

## ЄМНІСНИЙ НАКОПИЧУВАЛЬНИЙ ПРИСТРІЙ У КОНТУРІ ЗБУДЖЕННЯ СИНХРОННОЇ МАШИНИ ДЛЯ ФОРСУВАННЯ ТА ГАСІННЯ ПОЛЯ

В роботі проаналізовано існуючі силові схеми регулювання струму збудження синхронних двигунів. Розглянуто питання використання накопичувального пристрою в контурі обмотки збудження, на підставі чого запропоновано структуру системи керування динамічними режимами збудження синхронного двигуна, що дозволяє підтримувати заданий струм збудження синхронного двигуна певний період часу, за рахунок енергії конденсатора, введеної в контур збудження транзисторним перетворювачем. Бібл. 8, рис. 5.

**Ключові слова:** синхронний двигун, автоматичне регулювання збудження, релейне керування, транзисторний перетворювач, ємнісний накопичувач, математична модель.

В работе проанализированы существующие силовые схемы регулирования тока возбуждения синхронных двигателей. Рассмотрены вопросы использования накопительного устройства в контуре обмотки возбуждения, на основании чего предложено структуру системы управления динамическими режимами возбуждения синхронного двигателя, позволяющей поддерживать заданный ток возбуждения синхронного двигателя определенный период времени, за счет энергии конденсатора, введенной в контур возбуждения транзисторным преобразователем. Библ. 8, рис. 5.

**Ключевые слова:** синхронный двигатель, автоматическая, регулировка возбуждения, релейное управление, транзисторный преобразователь, емкостной накопитель, математическая модель.

**Вступ.** Для підвищення стійкості роботи синхронних двигунів (СД) і збільшення віддачі в мережу реактивної потужності при короточасних зниженнях напруги використовується параметричне або релейне форсування збудження [1]. Однак при роботі потужних тиристорних електроприводів прокатних станів та інших електроприймачів з різкозмінним навантаженням, перетоки реактивної потужності, що викликають втрати електроенергії і коливання напруги в мережах, як правило, не можуть бути ефективно скомпенсовані синхронними двигунами оснащеними серійними тиристорними збудниками з регламентованою кратністю форсування напруги [2]. Обмежені можливості існуючих тиристорних збудників і пристроїв форсування збудження можна істотно розширити за допомогою використання ємнісних накопичувачів [3].

**Мета роботи.** Розробка схемного рішення та системи керування ємнісним накопичувальним пристроєм в контурі збудження синхронної машини для форсування та гасіння поля.

**Матеріали та результати досліджень.** Автоматичне регулювання збудження (АРЗ) синхронних двигунів по струму статора – компаундування двигунів (компенсація реакції якоря) є простим параметричним регулюванням збудження безперервної дії без зони нечутливості. Воно створює оптимальні режими як для двигуна з точки зору його використання і стій-

кості, так і для живлячої мережі. Наявність компаундування дозволяє автоматично підтримувати високий коефіцієнт потужності при зміні навантаження, отримувати підвищений середньорічний к.к.д. і підвищену перевантажувальну здатність, особливо при ударних навантаженнях [1].

Виділяють схеми АРЗ СД за струмом статора (рис. 1). Система збудження за відхиленням (рис. 1,а), до якої входять керований випрямляч TR1, що живиться від трансформатора напруги TV, та АРЗ, який, в даному випадку, забезпечує підтримання заданого коефіцієнта потужності статора і обмеження кута навантаження  $\theta$ . Системи збудження з компенсацією реакції якоря містять контур компаундування, який складається з трансформаторів струму ТА та некерованого випрямляча TR2, вихідний струм якого алгебраїчно додається до нерегульованого (рис. 1,б – регулювання за збуренням), або регульованого (рис. 1,в – комбіноване регулювання за збуренням і за відхиленням) струму збудження СД [4].

АРЗ СД за струмом статора характеризується коефіцієнтом компаундування  $k_c$ , зі зростанням якого зростає перевантажувальна здатність СД. Проте надмірно великі значення коефіцієнта компаундування можуть призвести до саморозкачування двигуна і втрати стійкості [4], що є додатковим обмеженням в задачі ефективного компаундування.

