

Д.В. Слободенюк, О.В. Бялобржеський, канд. техн. наук

(Україна, Кременчук, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського)

## ЗАСТОСУВАННЯ ЄМНІСНОГО НАКОПИЧУВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ В КОНТУРІ ЗБУДЖЕННЯ СИНХРОННОГО ДВИГУНА

До основних режимів роботи синхронних двигунів (СД) відносяться: пуск, автоматичне регулювання збудження за різними параметрами, форсування напруги збудження при прогинанні напруги живлення та при прикладанні ударного навантаження до вала двигунів, гасіння магнітного поля, для створення сприятливих умов самозапуску та усунення аварійного стану.

Залежно від джерела енергії, що використовується для збудження синхронної машини, всі системи збудження поділяють на три основні групи [1]:

- системи збудження, в яких джерелом енергії є генератор постійного струму (збудник);
- системи збудження, в яких джерелом енергії є генератор змінного струму (збудник). Змінний струм цього генератора перетворюється в постійний струм за допомогою напівпровідникових керованих або некерованих випрямлячів;
- системи збудження, в яких використовується енергія самої синхронної машини (самозбудження). Ця енергія перетворюється за допомогою спеціальних трансформаторів і напівпровідникових випрямлячів.

Автоматичні регулятори збудження (АРЗ) мають систему керування, що реалізує алгоритм роботи ПД, ПІ або ПД-регулятора. Регулятор може мати контур регулювання: за напругою на секції шин 6 (10) кВ, за коефіцієнтом потужності (cosφ), за реактивним струмом статора. Можуть бути виконані і інші види регулювання, які є, як правило, комбінацією зазначених трьох, наприклад, регулятор збудника ВТЦ-СД-Б [2] може працювати в режимі регулювання за напругою на секції шин і за коефіцієнтом потужності двигуна.

У АРЗ передбачається включення форсування збудження двигуна при зниженні напруги на секції шин нижче заданого значення. Кратність форсування щодо номінальної вихідної напруги становить від 1,5 до 2. Статичні системи збудження відрізняються високою швидкістю – введення форсування збудження займає час від 0,02 до 0,06 с.

Безщіткові системи збудження часто застосовуються на газоперекачувальних станціях магістральних газопроводів, тиристорний регулятор реалізує ті ж закони керування, які використовуються в статичних збудниках. Недоліками безщіткових систем є невелика швидкість і низька якість підтримки параметрів роботи СД у динамічних режимах роботи в порівнянні зі статичними системами. Також наявність оберненого синхронного генератора призводить до здорожчання конструкції збудника. Для підвищення якості регулювання струму збудження використовують ємнісні накопичувачі [3], але питання узгодженості роботи накопичувача у складі існуючої системи збудження розглянуті недостатньо.

Таким чином, метою даної роботи є розробка схемного рішення та аналіз динамічних режимів роботи при реалізації режимів гасіння та форсування поля СД.

Під форсувальною здатністю за напругою розуміють відношення найбільшої усталеної напруги  $U_{fn,y}$  збудника до номінальної напруги  $U_{fnom}$ , а під форсувальною здатністю за струмом – відношення граничного (найбільшого допустимого за нагріванням обмотки ротора) струму збудження  $I_{fn}$ , що забезпечується збудником в режимі форсування, до номінального струму збудження  $I_{fnom}$ . Швидкістю системи збудження в режимі форсування напруги характеризують номінальною швидкістю зростання напруги збудника  $1/c$ :

$$c = 0,632 \frac{U_{fn} - U_{fnom}}{U_{fnom} t_1}, \quad (1)$$

де  $U_{fn}$  – максимальна напруга збудника (для випрямних систем  $U_{fn} > U_{fn,y}$ );  $t_1$  – час, протягом якого напруга збудника зростає до значення  $U_f = U_{fnom} = 0,632(U_{fn} - U_{fnom})$ .

Для систем збудження, у яких крива  $u_f = f(t)$  може бути подана експонентою  $u_f = U_{fn} = U_{fn} - (U_{fn} - U_{fnom}) \exp(-t/T_e)$ , час  $t_1 = T_f$  (рис. 1). Постійна часу підвищення напруги збудника  $T_f$  визначається параметрами збудника, кратністю форсування і швидкістю автоматичного регулятора збудження. Швидкість зростання напруги тим вище, чим більше границя збудження і чим менше стала часу  $T_f$  [4].

