

УДК 621-926

## КОМПЕНСАЦІЯ РІЗКО-ЗМІННОГО СТРУМУ ЯКОРЯ ПОТУЖНИХ СИНХРОННИХ ПРИВОДІВ ЗАСОБАМИ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ ЗБУДЖЕННЯ ІЗ НЕСТАНДАРТНИМ АЛГОРИТМОМ КЕРУВАННЯ

- БОРОДАЙ В.А.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електропривода Національного ТУ „Дніпровська політехніка”, Дніпро, Україна, e-mail: Boroday\_va2@ukr.net;
- БОРОВИК Р.О.** інженер, асистент, асистент кафедри електропривода Національного ТУ „Дніпровська політехніка”, Дніпро, Україна, e-mail: bogovyk.r.o@nmu.one;
- НЕСТЕРОВА О.Ю.** канд. пед. наук, доцент, доцент кафедри перекладу Національного ТУ „Дніпровська політехніка”, Дніпро, Україна, e-mail: olnesterova1@rambler.ru.

**Мета роботи.** Розробка автоматичної системи збудження із нестандартним алгоритмом керування потужних синхронних приводів механізмів гірничо-металургійного комплексу, які характеризуються періодичними ударними навантаженнями.

**Методи досліджень.** Для проведення досліджень використані положення теорії електричних машин, методи синтезу автоматичних систем, математичне моделювання у пакеті Matlab.

**Отримані результати.** Створено варіант моделі синхронного двигуна для випадків частотного керування, на базі якого синтезовано структуру системи автоматичного керування збудженням, отримано уточнюючий коефіцієнт для розрахунку підсилення інтегральної частини регулятора та запропоновано алгоритм раціонального керування синхронним приводом за умови кращої нейтралізації зусиль руйнування ізоляції дротів якірних котушок двигуна.

**Наукова новизна.** Запропоновано оригінальний варіант динамічної моделі синхронного двигуна, яка дозволяє скористатись класичним методом синтезу регулятора повздовжнього струму якоря, що стабілізується магнітним потоком збудження, а також сформульовано вимоги до реалізації нестандартного алгоритму керування збудженням, що забезпечує суттєве зменшення динамічного струму якоря в момент пікової дії навантаження.

**Практична цінність.** Використання запропонованого методу дозволить створити автоматичну систему збудження потужних синхронних двигунів, завдяки якій можливо збільшити міжремонтний термін роботи синхронного приводу.

**Ключові слова:** потужний синхронний двигун; система автоматичного керування збудженням; модель двигуна для частотного керування; синтез та уточнення параметрів регулятора; обґрунтування методу керування

### ВСТУП

Відмінною особливістю механізмів, робочий інструмент яких – це валки руйнування руд корисних копалин або валки пластичної обробки металів, є те, що специфіка їх експлуатації передбачає періодичне виникнення ударних навантажень. Наслідком цього є значний сплеск струмів в обмотках привідних синхронних двигунів, що у свою чергу провокує різко-змінні зусилля, дія яких викликає вібрування лобових частин якірних котушок. Врешті вплив останніх стає причиною аварійних ситуацій, пов'язаних із пошкодженням ізоляційних матеріалів дротів котушок якоря в зоні їх переходу із магнітопроводу в лобову частину, ремонт яких вимагає значних фінансових витрат [1].

### АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Зазвичай пікові навантаження компенсують механічними або електромагнітними способами. Наявність абсолютно жорсткої механічної характеристики

синхронного приводу виключає використання в таких електромеханічних системах кінетичних накопичувачів енергії. Щодо пружних муфт, то їх застосування передбачає визначення оптимального значення параметра компенсації, аби не створити умови коливання системи приводу стає неприпустимо коливальною [1].

Серед інших механічних способів нейтралізації неприємної коливальності є спосіб передрозгону двигуна [2], який культивує до початку робочого режиму підвищення жорсткості електромеханічної системи шляхом вибору зазорів шпindelних пристроїв прокатних валків. Це значно знижує ударне навантаження в момент захвату металу, але спосіб потребує визначення оптимального режиму передрозгону оскільки є вірогідність повторного розкриття люфтів.

Не потребує доказу те, що для якісного електромагнітного демпфування коливань кута навантаження тільки завдяки індукторному контуру [3] необхідно забезпечити швидкісне та суттєве форсування напруги збудження. Перепоною реалізації такої умови є

неспроможність серійних автоматичних збудників забезпечити кратність форсування напруги необхідного рівня, а також є питання щодо стійкості обмоток двигунів до різко-змінного підвищення напруги. Як результат швидкодія регулювання поля збудження стає недостатньою, а ефективність компенсації коливань суттєво падає.

Досить перспективним є спосіб підвищення протидії синхронних приводів [4] ударним навантаженням шляхом прискорення швидкості форсування збудження за рахунок розряду попередньо зарядженого конденсатора в цьому ж контурі з одночасною подачею напруги від тиристорного перетворювача. Але питання стійкості ізоляції двигуна у цьому випадку також не є вирішеним.

До традиційних методів електромагнітного демпфування коливань електромеханічних систем слід віднести відомі закони керування збудженням [5]–[7]:

- підтримка постійного рівня коефіцієнта потужності двигуна;
- стабілізація реактивної потужності двигуна заданої величини;
- компенсація реактивного струму якоря.