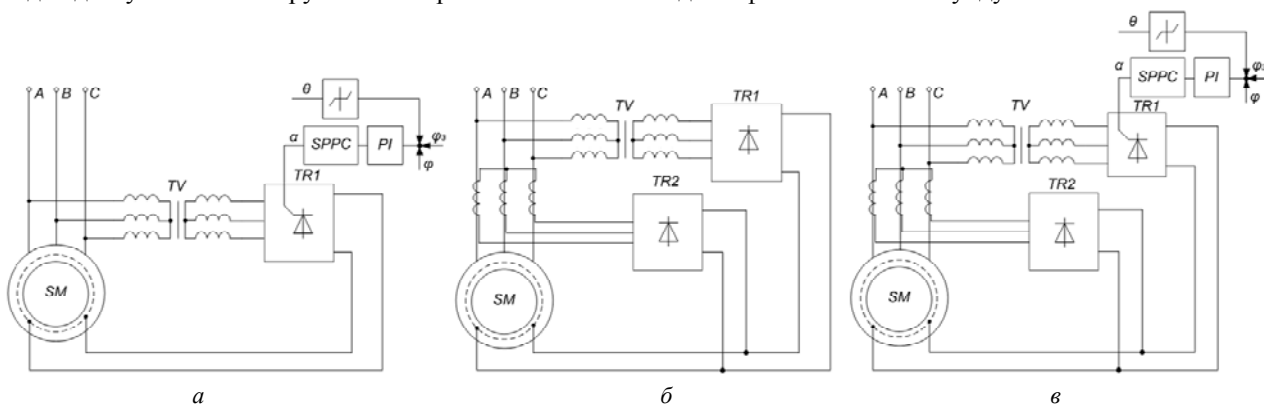


Рис. 1. Існуючі схеми систем збудження синхронних двигунів

Найбільш ефективним способом реалізації значеної задачі є форсування збудження з емнісною компенсацією інерційності контуру збудження шляхом розряду попередньо зарядженого конденсатора в цьому контурі з одночасною подачею форсуючої напруги від тиристорного перетворювача [5]. Окрім цього, емнісний накопичувач, можливо використовувати в обмотці збудження для полегшення запуску СД, як це пропонується в роботі (рис. 2,а). Система містить тиристорний регулятор напруги в статорі і ступінчастий емнісний накопичувач енергії в роторі. Управління блоками здійснює мікропроцесорний модуль MCU, який видає керуючі сигнали на блок управління тиристорами AUZ для підтримки струму статора на заданому рівні і на блок емнісного накопичувача, результуюча емність якого змінюється за заданим алгоритмом у функції ковзання.

При подачі напруги на статор СД від тиристорного регулятора напруги, струм в обмотці збудження замикається через послідовно з'єднані емнісні накопичувачі C1 і C2 при включених тиристорах VS9 і VS10, причому C2 зашунтований резистором R2. У міру збільшення частоти обертання ротора і збільшення емнісного опору накопичувачів C1 і C2 тиристори VS9 і VS10 закриваються. При цьому обмотка збудження замикається на накопичувач C1 і резистор R1. При подальшому збільшенні частоти обертання ротора включаються тиристори VS7 і VS8. При цьому обмотка збудження замикається на паралельно включені кола C1-R1 і C2-R2. Підтримання необхідного електромагнітного моменту забезпечується необхідним кутом управління тиристорами, що задається системою керування [5].

Однак недоліками систем форсування та полегшеного запуску з використанням емнісного накопичувача в більшості випадків є однонаправленість передачі енергії між обмоткою збудження та емнісним накопичувачем, і як наслідок використання розрядних резисторів у випадку гасіння накопиченої обмоткою збудження електромагнітної енергії (рис. 2,б) [6].

На підставі аналізу приведених схемних рішень, запропоновано систему керування збудженням, з накопичувальним пристроєм (рис. 3). До системи збудження додатково паралельно через буферний дросель L підключено мостовий транзисторний перетворювач ПІ з накопичувальним конденсатором С. Для керування процесом передачі енергії розроблено систему керування CS.