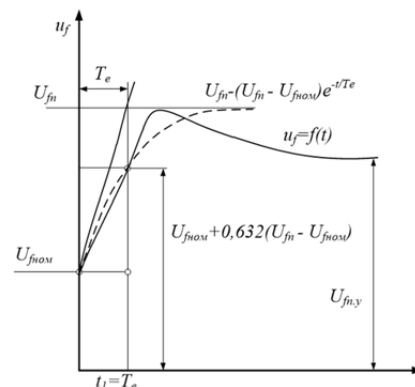


Рис. 1. Графіки визначення номінальної швидкості наростання напруги збудника

Відповідно до ПУЕ в колі збудження кожної синхронної машини (за винятком малих машин) встановлюються пристрої для швидкого і безпечно гасіння електромагнітного поля ротора – автомати гасіння поля (АГП). Необхідність у швидкому гасінні поля виникає, наприклад, при внутрішніх пошкодженнях у машині. У цьому разі через тривале за інерцією вибігу відключеної машини в її внутрішніх контурах продовжує наводитися ЕРС, яка підтримує електричну дугу в місці короткого замикання і викликає великі руйнування міді обмотки і сталі статора. Просте відключення кола збудження неприпустиме, тому що при цьому через малу ємність  $C_f$  і велику індуктивність  $L_f$  в обмотці збудження синхронної машини виникнуть небезпечні для її ізоляції перенапруги.

Існує багато способів гасіння магнітного поля обмотки збудження:

- розрядження обмотки збудження на постійний активний опір;
- перехід збудника в інверторний режим;
- розрядження обмотки збудження на електричну ємність;
- розрядження обмотки збудження на динамічну ємність;
- розрядження обмотки збудження на напівпровідниковий випрямляч;
- розрядження обмотки збудження на дугогасну решітку.

У системах збудження з тиристорними перетворювачами можливо гасіння поля шляхом переведення їх в інверторний режим роботи. При цьому процес гасіння поля виявляється аналогічним процесу гасіння за допомогою дугогасної решітки. Різниця полягає лише в тому, що перехід тиристорів в інверторний режим відбувається майже миттєво, без розриву кола збудження. За наявності двох груп тиристорів в інверторний режим переводиться форсуюча група тиристорів (а робоча відключається), тому що більш висока напруга тиристорів форсуючої групи дозволяє швидше погасити магнітне поле. Оскільки напругу форсуючої групи вибирають такою, що дорівнює граничній напрузі збудження, тобто не більше  $(2-4)U_{fном}$ , що менше найбільш допустимого значення напруги, то час гасіння магнітного поля в цьому разі трохи більше, ніж при використанні дугогасної решітки [5].

Таким чином, усталений асинхронний режим є динамічним, причому координати режиму змінюються за періодичним законом. На основі вищесказаного, модель обмотки збудження являє собою ідеальну індуктивність з параметрами, що відповідають параметрам обмотки збудження досліджуваного синхронного двигуна СДЭ-15-34-6,  $R_f=0,13$  Ом,  $L_f=0,5$  Гн.

Структурна схема досліджуваної моделі наведена на рис. 2. Обмотка збудження синхронного двигуна на рисунку зображена послідовно з'єднаними резистором  $R_f$  та індуктивністю  $L_f$ . Живлення обмотки відбувається від керованого тиристорного перетворювача (TR)  $VS1-VS6$ , який підключений до трифазної мережі. Тиристри керуються імпульсно-фазовою системою керування (PPC). Кут керування формується системою керування збудженням (SCE). Паралельно тиристорному перетворювачу через  $L_d$  під'єднаний транзисторний інвертор напруги (ТС), система керування ТС (SRC) забезпечує формування імпульсів керування транзисторами. В колі постійного струму ІН підключений накопичувальний конденсатор  $C$ . Для синхронізації та керування струмом уведено датчик напруги та струму.

У статичних режимах роботи СД живлення обмотки здійснюють від тиристорного перетворювача. В динамічних, коли потрібно швидко змінювати струм збудження, залежно від прикладеного навантаження на вал ротора, максимально можливої напруги збудника недостатньо для забезпечення відповідного зростання струму збудження  $I_{ref}$ . Тому в таких випадках застосовують додаткову форсуючу групу тиристорів з вищим рівнем номінальної випрямленої напруги. У запропонованому рішенні функції форсуючої групи покладено на ТС. Це дозволить забезпечити необхідну швидкість струму в динамічних режимах та аварійних ситуаціях за рахунок віддачі на обмотку збудження накопиченої енергії конденсатора  $C$ .