Так, в методі [8] використана векторна система збудження потужного двигуна із стабілізацією коефіцієнта потужності. Спосіб досить добре нейтралізує коливання системи з незначною амплітудою, але у випадку пікового навантаження його дія залишає бажати кращого.

Існує клас автоматичних систем збудження, де якість компенсації коливань забезпечується за рахунок нелінійних зворотних зв'язків [9], які також добре поглинають збурення малої амплітуди, а щодо максимальних значень, то їх робота також має низьку ефективність.

В джерелі [10] показана доцільність використання методу програмного керування напругою збудника для зниження динамічних навантажень в перехідних режимах. Суть методу полягає в цілеспрямованому живленні обмотки збудження періодичною змінною напругою, яка окрім зменшення періодичної складової електромагнітного моменту частково підвищує його середню складову, якої достатньо для плавного розгону двигуна до синхронної частоти обертання. Недоліком методу є необхідність використання реверсивного збудника.

Як варіант протидії ударним навантаженням може бути запропонована електромеханічна система граничного ступеня стійкості із мінімальною коливалістю пружної механічної підсистеми [11]. Суть методу полягає в оптимальному налагодженні регулятора та пружності системи в наперед оговорених умовах. Але і такий спосіб також лише частково відповідає вимогам компенсації екстремальних навантажень.

Метод, наведений у джерелах [12]–[14] демонструє потенційну можливість компенсації пускових

струмів за рахунок випереджаючого збільшення напруги збудження на прогнозований провал напруги живлення. Але система збудження у даному випадку адаптована для роботи синхронного генератора.

Усі зазначені методи, на жаль, мало відповідають умовам нейтралізації шкідливих зусиль в якірних котушках, що є пріоритетом при розв'язанні поставленої задачі. Показана актуальна проблема вирішена шляхом розв'язання оптимізаційної задачі, де в комплексі визначені необхідне значення пружності і фіксовані налаштування контуру збудження [15]. До параметрів налаштування системи входять час завчасного початку зміни форсування і кінцевого рівня напруги збудження. При позитивному вирішенні проблеми метод має недолік, який полягає в необхідності періодичного переналаштування системи при кожній зміні фізичних та геометричних властивостей вхідного матеріалу обробки.

## МЕТА РОБОТИ

Розробка автоматичної системи збудження із нестандартним алгоритмом керування потужних синхронних приводів механізмів гірничо-металургійного комплексу, які характеризуються періодичними ударними навантаженнями.

## ВИКЛАД ГОЛОВНОГО МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Уникнути зазначених недоліків пропонується за рахунок створення системи автоматичного регулювання збудженням із новими властивостями. Для цього скористаємося математичним описом роботи синхронного двигуна, реалізованим у відносних одиницях (в.о.). Вхідні рівняння балансу напруг синхронної машини із повним набором обмоток роторної частини мають такий вигляд [5], [16].

$$\begin{cases} \dot{U}_d = i_d \dot{r}_a + p \dot{\Psi}_d - \dot{\omega}_l \dot{\Psi}_q; \\ \dot{U}_q = i_q \dot{r}_a + p \dot{\Psi}_q + \dot{\omega}_l \dot{\Psi}_d; \\ \dot{U}_f = i_f \dot{r}_f + p \dot{\Psi}_f; \\ 0 = i_{kd} \dot{r}_{kd} + p \dot{\Psi}_{kd}; \\ 0 = i_{kq} \dot{r}_{kq} + p \dot{\Psi}_{kq}, \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \dot{\Psi}_d = \dot{x}_d i_d + \dot{x}_{ad} i_f + \dot{x}_{ad} i_{kd}; \\ \dot{\Psi}_q = \dot{x}_q i_q + \dot{x}_{aq} i_{kq}; \\ \dot{\Psi}_f = \dot{x}_{ad} i_d + \dot{x}_f i_f + \dot{x}_{ad} i_{kd}; \\ \dot{\Psi}_{kd} = \dot{x}_{ad} i_d + \dot{x}_{ad} i_f + \dot{x}_{kd} i_{kd}; \\ \dot{\Psi}_{kq} = \dot{x}_{aq} i_q + \dot{x}_{kq} i_{kq}, \end{cases} \quad (2)$$

де  $\dot{U}_d, \dot{U}_q, \dot{U}_f, i_d, i_q, i_f, i_{kd}, i_{kq}$  – напруги і струми в осях  $d$ - $q$  котушок якоря, обмоток збудження та демпферної обмотки, в.о.;  $\dot{r}_a, \dot{r}_f, \dot{r}_{kd}, \dot{r}_{kq}$  – активні опори якоря, збудження та демпферної обмотки, в.о.;  $\dot{x}_{ad}, \dot{x}_{aq}$  – реак-

тивні опори реакції якоря в осях  $d$ - $q$ , в.о.;  $\dot{x}_d$ ,  $\dot{x}_q$ ,  $\dot{x}_f$ ,  $\dot{x}_{kd}$ ,  $\dot{x}_{kq}$  – реактивні опори в осях  $d$ - $q$  якорних котушок, збудження та демпферної обмотки, в.о.;  $\dot{\Psi}_d$ ,  $\dot{\Psi}_q$ ,  $\dot{\Psi}_f$ ,  $\dot{\Psi}_{kd}$ ,  $\dot{\Psi}_{kq}$  – потокозчеплення в осях  $d$ - $q$  якоря, збудження та демпферних котушок, в.о.;  $p=d/dt$  – оператор Лапласа;  $\dot{\omega}_1$  – частота обертання поля якоря.

