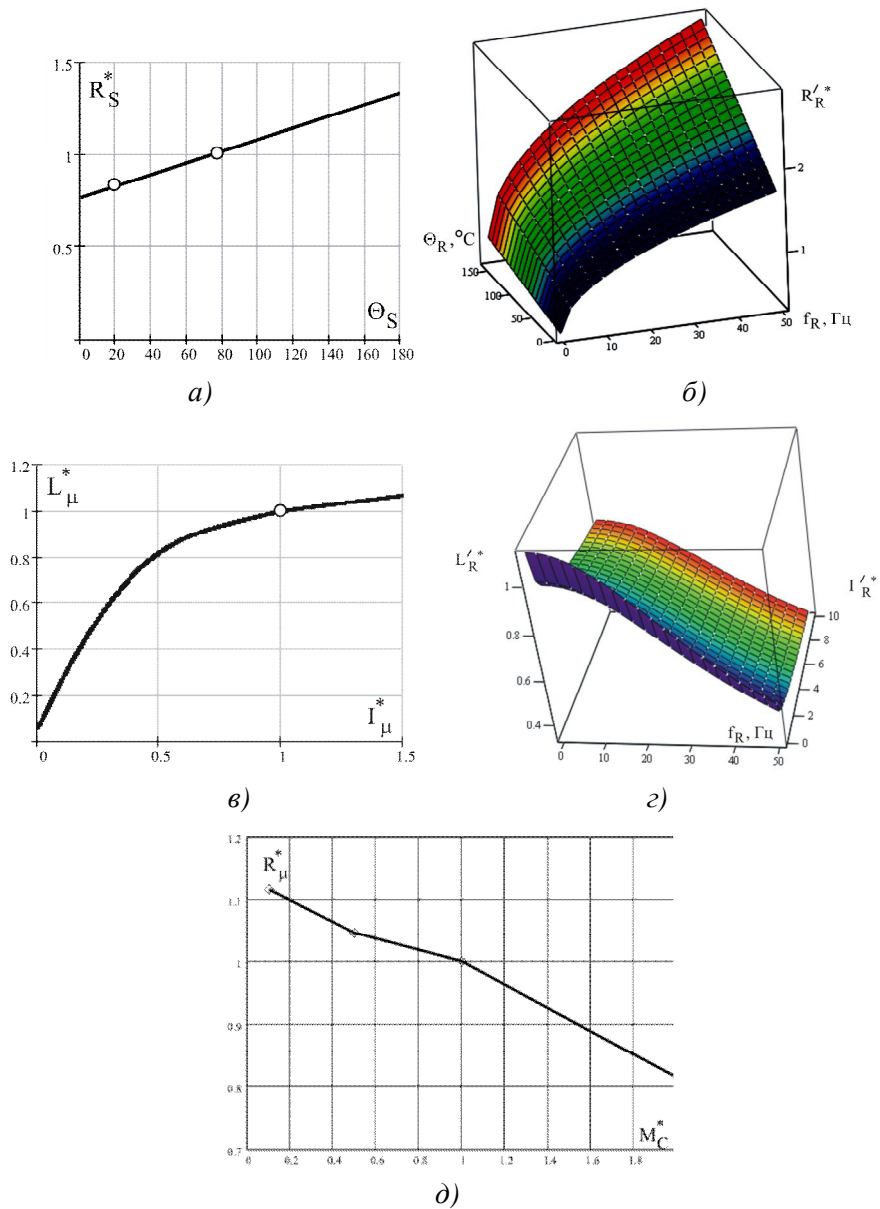


Рис. 6. Залежності відносних параметрів двигуна від його змінних:  
 а – активного опору обмотки статора від температури, б – активного опору обмотки ротора від частоти струму та температури; в – індуктивності взаємодукції від струму намагнічування; г – індуктивності розсіювання обмотки ротора від частоти струму і сили струму, д – втрати в сталі від навантаження на валу (отримано із [6])

$$\begin{aligned} \bar{U}_S &= \bar{I}_S R_S + L_S \frac{d\bar{I}_S}{dt} + L_m \frac{d\bar{I}_m}{dt} \\ 0 &= \bar{I}_R R_R + L_R \frac{d\bar{I}_R}{dt} + L_m \frac{d\bar{I}_m}{dt} - jw_2 \bar{\Psi}_R \end{aligned} \quad (3)$$

де  $\bar{U}_S$  – узагальнений вектор напруги статора;  $L_S$ ,  $L_R$ ,  $L_m$  – індуктивності розсіяння статора і ротора, взаємодуктивність;  $f_R=f_S S$  – частота струму ротора;  $\bar{I}_S$ ,  $\bar{I}_R$ ,  $\bar{I}_m$  – узагальнені вектори відповідно струмів статора, ротора и струму намагнічення.