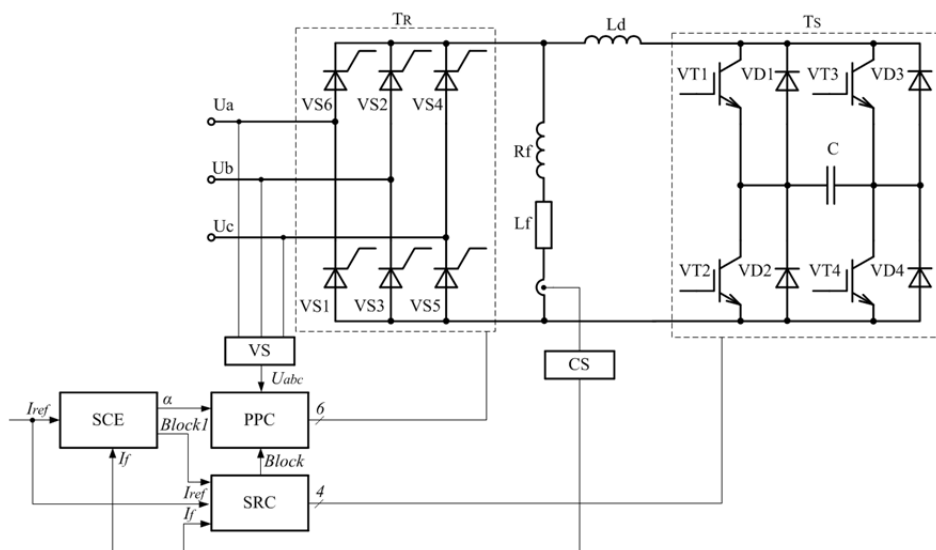


Рис. 2. Структурна схема пристрою регулювання збудженням СД в динамічних режимах

Для розрахунку регуляторів САК структурну схему системи поділено на дві частини. Це обмотка збудження СД, TR, PPC, регулятор, CS. При цьому обмотка збудження можна описати передавальною функцією вигляду:

$$W(s)_f = \frac{1/R_f}{T_f s + 1} \quad (2)$$

Датчик струму являє собою аперіодичну ланку першого порядку

$$W(s)_{cs} = \frac{k_{cs}}{T_{cs} s + 1}; \quad (3)$$

де  $k_{cs}$  – коефіцієнт передачі за струмом,  $T_{cs}$  – стала часу датчика струму.

Передавальна функція TR разом із системою імпульсно-фазового керування, як правило апроксимується аперіодичною ланкою першого порядку з постійною часу  $T_R$  в межах 0,006–0,01 с, що обумовлено дискретністю подачі імпульсів відкривання та особливістю роботи TR:

$$W(s)_r = \frac{k_R}{T_R s + 1}, \quad (4)$$

де  $k_R$  – коефіцієнт передачі TR,  $T_R$  – стала часу вентиляного перетворювача.

Коефіцієнт передачі TR змінюється залежно від величини керуючої напруги і розраховується за допомогою регульованих характеристик  $E_{d0}=f(\alpha)$ .

Для отримання астатичного регулювання в контур має входити інтегруюча ланка. Тому використовують ПІ-регулятор, постійну часу інтегрування  $\tau$  якого для отримання максимальної швидкодії вибирають такою, щоб нейтралізувати вплив великої постійної часу на перехідний процес  $T_f$ . В контурі присутні дві аперіодичні ланки з малими постійними часу: тиристорний перетворювач ( $T_r$ ) і датчик струму ( $T_{cs}$ ). У цьому разі вказані ланки наближено можна замінити однією аперіодичною ланкою, приймаючи некомпенсовану постійну часу контуру  $T_\mu = T_r + T_{cs}$ .

Розімкнутий контур керування струмом має передавальну функцію вигляду

$$W(s)_f \cdot W(s)_r \cdot W(s)_p \cdot W(s)_{cs} = W(s)_{mo}; \quad (5)$$

де  $W_p$  – передавальна функція регулятора,  $W_{mo} = 1/2T_\mu(T_\mu s + 1)$  – передавальна функція розімкненого контуру модульного оптимуму.