В основу розробки моделі був покладений випадок побудови двигуна для частотного керування. Для цього із рівнянь потокозчеплення контуру збудження та демпферної обмотки (2) отримано струми

$$\begin{aligned} i_{kd} &= k_9 \Psi_{kd} - k_{10} i_d - k_{11} \Psi_f; \\ i_f &= k_6 \Psi_f - k_7 i_d - k_8 \Psi_{kd}, \end{aligned} \quad (3)$$

де

$$k_1 = \frac{1}{\dot{x}_{kd}}; \quad k_2 = \frac{\dot{x}_{ad}}{\dot{x}_{kd}}; \quad k_3 = \dot{x}_{ad} - \dot{x}_{ad} k_2;$$

$$k_4 = \dot{x}_f - \dot{x}_{ad} k_2; \quad k_5 = \dot{x}_{ad} k_1; \quad k_6 = \frac{1}{k_4};$$

$$k_7 = \frac{k_3}{k_4}; \quad k_8 = \frac{k_5}{k_4}; \quad k_9 = k_1 + k_2 k_8,$$

$$k_{10} = k_2 + k_2 k_7; \quad k_{11} = k_2 k_6.$$

Базуючись на результатах рівнянь (1) та (3), визначено потокозчеплення якоря за віссю  $d$

$$\dot{\Psi}_d = k_{12} \dot{i}_d + k_{13} \dot{\Psi}_f - k_{14} \dot{\Psi}_{kd}, \quad (4)$$

де

$$k_{12} = \dot{x}_d - \dot{x}_{ad} [k_7 + k_{10}]; \quad k_{13} = \dot{x}_{ad} [k_6 - k_{11}];$$

$$k_{14} = \dot{x}_{ad} [k_8 - k_9].$$

Згідно із системою рівнянь (1) похідні потокозчеплень мають вигляд

$$\begin{aligned} p \dot{\Psi}_f &= \dot{U}_f + k_{16} \dot{i}_d + k_{17} \dot{\Psi}_{kd} - k_{15} \dot{\Psi}_f; \\ p \dot{\Psi}_{kd} &= k_{19} \dot{i}_d + k_{20} \dot{\Psi}_f - k_{18} \dot{\Psi}_{kd}; \\ p \dot{\Psi}_{kq} &= k_{22} \dot{i}_q - k_{21} \dot{\Psi}_{kq}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$k_{15} = \dot{r}_f k_6; \quad k_{16} = \dot{r}_f k_7; \quad k_{17} = \dot{r}_f k_8;$$

$$\text{де } k_{18} = \dot{r}_{kd} k_9; \quad k_{19} = \dot{r}_{kd} k_{10}; \quad k_{20} = \dot{r}_{kd} k_{11};$$

$$k_{21} = \frac{\dot{r}_{kq}}{\dot{x}_{kq}}; \quad k_{22} = \frac{\dot{r}_{kq} \dot{x}_{aq}}{\dot{x}_{kq}}.$$

Скориставшись розглянутими залежностями, запишемо рівняння напруги

$$\dot{U}_d = \dot{i}_d [\dot{r}_a + k_{12} p] + \dot{E}_d,$$

$$\text{де } \dot{E}_d = k_{13} p \dot{\Psi}_f - k_{14} p \dot{\Psi}_{kd} - \dot{\omega}_1 \dot{\Psi}_q.$$

Тоді перехідна функція з урахуванням останнього рівняння напруги виглядає

$$\frac{\dot{i}_d}{\dot{U}_d - \dot{E}_d} = \frac{1/\dot{r}_a}{T_d p + 1}, \quad \text{де } T_d = \frac{k_{12}}{\dot{r}_a}. \quad (6)$$

Подібним чином формується перехідна функція за віссю  $q$ :

$$\begin{aligned} \dot{i}_{kq} &= k_{23} \dot{\Psi}_{kq} - k_{24} \dot{i}_q, \quad \dot{\Psi}_q = k_{26} \dot{\Psi}_{kq} + k_{25} \dot{i}_q; \\ k_{23} &= \frac{1}{\dot{x}_{kq}}, \quad k_{24} = \frac{\dot{x}_{aq}}{\dot{x}_{kq}}, \quad k_{25} = \dot{x}_q - \dot{x}_{aq} k_{24}, \quad k_{26} = \dot{x}_{aq} k_{23}; \end{aligned}$$

$$\frac{\dot{i}_q}{\dot{U}_q - \dot{E}_q} = \frac{1/\dot{r}_a}{T_q p + 1}, \quad (7)$$

$$\text{де } T_q = \frac{k_{25}}{\dot{r}_a}, \quad \dot{E}_q = k_{26} p \dot{\Psi}_{kq} + \dot{\omega}_1 \dot{\Psi}_d.$$

Для завершення побудови моделі синхронного двигуна слід навести рівняння механічної частини приводу:

$$\begin{cases} \dot{M}_e = \dot{\Psi}_d \dot{i}_q - \dot{\Psi}_q \dot{i}_d; \\ \dot{M}_e - \dot{M}_c = T_m p \dot{\omega}_1; \\ T_m = \frac{j \omega_b}{M_b p_n}, \end{cases}$$

де  $\dot{M}_e$ ,  $\dot{M}_c$  – моменти двигуна та статичного навантаження, в.о.;  $T_m$  – механічна постійна часу, в.о.;  $j$  – момент інерції системи, в.о.;  $p_n$  – кількість пар полюсів;  $M_b$ ,  $\omega_b$  – базові момент і частота обертання.