Ілюстрацією роботи моделі на рис. 7, а наведені часові діаграми електромагнітного моменту та швидкості двигуна в режимі прямого пуску без навантаження (вважається що система знаходиться у т. А рис. 3). Для порівняння на рис. 7, б зображені часові діаграми, які були отримані на традиційній моделі Парка-Горева із постійними значеннями параметрів для номінального режиму роботи двигуна. Істотні відмінності переважно визначаються впливом ефекту витиснення струму ротора, насиченням магнітної системи основним магнітним потоком та потоками розсіяння, нагріванням обмоток статора і ротора під час пуску системи.

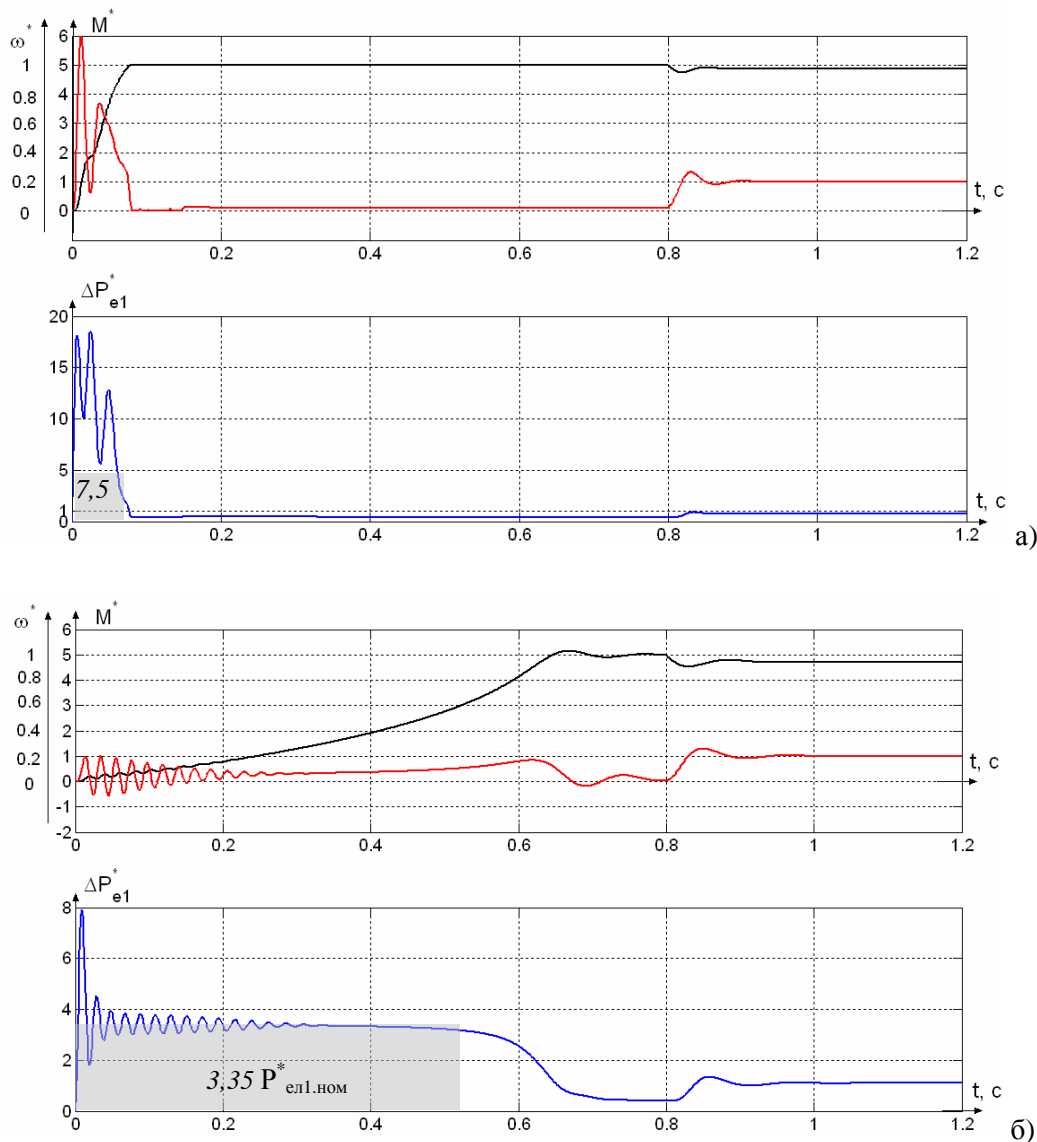


Рис. 7. Часові діаграми обчислювального експерименту для прямого пуску асинхронного двигуна, залежності відносних значень моменту, кутової частоти обертання ротора та втрат в обмотці статора (у відносних одиницях)