Підставивши вираз (1) – (4) у формулу (5) і провівши перетворення, отримуємо таку передавальну функцію регулятора

$$W(s)_p = \frac{T_f R_f}{2T_\mu k_r k_{cs}} + \frac{R_f}{2T_\mu s k_r k_{cs}} = k_p + \frac{1}{T_p s}.$$

До виходу ПІ-регулятора підключено блок, що обмежує значення вихідного сигналу напруги відповідно до максимальної випрямленої напруги TR. Вихід з блока обмеження з'єднаний з блоком визначення кута керування тиристорами  $\alpha$ .

Для узгодження роботи TR та ТС в схемі SCE додатково визначається перевищення вихідного сигналу регулювання, і ця різниця подається у вигляді блокуючого сигналу  $u_{bl}$  до системи керування інвертором напруги (рис. 3).

Для керування ТС використано релейну систему (рис. 4), яка реагує на вихід поточного значення струму із зони гістерезису, визначеної ширини [6].

Струм збудження  $i_{ref}$ , формований задатчиком струму збудження, надходить на входи суматорів, на другий вхід яких надходить з виходу датчика струму збудження сигнал поточного струму збудження  $i_f$ . На виході першого суматора формується сигнал відхилення струму  $\Delta i_1 = i_{ref} - i_f$ , а на виході другого – сигнал відхилення струму  $\Delta i_2 = i_f - i_{ref}$ .

Сигнали з блоків порівняння надходять на відповідні релейні елементи (PE1,2), на виході яких формується сигнал

$$u_{rel1} = \begin{cases} 1, & \text{при } \Delta i_1 > \Delta i, \Delta i_1' > 0; \\ 0, & \text{при } \Delta i_1 < \Delta i, \Delta i_1' > 0; \end{cases} \quad u_{rel2} = \begin{cases} 1, & \text{при } \Delta i_2 > -\Delta i, \Delta i_2' < 0; \\ 0, & \text{при } \Delta i_2 < -\Delta i, \Delta i_2' < 0; \end{cases}$$

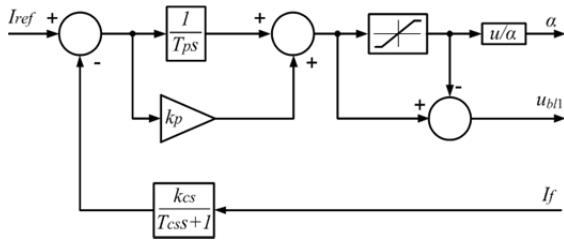


Рис. 3. Система керування збудником СД

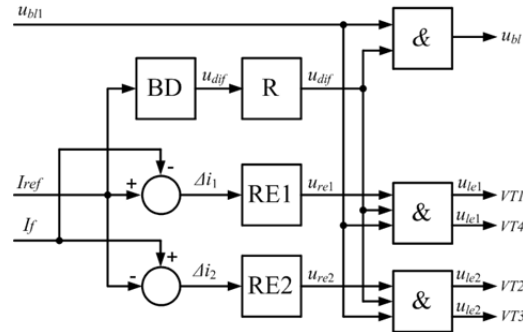


Рис. 4. Система керування інвертором напруги

де  $\Delta i$  – наперед задане відхилення струму, яке складає 0,1–5% від номінального струму збудження синхронної машини.

Сигнал з релейних елементів (RE) надходить на перші входи логічних елементів, на перший вхід яких надходить сигнал з  $u_{БД}$ , що формується на виході блока диференціювання (DB). На вхід блока диференціювання надходить сигнал поточного струму збудження  $i_f$ , на базі якого формується сигнал

$$u_{dif} = \begin{cases} 1, & \text{при } di_{ref} / dt \neq 0 \\ 0, & \text{при } di_{ref} / dt = 0 \end{cases}$$

що забезпечує визначення статичного чи динамічного режиму за струмом збудження. На третій вхід логічних елементів надходить блокуючий сигнал  $u_{bl1}$  з виходу системи керування тиристорним збудником.

У результаті на виходах логічних елементів формується сигнал

$$u_{ge} = u_{re} \cup u_{dif} \cup u_{bl1}.$$

Ці сигнали керують роботою інвертора напруги, забезпечуючи передачу енергії від конденсатора. Напруга збудження визначається напругою інвертора напруги та падінням напруги на додатковій індуктивності:

$$u_f = u_{IV} - L \frac{di_f}{dt},$$

де  $u_{IV}$  – напруга транзисторного перетворювача,

$$u_{IV} = u_{ge} u_C = u_{ge} \frac{1}{C} \int i_C dt;$$

$u_{ge}$  – сигнал, що поступає з виходу логічних елементів на керуючі електроди транзисторів (1 або 0);  $u_C$  – напруга конденсатора,

$$u_C = \frac{1}{C} \int i_C dt = \frac{1}{C} \int i_L u_{ge} dt.$$

Це призводить до розряду конденсатора. Зниження запасу енергії конденсатора може бути компенсовано його зарядом під час гасіння поля СД, або зарядом від тиристорного перетворювача у статичному режимі.