Звідки отримана перехідна функція

$$\frac{\dot{\omega}_1}{\dot{M}_e - \dot{M}_c} = \frac{1}{T_m p}. \quad (8)$$

На базі отриманої математичної моделі побудована структурна схема двигуна, до контуру збудження якої додано блоки перетворювача напруги, регулятора струму за віссю  $d$  та підсилювача зворотного зв'язку (рис.1).

Для синтезу регулятора бажаного контуру задіяна його перехідна функція, яка налагоджена за модульним оптимумом.

$$W = \frac{1}{2T_\mu [T_\mu p + 1]}. \quad (9)$$

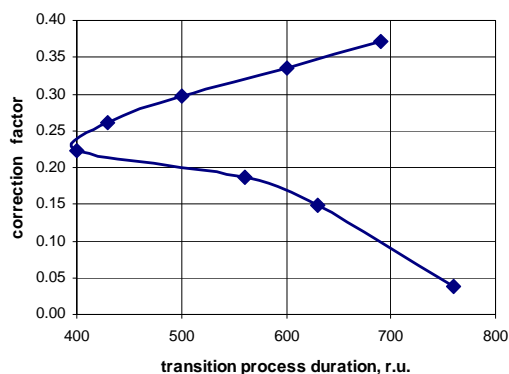
Для такого випадку регулятор має пропорційно-інтегральну структуру

$$W_p = \frac{T_d p + 1}{y T_\mu p}, \quad \text{де } y = \frac{2 \cdot k_p \cdot k_{13} \cdot k_{id}}{\dot{r}_a}. \quad (10)$$



значенням струму якоря при нахилі навантаження. Щодо залишкової коливальності (ділянка 2 рис.3), то ця задача успішно може бути вирішена завдяки, наприклад, закону регулювання збудженням при стабілізації повздовжнього струму якоря на нульовому рівні. Такий алгоритм керування збудженням може бути практично втіленим за відомих параметрів рівня форсування напруги, інтервалів часу його завчасного увімкнення та скиду завдання на струм у нульовий стан.

**Аналіз результатів досліджень.** За запропонованою структурою (рис.1) розрахована та побудована Matlab модель серійного синхронного двигуна СДМЗ-2-24-59-80-УХЛ4. Попередніми дослідженнями встановлено, що визначені за класичною методикою коефіцієнти підсилення регулятора збудження, робота яких стабілізує струм  $i_d$ , створюють умови для часткової коливальності системи. Крім того виявлено, що значного впливу на коливальність системи пропорційна частина регулятора не створює. На відміну від пропорційної, інтегральна частина при зменшенні коефіцієнта підсилення дає задовільний результат компенсації коливальності струму якоря. Цикл дослідів (рис.4) дозволив визначити коефіцієнт корекції інте-



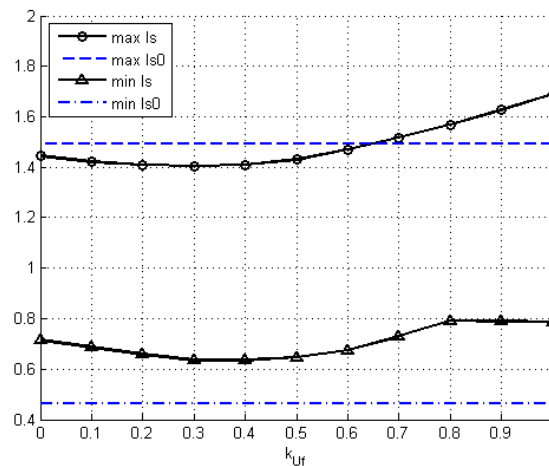
**Рисунок 4.** Визначення коефіцієнту корекції інтегральної частини регулятора

ральної частини регулятора на рівні 0,22 одиниці, завдяки чому стало можливим суттєво зменшити розмах та час тривалості перехідного процесу струму.

Зменшення динаміки системи (рис.1) на підготовчому етапі до появи збурення досягнуто за рахунок встановлення на вході вузла вводу завдання на збудження задавача інтенсивності, коефіцієнт підсилення якого на час поточних досліджень прийнято таким, що дорівнює контурному коефіцієнту  $k_{I5}$  розрахунку потокозчеплення збудження.

При визначенні необхідного рівня форсування збудження було встановлено, що при досягненні деякого зменшеного значення динамічного струму якоря його піковий максимум починає зростати (рис.5), через що подальше прагнення до мінімізації параметру форсування втрачає сенс.