З рис. 7, а очевидно, що із урахуванням  $R'_2=f(f_2, \Theta_2)$  та  $L'_2=f(f_2, I_2)$  розгін двигуна без навантаження відбувається за 0,1 с, причому в обмотці статора виділяється  $7,5 P_{\text{елл.ном}}^*$ , а за припущенням  $R'_2=\text{const}$  та  $L'_2=\text{const}$  за відсутності навантаження на валу маємо розгін двигуна майже в шість разів довше – 0,6 с, але втрати в обмотці статора становлять  $3,35 P_{\text{елл.ном}}^*$ .

З рис. 8 очевидно, що за один пуск двигуна, при втратах в обмотці статора, які відповідають моделюванню режиму пуску із урахуванням  $R'_2=f(f_2, \Theta_2)$  та  $L'_2=f(f_2, I_2)$  та втрат в сталі, відбувається в два рази менше нагрівання для обмотки статора, а саме на 0,8 °С, за рахунок уточненого часу перехідного процесу – розгону двигуна, порівняно із варіантом чисельних розрахунків для сталих значень параметрів схеми заміщення.

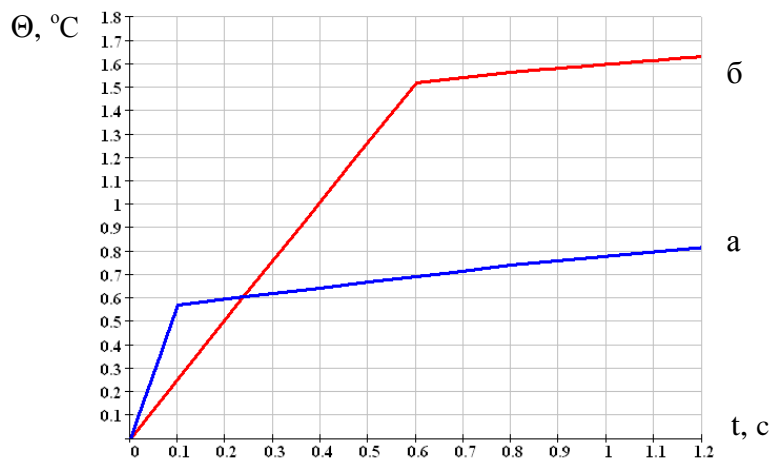


Рис. 8. Нагрівання обмотки статора за час розгону системи:  
а – із урахуванням втрат в обмотках, втрат у сталі та часу розгону електромеханічної системи;  
б – без урахування зазначених залежностей

Отже, сукупність одночасно взаємодіючих у часі математичних моделей ММ1-ММ3 (за допомогою їх комп'ютерної реалізації в середовищі MATLAB/Simulink) описує функціонування електромеханічної системи із нерівномірним рухом, на прикладі механізму кантувача маніпулятора.

**Висновки.** 1. Розроблено математичну модель електромеханічної системи із нерівномірним рухом, змінними моментами інерції та сил опору, урахувуючи особливості перехідних електромагнітних та теплових процесів, модель відображає процеси перетворення енергії у приводному двигуні та роботу механічної системи із нерівномірним рухом на прикладі кантувача маніпулятора.

2. За допомогою моделі встановлено, що при втратах в обмотці статора, які відповідають моделюванню режиму пуску, із урахуванням змінних параметрів схеми заміщення відбувається в два рази менше від нагрівання для обмотки статора, порівняно із варіантом чисельних розрахунків для сталих значень параметрів схеми заміщення.

3. Діюча система електроприводу кантувача повинна бути замінена на сучасну систему із частотним або векторним керуванням, що є метою подальших натурних та розрахункових досліджень на моделі, яка пропонується, з огляду на вибір алгоритму керування частотою обертання, моментом та положенням в приводних короткозамкнених асинхронних двигунах.