Оскільки  $i_L = i_f$ , то рівняння балансу напруги в контурі обмотки збудження в динамічному процесі

$$i_f r_f + \frac{d\psi_f}{dt} = u_{ge} \frac{1}{C} \int i_f u_{ge} dt - L \frac{di_f}{dt}.$$

У системі керування присутнє блокування роботи ТР. Блокування виконує логічний елемент «&», на входи якого подаються сигнал  $u_{dif}$  з блоку визначення диференціалу заданого струму збудження  $i_f$  і сигнал  $u_{bl1}$  з виходу системи керування ТР. У результаті на виході логічного елемента сигнал

$$u_{bl} = u_{bl1} \cup u_{dif},$$

який дозволяє або блокує подачу імпульсів на тиристири збудника.

В середовищі візуального проектування розроблена математична модель схеми (рис. 2) та проведені експерименти щодо режимів форсування та гасіння поля обмотки збудження. При моделюванні встановлені такі початкові умови: струм обмотки збудження  $i_f = 135$  А, напруга конденсатора  $U_c = 180$  В, ширина зони гістерезису релейного регулятора  $\Delta i = 1$  А. Для зменшення обсягів розрахунку час моделювання  $t = 1,5$  с. У період часу  $t_1 = 0,1 - 0,4$  с. виконувалося моделювання форсування струму збудження зі швидкістю зростання струму  $di_f/dt = 150$  А/с, та в період часу  $t_2 = 1 - 1,1$  с. – гасіння електромагнітного поля зі швидкістю зростання струму  $di_f/dt = 450$  А/с

На рис. 5 та 6 зображено графічні залежності струму завдання, струму в обмотці збудження та напруги відповідно конденсатора й обмотки збудження. Під час форсування (рис. 5) спостерігаються різні форми струму збудження, що зумовлено, у першому випадку (рис. 5, а), релейною системою керування ТС з попередньо заблокованим TR, у другому (рис. 5, б) – сумісною роботою ТС та TR.

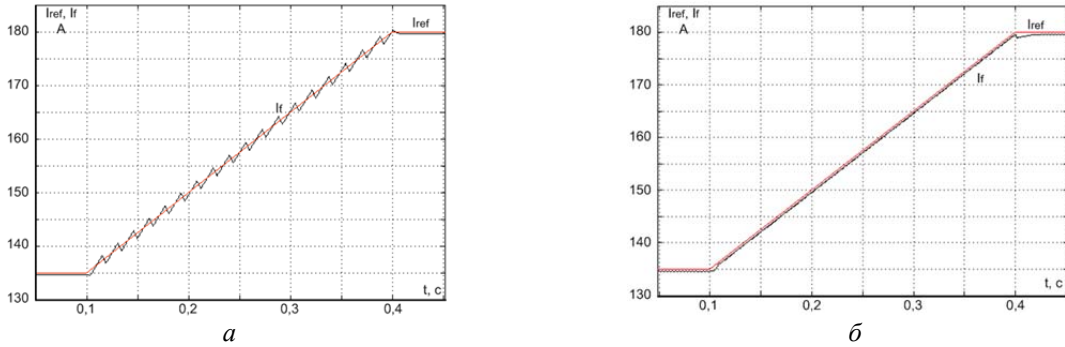


Рис. 5. Графіки струму обмотки збудження при форсуванні пристроєм форсування (а) та сумісній роботі збудника і пристрою форсування (б)

Пульсації напруги (рис. 6, а), зумовлені релейним способом керування пристроєм форсування, та їх частота залежать від ширини встановленої зони гістерезису  $\Delta i$ , амплітуди  $di$  та швидкості зміни струму  $dt$ . Велика частота пульсацій напруги збудження (рис. 6, б) обумовлена сумісною роботою TR та ТС.