Підхід до визначення часових інтервалів регулювання збудження слід розділити відповідно на час



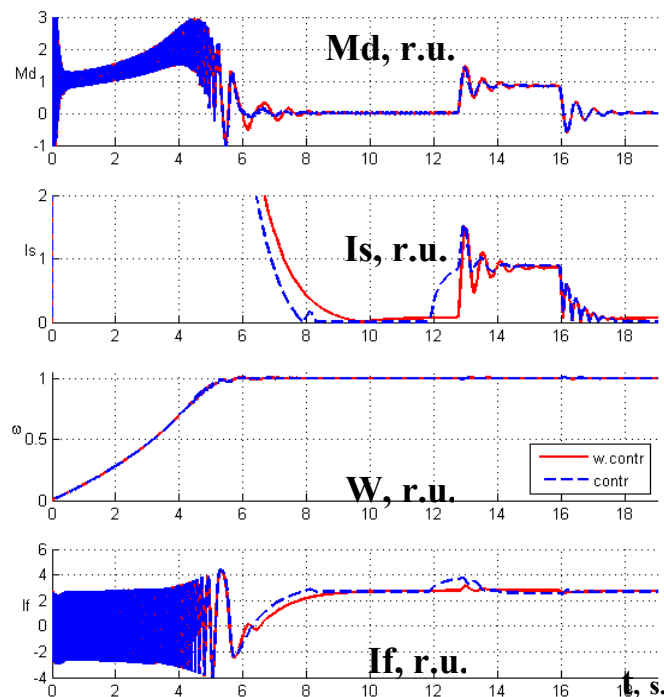
max Is0, min Is0 – струм якоря стандартного збудження, в.о.;  
max Is, min Is – струм якоря нового збудження, в.о.;  
 $k_{Uf}$  – кратність завдання на форсування струму.

**Рисунок 5.** Визначення максимально можливого рівня форсування збудження

завчасного форсування для гарантованого досягнення визначеного рівня струму якоря перед моментом прокатки і час одного напівперіоду його максимального коливання з моменту втягнення деталі у валки. Очевидно, що тривалість форсування залежить від швидкодії зростання струму в обмотці збудження. Можливо вважати, що гарантована тривалість форсування буде достатньою для будь-яких випадків навантаження при її дотриманні на рівні п'яти постійних обмотки збудження. Зрозуміло, що у випадку використання надлишкового терміну може виникнути перегрів двигуна. Тому цей час пропонується оптимізувати за методом джерела [15]. Щодо визначення часу одного напівперіоду максимальної коливальності, яка власне додається до часу форсування, і є межею, після якої завдання на реактивний струм скидається в нульовий стан, то він може бути розрахований через частоту власних коливань системи.

Запропонований алгоритм керування збудженням буде неповним, якщо не розглянути процес пуску двигуна. У даному випадку початок запуску практично не відрізняється від стандартного методу. Навпаки, синхронізація за увімкненого регулювання повздовжнього струму якоря може унеможливити вдале завершення цього процесу через наявність позитивного зворотного зв'язку і використання в системі задавача інтенсивності. Тому такий спосіб керування збудженням передбачає введення в роботу регулятора за відсутності на ньому завдання та при розвантаженому двигуні і тільки після завершення синхронізації, яку потрібно здійснювати із номінальною напругою збудника.

Система електропривода і нестандартний алгоритм керування збудженням випробуваний на моделі, результат дії якої показано на рис.6.



$M_d$  – електромагнітний момент двигуна, в.о.;  $I_s$  – струм якоря, в.о.;  $W$  – частота обертання валу двигуна, в.о.;  
 $I_f$  – струм збудження, в.о.

**Рисунок 6.** Експериментальні перехідні процеси синхронного привода з класичною ( — ) та новою ( - - ) системою збудження

Її запуск виконувався за рахунок демпферної обмотки, а процес синхронізації – шляхом подачі напруги в обмотку збудження при досягненні швидкості обертання двигуна на рівні 0,95 від номінальної. Регулятор при завданні 0,8 максимального форсування вмикався після завершення перехідного процесу у контурі збудження в момент часу 8 с (рис.6). Через 0,5 с з моменту накиду навантаження завдання на струм статора за віссю  $d$  було зменшено до нуля, що відповідає завершенню часу дії максимального сплеску струму якоря. Скид статичного моменту виконано через 3 с. Аналіз отриманих залежностей дозволяє стверджувати, що у момент прикладення навантаження зміна струму якоря зменшилась приблизно втричі, сплеск його максимуму зріс майже на 3 %, а тривалість перехідного процесу скоротилася на 34 %. При знятті навантаження характер зміни струму практично однаковий для обох варіантів.

### ВИСНОВКИ

Є очевидним, що керованим магнітним потоком збудження при накиді навантаження здійснити компенсацію пікового струму якоря досить складно. Тому для ефективної протидії наслідкам ударних навантажень автоматична система збудження повинна забезпечити відмінні властивості роботи на інтервалах максимального збурення і залишкової коливальності струму якоря.