1. Борисенко В.П., Сидоров В.А., Мельник А.А. Особливості дослідження стану електромеханічної системи кантувача // *Наук. праці Донецького національного технічного університету. Сер. Електротехніка і енергетика. Вип. 7 (128).* – Донецьк: ДонНТУ, 2007. – С. 54–57. 2. Бурковский А.Н., Ковалев Е.Б., Коробов В.К. *Нагрев и охлаждение электродвигателей во взрывоне-проницаемом исполнении.* – М.: Энергия, 1970. – 198 с. 3. Бурковский А.Н., Рыбалко О.А., Кустовая Е.Ю., Мельник А.А., Ильющенкова Л.Д. *Особенности теплового расчета закрытых обдуваемых асинхронных двигателей в режимах работы S5 и S7* // *Взрывозащищенное электрооборудование:*

Сб. научных трудов УкрНИИВЭ / Под общей ред. д-ра техн. наук, проф. В.С. Дзюбана. – Донецк: ООО “Юго-Восток, Лтд”, 2006. – С. 209–217. 4. Мельник А.А. Исследование процесса нагрева элементов конструкции закрытого обдуваемого асинхронного двигателя в среде MATLAB/Simulink // Тр. IV Всерос. научн. конф. “Проектирование научных и инженерных приложений в среде MATLAB”. – 2009. 5. Виноградов А.Б. Учет потерь в стали, насыщения и поверхностного эффекта при моделировании динамических процессов в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе / А.Б. Виноградов // Электротехника. – 2005. – № 5. – С. 57–61. 6. Карась С.В., Ковалев Е.Б., Толочко О.И., Чекавский Г.С., Анализ процессов в асинхронном двигателе с учетом потерь в стали методом математического моделирования // Зб. наук. праць ДонНТУ. Сер. Електротехніка і енергетика. Вип. 21. – Донецьк: ДонДТУ, 2000. С. 182–187. 7. Мельник А.А. Численное моделирование процесса частотного пуска асинхронного двигателя с учетом эффекта вытеснения тока в стержнях ротора в среде Matlab // Вісн. Кременчуцьк. держ. політехн. ун-ту імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КДПУ, 2008. – Вип. 4 (51), ч. 2. С. 78–82. 8. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин: Учебн. для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1988. – 640 с. 9. Ковалев Е.Б., Толочко О.И., Чекавский Г.С. Математическая модель электромеханической системы “асинхронный двигатель – кривошипно-шатунный механизм” // Збірник наукових праць ДонНТУ. Сер. Електротехніка і енергетика. Вип. 17. – Донецьк: ДонНТУ, 2000. С. 31–34.

УДК 621.313.32

А.П. Никифоров

г. Донецк, ГБУЗ “Донецкий национальный технический университет”

## ЗАДАЧИ ЗАЩИТЫ И УПРАВЛЕНИЯ, РЕШАЕМЫЕ ТЕРМИНАЛОМ КОНТУРА НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ СЕТИ

© Никифоров А.П., 2009

**Запропоновано новий тип терміналу релейного захисту й автоматики всієї гальванічно зв'язаної розподільної мережі напругою 6-35 кВ. Робота терміналу дає змогу підвищити коефіцієнт самоліквідації однофазних замикань на землю, зменшити їх руйнівний вплив на високовольтне устаткування, надати повну, наочну, оперативну інформацію про суть подій, що відбуваються у мережі.**

**The new type of the terminal of relay protection and automatics is offered by a voltage 6-35 kV. Work of the terminal allows to increase factor of self-liquidation of single-phase short circuits on the ground to reduce their destroying influence by the high-voltage equipment of a network, to give the full, evident, operative information on essence of occurring events in a distributive network.**

**Постановка проблемы.** Развивая полученные автором результаты в области разработки конструктивных решений, связанных с уменьшением последствий повреждения фазной изоляции распределительной сети напряжением 6–35 кВ, выделим следующий ряд положений общего характера. Под общим характером будем понимать возможность распространения результатов и методов, разработанных для одной из областей РЗ, на возможно более широкий круг задач РЗ (в принципе на область РЗ в целом). Наиболее приемлемым для рассматриваемых задач оказался структурно-лингвистический метод определения сути процессов [1]. Метод основан на аналогии между структурой объектов и синтаксисом языка. В рамках этого метода считается, что объекты состоят из соединенных подобъектов так же, как фразы и предложения строятся путем соединения слов, а слова составляются из букв [1, 2]. Будем использовать в дальнейшем рассмотрении следующие положения общего характера.