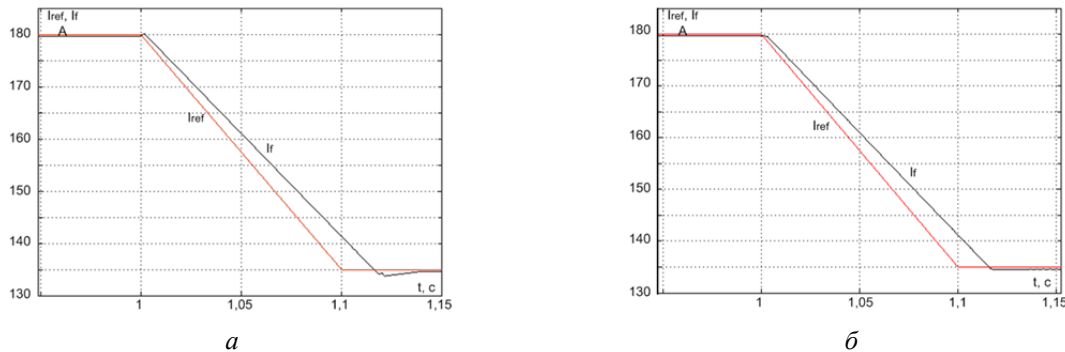


Рис. 6. Графіки напруги обмотки збудження при форсуванні пристроєм форсування (а) та сумісній роботі збудника і пристрою форсування (б)

Під час моделювання гасіння поля обмотки збудження ТС (рис. 7, 8) поточне значення струму збудження відстає від заданого, що можна пояснити лімітованою швидкістю зміни струму в даному випадку, за умови 4-кратного підвищення напруги ТС фактично працює без модуляції.

Додатково в моделі виконано реєстрацію напруги та струму мережі та визначені відповідно активна та реактивна потужності TR. Потужність TR під час форсування (рис. 9, а) береться з мережі та частково з накопичувального пристрою, а під час гасіння (рис. 9, б) повністю віддається на конденсатор. Це підтверджується графіками споживання активної та реактивної потужності (рис. 10). Під час форсування струму збудження в мережу через TR основного збудника віддається незначна кількість реактивної потужності.

**Висновки.** Запропонована система за рахунок підвищення зростання напруги до максимально допустимого рівня дозволяє в короткочасні періоди динамічних режимів, забезпечувати форсування та гасіння поля та є інструментом підвищення стійкості синхронного двигуна. Як підтверджують отримані результати, система працює в граничних умовах, тобто обмеження існують тільки за швидкістю зростання струму та відповідно кратністю напруги. Введення конденсатора з підвищеною напругою в коло збудження зменшує номінальне значення напруги основного збудника синхронного двигуна, його встановлену потужність, знижує рівень енергообмінних процесів з мережею, що дозволяє використовувати цю систему в аварійних режимах при відключенні живлення мережі.

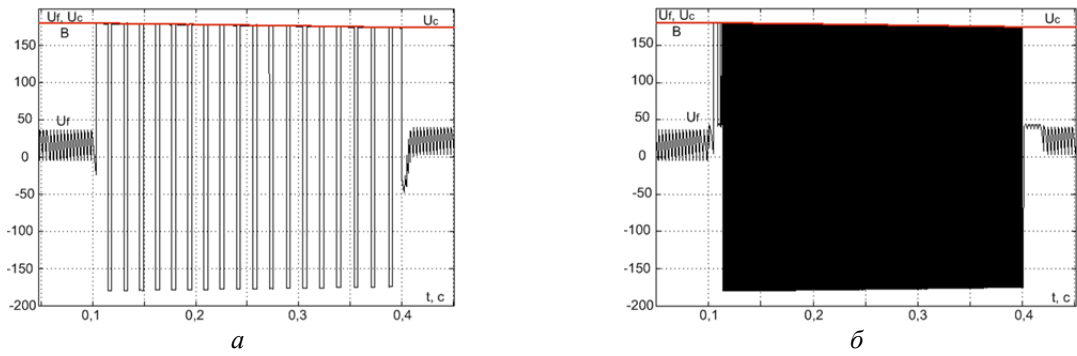


Рис. 7. Графіки струму обмотки збудження при гасінні поля збудження пристроєм форсування (а) та сумісній роботі збудника і пристрою форсування (б)