Зважаючи на те, що максимальне збурення – це найбільша складова, яка руйнує ізоляцію котушок якоря, обмежити її вплив можливо шляхом зменшення перепаду струму у момент прикладення навантаження. Для реалізації цього слід до початку прокатки у термін п'яти постійних часу обмотки збудження [15] збільшити завдання на струм за повздовжньою віссю до рівня 0,8 від максимального форсування, а після завершення дії удару (достатня тривалість 0.5 с.) скинути його до нуля, що надалі забезпечить роботу приводу в енергозберігаючому режимі. При цьому величина форсування збудження лімітується, з одного боку, отриманням мінімуму перепаду струму якоря, а з іншого боку – обмеженням екстремуму на рівні не вищому за величину максимуму характерного для класичної системи збудження за однакових умов роботи.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Разработка рекомендаций по эксплуатации синхронного двигателя главного привода автомата прокатки труб ООО «ИНТЕРПАЙП НИКО ТЬЮБ»: отчет о НИР (заключ.) : 030383/Нац. горн. ун-т; рук. А.С. Бешта; исп.: А.В. Балахонцев, Р.А. Боровик, В.В. Барaban. – Днепр, 2013. – 34 с.
- [2] Малакова Е. А. Использование предразгона двигателя прокатной клетки для уменьшения динамической нагрузки / Е. А. Маклакова // *Russian*

- Internet Journal of Electrical Engineering*. - 2017. - Т. 4, No. 1. - С. 19-22.
- [3] Линьков С.А. Анализ систем управления синхронных электроприводов [Текст] / С.А. Линьков, А.С. Сарваров, И.В. Бачурин // ЭСиК. Серия „Теория и практика автоматизированного электропривода”. - 2014. - №2(23). - С. 25-28.
- [4] Слободенюк Д.В. Ємнісний накопичувальний пристрій у контурі збудження синхронної машини для форсування та гасіння поля [Текст] / Д.В. Слободенюк, О.В. Бялобржеський // Електротехніка і Електромеханіка. - 2015. - №2. - С. 16-20.
- [5] Шевченко І.С. Спеціальні питання теорії електропривода. Динаміка синхронного електропривода [Текст] : навч. посіб. / І.С. Шевченко, Д.І. Морозов. - К. : Кафедра, 2014. - 267 с.
- [6] Пат. 53711 Україна, МПК (2009) H02M 1/08. Спосіб стабілізації реактивної потужності синхронного генератора шляхом слідкую чою коригування його напруги збудження / В.М. Рябенський, О.О. Ушкаренко, О.Л. Білоконь; Заявник і патентовласник НУК ім. акад. Макарова. Заяв. №U201005973 від 10 лютого 2011 р.
- [7] Пат. 56988 Україна, МПК (2010) H02M 1/08. Спосіб послідовного коригування струму збудження синхронного генератора для стабілізації його реактивної потужності / В.М. Рябенський, О.О. Ушкаренко, О.Л. Білоконь; Заявник і патентовласник НУК ім. акад. Макарова. Заяв. №U201005970 від 10 лютого 2011 р.
- [8] Шурыгина Г.В. Улучшение эксплуатационных характеристик синхронных электроприводов металлургических агрегатов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» / Шурыгина Галина Владимировна ; Магнитогорский гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова. - Магнитогорск, 2005. - 20 с.
- [9] Babaei M. Nonlinear feedback control of chaos in synchronous reluctance motor drive systems [Text] / M. Babaei, J. Nazarzadeh, J. Faiz // IEEE International Conference. - 2008. - 4 p. doi: 10.1109/ICIT.2008.4608524.
- [10] Кириченко В.И. Программно управляемый возбудитель синхронных двигателей [Текст] / В.И. Кириченко, М.И. Школа, В.В. Кириченко, Р.А. Боровик // Наука та інновації. - К., 2006. - Т2. №3. - С. 28-37.
- [11] Задорожня И.Н. Синтез электромеханической системы предельной степени устойчивости и минимальной колебательности упругой механической подсистемы [Текст] / И.Н. Задорожня, Н.А. Задорожний // Вісник НТУ «ХП». - 2017. - 27(1249). - С. 150-155.
- [12] Пат. 63053 Україна, МПК (2010) H02M 1/08. Спосіб випереджаючого коригування напруги збудження генератора при роботі на асинхронний двигун / В.М. Рябенський, О.О. Ушкаренко, О.Я. Дубовик; Заявник і патентовласник НУК ім. акад. Макарова. Заяв. №U201102430 від 26 вересня 2011 р.
- [13] Пат. 62906 Україна, МПК (2010) H02M 1/08. Спосіб випереджаючого коригування генератором, що працює на асинхронний двигун / В.М. Рябенський, О.О. Ушкаренко, О.Я. Дубовик; Заявник і патентовласник НУК ім. акад. Макарова. Заяв. №U201100496 від 26 вересня 2011 р.
- [14] Пат. 62904 Україна, МПК (2010) H02M 1/08. Спосіб випереджаючого коригування генератором, що працює на асинхронний двигун / В.М. Рябенський, О.О. Ушкаренко, О.Я. Дубовик, А.В. Крилов; Заявник і патентовласник НУК ім. акад. Макарова. Заяв. №U201100491 від 26 вересня 2011 р.
- [15] Borodai V. Efficient Transient Modes of Synchronous Drive for Mining and Smelting Mechanisms [Text] / V. Borodai, R. Borovyk, O. Nesterova. // Mechanics, Materials Science & Engineering. - 2017. - Vol.8. - No.8. - P. 133-142.
- [16] Низимов В.Б. Система векторного управления синхронным двигателем с емкостным накопителем энергии в контуре возбуждения [Текст] / В.Б. Низимов, А.А. Снижко // Вісник СумДУ. Серія „Технічні науки”. - 2011. - №3. - С. 7-12.

Стаття надійшла до редакції 10.05.2017

## КОМПЕНСАЦИЯ РЕЗКО-ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ЯКОРЯ МОЩНЫХ СИНХРОННЫХ ПРИВОДОВ СРЕДСТВАМИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ С НЕСТАНДАРТНЫМ АЛГОРИТМОМ УПРАВЛЕНИЯ

- БОРОДАЙ В.А. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электропривода Национального ТУ „Дніпровська політехніка”, Днепр, Украина, e-mail: Boroday\_va2@ukr.net;
- БОРОВИК Р.О. инженер, ассистент, ассистент кафедры электропривода Национального ТУ „Дніпровська політехніка”, Днепр, Украина, e-mail: borovyk.r.o@nmu.one;
- НЕСТЕРОВА О.Ю. канд. пед. наук, доцент, доцент кафедры перевода Национального ТУ „Дніпровська політехніка”, Днепр, Украина, e-mail: olnesterova1@rambler.ru.



**Цель работы.** Разработка автоматической системы возбуждения с нестандартным алгоритмом управления мощных синхронных приводов механизмов горно-металлургического комплекса, которые характеризуются периодическими ударными нагрузками.

**Методы исследования.** Для проведения исследований использовались положения теории электрических машин, методы синтеза автоматических систем, математическое моделирование в пакете Matlab.

**Полученные результаты.** Создан вариант модели синхронного двигателя для случаев частотного управления, на базе которого синтезирована структура системы автоматического управления возбуждением, получен уточняющий коэффициент для расчета усиления интегральной части регулятора и предложен алгоритм рационального управления синхронным двигателем при условии лучшей нейтрализации усилий разрушения изоляции проводников якорных катушек двигателя.

**Научна новизна.** Предложен оригинальный вариант динамической модели синхронного двигателя, которая позволяет воспользоваться классическим методом синтеза регулятора продольного тока якоря, стабилизируемого магнитным потоком возбуждения, а также сформулированы требования к нестандартному алгоритму управления возбуждением, который обеспечивает существенное уменьшение динамического тока якоря в момент пикового действия нагрузки.

**Практическая ценность.** Использование предложенного метода позволит создать автоматическую систему возбуждения мощных синхронных двигателей, благодаря которой возможно увеличить межремонтный период работы синхронного привода.

**Ключевые слова:** мощный синхронный двигатель; система автоматического управления возбуждением; модель двигателя для частотного управления; синтез и уточнение параметров регулятора; обоснование метода управления

## COMPENSATION OF THE ABRUPTLY VARIABLE CURRENT OF ARMATURE OF HIGH-POWER SYNCHRONOUS DRIVES BY MEANS OF AUTOMATIC EXCITATION SYSTEM WITH SPECIFIC CONTROL ALGORITHM

BORODAI V.A.

Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electric Drive, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: Boroday\_va2@ukr.net;

BOROVİK R.A.

Engineer, Assistant Lecturer of the Department of Electric Drive, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: borovyk.r.o@nmu.one;

NESTEROVA O.YU.

PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Translation Department, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: olnesterova1@rambler.ru.

**Purpose.** Development of the automatic excitation system with non-standard algorithm for controlling powerful synchronous drives of the mechanisms of the mining and metallurgical complex, which are characterized by periodic shock loads.

**Methodology.** The positions of theory of electric machines, methods of automatic systems synthesis, mathematical modeling in the package Matlab were used for conducting researches.

**Findings.** A variant of the model of the synchronous motor for cases of frequency control is proposed, on the basis of which the structure of the system of the automatic excitation control is synthesized, a correction coefficient for the calculation of the gain of the regulator integral part is obtained, and the algorithm of rational control of the synchronous motor is tested, the improved neutralization of the forces of destruction of the conductors insulation of the armature coils of the motor is provided.

**Originality.** The original version of the dynamical model of the synchronous motor is proposed, which allows using the classical method of synthesis of the armature longitudinal current regulator stabilized by the magnetic flux of excitation, as well as the requirements for the implementation of a non-standard excitation control algorithm providing a significant reduction of the dynamic current of the armature at the moment of peak load action.

**Practical value.** The use of the proposed methodology will allow the creation of an automatic system for exciting high-power synchronous motors, which can prevent accidents in the armature circuit of the motor and increase the inter-repair interval of the synchronous drive.

**Keywords:** powerful synchronous motors; automatic excitation control system; engine model for frequency control; synthesis and refinement of the parameters of the regulator; substantiation of the control method