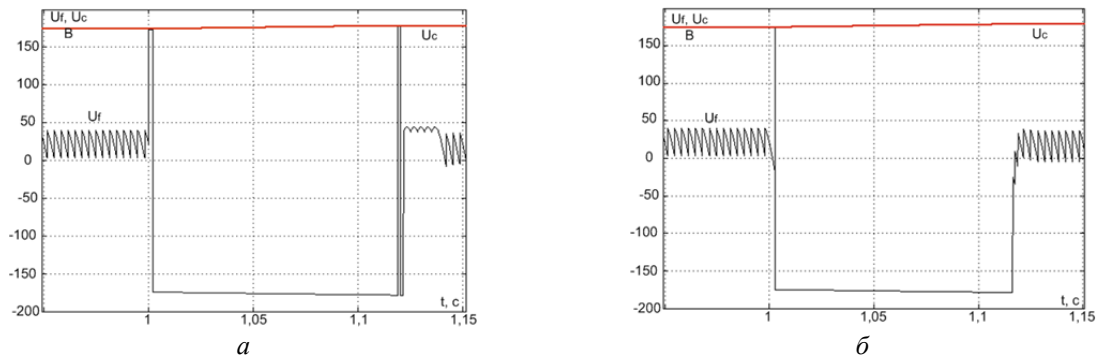


Рис. 8. Графіки напруги обмотки збудження при гасінні поля збудження пристроєм форсування (а) та сумісній роботі збудника і пристрою форсування (б)

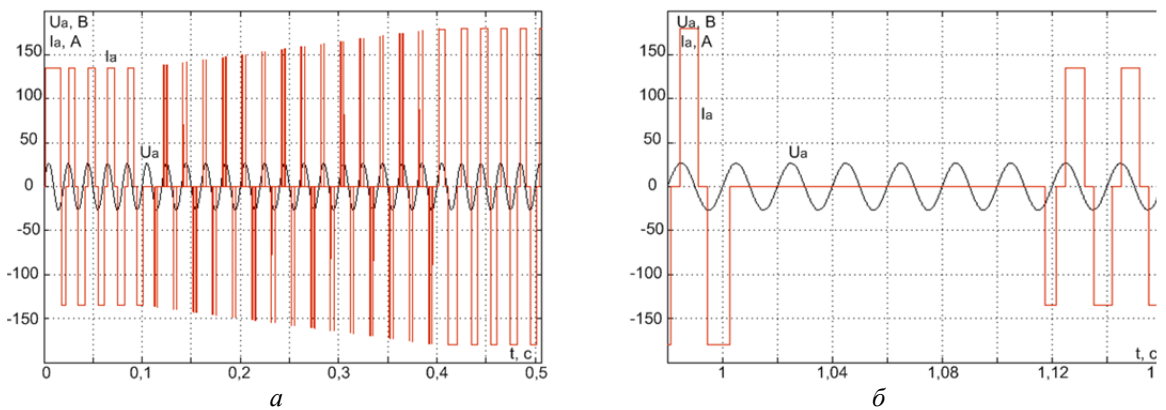


Рис. 9. Графіки напруги і струму мережі під час форсування струму збудження (а) та гасіння поля (б) при сумісній роботі збудника і пристрою форсування

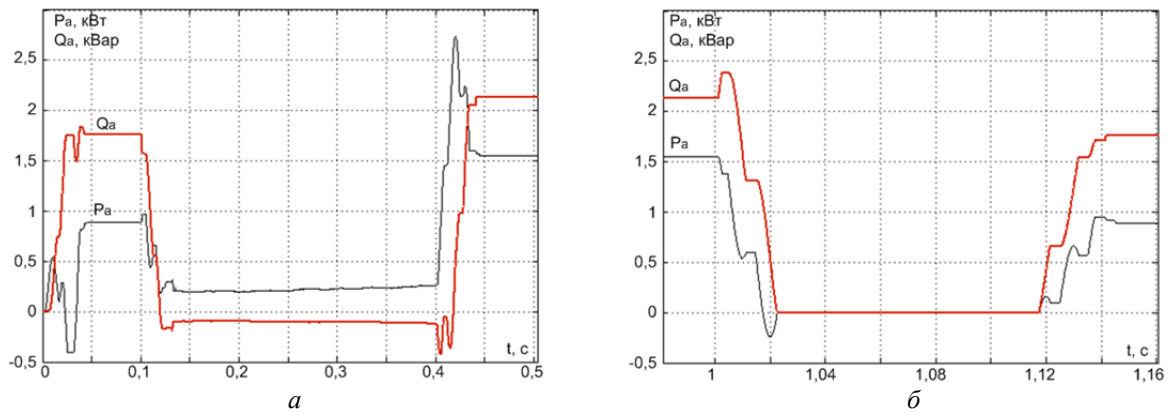


Рис. 10. Графіки активної та реактивної потужностей під час форсування струму збудження (а) та гасіння поля (б) при сумісній роботі збудника і пристрою форсування