## REFERENCES

- [1] Beshta, O.S., Balakhontsev, O.V., Borovik, R.O., Drum, V.V. (2013). Razrabotka rekomendacij po jekspluatacii sinhronnogo dvigatelja glavnogo privoda avtomat-stana prokatki trub OOO "INTERPAJP NIKO TJuB" [Development of recommendations on the operation of the synchronous motor of the main drive of the machine-rolling mill of pipes of LLC INTERPIPY NIKO TYUB]. *Report on research and development (conclusions). State University "NSU", Dnipropetrovs'k*, 34.
- [2] Maklakova, Ye.A. (2017). Using of Pre-Acceleration of Rolling Mill Motor Shaft for Reduce the Dynamic Load. *Russian Internet Journal of Electrical Engineering*, 4, 1, 19-22. (in Russian)
- [3] Linkov, S.A., Sarvarov, A.S., Bachurin, I.V. (2014). Analiz sistem upravlenija sinhronnyh jelektroprivodov [Analysis of control systems for synchronous electric drives]. *EsiK. Series "Theory and practice of an automated electric drive"*, 2 (23), 25-28. (in Russian)
- [4] Slobodenyuk, D.V., Byelorzhzhesky, O.V. (2015). Capacitive storage device in the excitation circuit of a synchronous machine for forcing and extinguishing the field. *Electrical Engineering and Electromechanics*, 2015, 2, 16-20.
- [5] Shevchenko, I.S., Morozov, D.I. (2014). Special'ni pytannja teorii' elektroprivoda. Dynamika sinhronnogo elektroprivoda: navch. po-sib. [Special issues in the theory of electric drive. Dynamics of synchronous electric drive]: [Teach. Manual]. *Kiev, Department Publ.*, 267 p.
- [6] Stalemate. 53711 Ukraine, IPC (2009) H02M 1/08. Sposib stabilizacii' reaktyvnoi' potuzhnosti sinhronnogo generatora shljahom slidkuju chogo koryguvannja jogo naprugy zbudzhennja [The way to stabilize the reactive power of the synchronous generator by following the correction of its excitation voltage]. V.M. Ryabenky, OO Ushkarenko, O.L. Bilokin; Applicant and patent attorney NUS them. acad. Makarov Application U.S. 01005973 dated February 10, 2011.
- [7] Stalemate. 56988 Ukraine, IPC (2010) H02M 1/08. Sposib poslidovnogo koryguvannja strumu zbudzhennja sinhronnogo generatora dlja stabilizacii' jogo reaktyvnoi' potuzhnosti [Consistent correction of the excitation current of the synchronous generator to stabilize its reactive power]. V.M. Ryabenky, OO Ushkarenko, O.L. Bilokin; Applicant and patent attorney NUS them. acad. Makarov Application U.S. 01005970 dated February 10, 2011.
- [8] Shurygina, G.V. (2005). Uluchshenie jekspluatacionnyh harakteristik sinhronnyh jelektroprivodov metallurgicheskikh agregatov [Improvement of performance characteristics of synchronous electric drives of metallurgical units]. *The thesis abstract on the competition of a scientific degree of the Cand.Tech.Sci. Magnitogorsk State Technical University. G.I. Nosov*, 20. (in Russian)
- [9] Babaei, M., Nazarzadeh, J., Faiz, J. (2008). Nonlinear feedback control of chaos in synchronous reluctance motor drive systems. *Industrial Technology, ICIT 2008. IEEE International Conference*, 4 p. doi: 10.1109/ICIT.2008.4608524.
- [10] Kirichenko, V.I., School, M.I., Kirichenko, V.V., Borovik, R.A. (2006). Programmno upravljajemyj vobuditel' sinhronnyh dvigatelej [Software-driven exciter of synchronous motors]. *Nauka ta innovacii, Kiev*, 2, 3, 28-37.
- [11] Zadorozhnaya, I.N., Zadorozhny, N.A. (2017). Sintez jelektromehanicheskoy sistemy predel'noj stepeni ustojchivosti i minimal'noj kolebatel'nosti uprugoj mehanicheskoy podsistemy [Synthesis of the electromechanical system of the limiting degree of stability and minimum vibration of the elastic mechanical subsystem]. *ISSN 2079-8024. Bulletin of NTU "KhPI"*, 27 (1249), 150-155.
- [12] Stalemate. 63053 Ukraine, IPC (2010) H02M 1/08. Sposib uperezhdajuchogo koreguvannja naprugy zbudzhennja generatora pry roboti na asynhronnyj dvygun [The method of overcoming the correction of the voltage of the generator's oscillation when working on an asynchronous motor]. V.M. Ryabenky, OO Ushkarenko, O.Ya. Dubovik; Applicant and patent holder NUS them. acad. Makarov Application U.S. 01102430 of September 26, 2011.
- [13] Stalemate. 62906 Ukraine, IPC (2010) H02M 1/08. Sposib uperedzhujuchogo koryguvannja generatorom, shho pracjuje na asynhronnyj dvygun [The method of preemptive correction by a generator operating on an asynchronous motor]. V.M. Ryabenkiy, OO Ushkarenko, O.Ya. Dubovik; Applicant and patent holder NUS them. acad. Makarov Application U.S. 01100496 of September 26, 2011.
- [14] Stalemate. 62904 Ukraine, IPC (2010) H02M 1/08. Method of biasing correction by a generator working on an asynchronous motor. V.M. Ryabenkiy, OO Ushkarenko, O.Ya. Dubovik, AV Krylov; Applicant and patent holder NUS them. acad. Makarov. Application U.S. 01100491 dated September 26, 2011.
- [15] Borodai, V., Borovyk, R., Nesterova, O. (2017). Efficient Transient Modes of Synchronous Drive for Mining and Smelting Mechanisms. *Mechanics, Materials Science & Engineering*, 8, 8, 133-142. doi: 10.2412/mmse.71.21.693.
- [16] Nizimov, V.B., Snigko, A.A. (2011). Sistema vektornogo upravlenija sinhronnym dvigatelem s emkostnym nakopitelem jenerгии v konture vobuzhdenija [Vector control system for a synchronous motor with a capacitive energy storage device in an excitation circuit]. *Herald Sumy State University. Seria "Technical sciences"*, 3, 7-12