Список літератури

1. Васильев А.А. Электрическая часть станций и подстанций / А.А. Васильев. – М.: Энергоатомиздат, 1990 – 551 с.
2. Управление тиристорными возбудителями высоковольтных синхронных двигателей / О.И. Осипов, В.В. Мельников, А.А. Оськин, К.Л. Куцый // Вестник ЮУрГУ/ Сер.: Энергетика. – Южноуральск, 2008. – Вып. 26(126). – С. 56–60.
3. Низимов В.Б. Управление форсировкой возбуждения синхронных двигателей с компенсацией инерционности контура возбуждения // Тезисы докладов научно-технической конференции “Проблемы создания новых машин и технологий”. – Кременчуг: КПИ - 1998. - с. 71.
4. Рожкова Л.Д. Электрооборудование станций и подстанций / Л.Д. Рожкова, В.С. Козулин. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 644 с.
5. Лойко К.Г. Автоматы гашения магнитного поля современных синхронных генераторов и компенсаторов / К.Г. Лойко, И.О. Куницкий // Материалы СНТК: Актуальные проблемы энергетики. – Минск, 2013. – Вып. 65. – С. 20-22.
6. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / ГОУВПО «Ивановский государственный университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2008. – 298 с.

*Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Синчуком О.М.*

УДК 622.673.1

*Ильина С.С., канд. техн. наук*

*(Украина, Днепропетровск, Государственный ВУЗ «Национальный горный университет»)*

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЖЕСТКОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ АРМИРОВОК  
ДЕЙСТВУЮЩИХ РУДОПОДЪЕМНЫХ СТВОЛОВ**

В отечественной практике используется определенный набор конструкций ярусов армировки, применяемых в рудных стволах (рис. 1). Они выполнены из металлопроката определенного профиля и типоразмера. Наиболее часто для проводников скиповых отделений применяются коробчатые профили сечением 160х160х12 (14, 16) мм, 180х180х12 мм, 200х200х14 мм. Для проводников клетевых отделений, контрвесов и скипов небольшой грузоподъемности обычно применяются рельсовые проводники типа Р38, Р43. В качестве расстрелов для мощных скиповых подъемов (грузоподъемностью 25 – 50 т) применяются двутавровые балки 36С или коробчатые расстрелы сечением 210х125х12 мм. Для маломощных подъемов используются расстрелы швеллерных сечений 20, 27, в качестве вспомогательных упоров применяются равнобокие уголки размером 100х100х12 мм.

Анализ схем армировок, приведенных на рисунках, показывает, что опорная горизонтальная жесткость проводника, закрепленного в ярусе на расстреле, в лобовой плоскости главным образом будет определяться длиной свободного пролета расстрела между упорами или его концами. Если боковой расстрел имеет упор напротив проводника, а центральный является балкой большой длины, заделанной в крепь и соединенной с центральным ствольным расстрелом, то в такой системе жесткость бокового проводника и его динамическая реакция на движение сосуда будут в несколько раз большими, нежели на центральном расстреле (ствол «Вентиляционный» Полтавского ГОКа, рис. 1). Таким образом, горизонтальная динамическая реакция сосуда, движущегося по такой паре проводников, будет носить явно несимметричный характер, и при равных параметрах искривления профиля проводников динамические нагрузки на более жесткий проводник должны быть большими, чем на противоположный, закрепленный на расстреле с большей длиной свободного пролета.

Такая ситуация требует детального изучения параметров опорной жесткости проводников, применяемых в современных условиях действующих стволов, особенно при их нахождении в зоне сдвижения горных пород (стволы ГС-1, ГС-2, «Вспомогательный» ЗАО «ЗЖРК» и др.). Так как там неизбежны значительные отклонения профилей проводников от вертикали и создание больших контактных нагрузок в системах «сосуд – армировка», то их необходимо учитывать в технических решениях, направленных на увеличение плавности движения подъемных сосудов на повышенных скоростях. Изучение упругих характеристик жестких армировок целесообразно проводить методом математического моделирования. В наибольшей степени для этого подходит метод конечных элементов, реализованный в системе SolidWorks Simulation [1].

Исходными данными для моделирования являются масштабные сечения ярусов армировок и результаты инструментальных измерений остаточных толщин проводников и расстрелов, полученные при оптико-визуальных обследованиях стволов.