В стаціонарному режимі живлення обмотки синхронної машини здійснюється від тиристорного перетворювача, який отримує живлення через узгоджувальний трансформатор від мережі. На виході випрямляча формується напруга, середнє значення якої зумовлюється фазними напругами вторинної обмотки трансформатора TV:

$$\begin{aligned} u_A &= E_{2m} \sin(\omega t); & u_B &= E_{2m} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}); \\ u_C &= E_{2m} \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}); \end{aligned} \quad (1)$$

та імпульсами, які подаються з кутом управління  $\alpha$ , що забезпечує на активно-індуктивному навантаженні

(обмотка збудження СД) роботу вентилів з кутом провідності  $\lambda = 2\pi/3$ , тобто комутаційна функція для вентилів фази А [7] (аналогічно для фаз В та С):

$$\psi_A = \frac{4}{\pi} \sum_{k=1}^n \left[ \frac{1}{2k-1} \sin[(2k-1)\frac{\lambda}{2}] \cdot \cos[(2k-1)[(\omega t - \frac{\pi}{2}) - \alpha]] \right]. \quad (2)$$

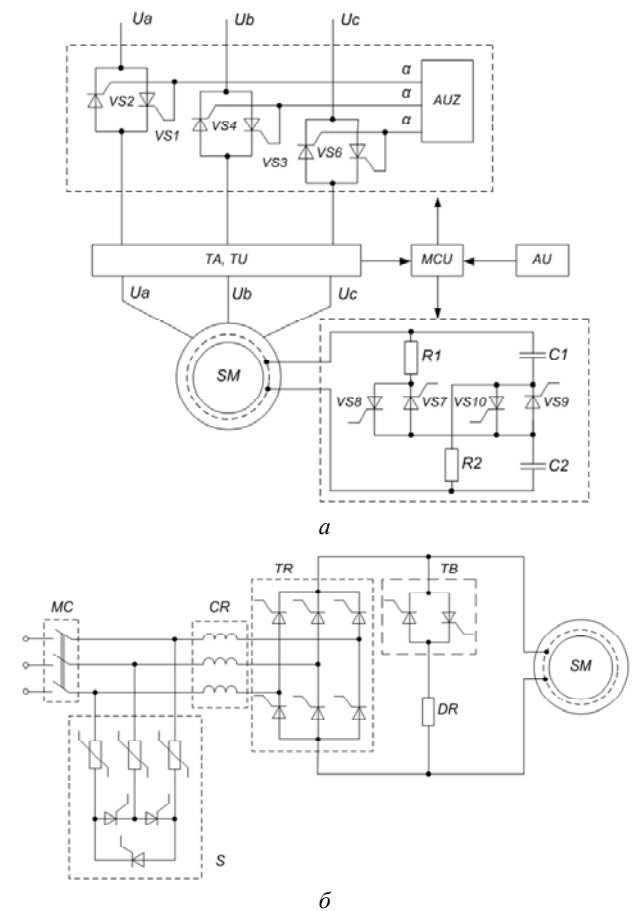


Рис. 2. Схемні рішення систем управління струмом збудження: а – система запуску СД з використанням емнісного накопичувача енергії; б – система регулювання збудженням з використання розрядного резистора у колі збудження

В результаті чого на до обмотки збудження прикладається напруга

$$u_d = u_f = u_A \psi_A + u_B \psi_B + u_C \psi_C, \quad (3)$$

забезпечуючи середнє значення:

$$U_f = k_{cx} E_{2m} (1 - \cos \alpha), \quad (4)$$

де  $k_{cx}$  – коефіцієнт схеми випрямляча,  $E_{2m}$  – максимальне значення випрямленої напруги.

В динамічному процесі під час зміни електричних параметрів режиму статора синхронної машини (струм статора), або механічних параметрів режиму (момент навантаження), відповідним чином змінюється е.р.с. взаємодіючої ротора і струм збудження:

$$i_f = \frac{u_f - d\psi_f / dt}{r_f}. \quad (5)$$

Виникає необхідність зміни струму збудження за новим законом відповідно до заданого значення струму збудження  $i_{ref}$  формованого за датчиком струму (DC) збудження (рис. 3), який надходить на один з входів блоків порівняння (BC1, 2) на другий вхід яких надходить з виходу датчика струму збудження (ТА)

сигнал поточного струму збудження  $i_f$ . В результаті порівняння на виході ВС1 формується сигнал відхилення струму  $\Delta i_1 = i_{ref} - i_f$ , а на виході ВС2 формується сигнал відхилення струму  $\Delta i_2 = i_f - i_{ref}$ .

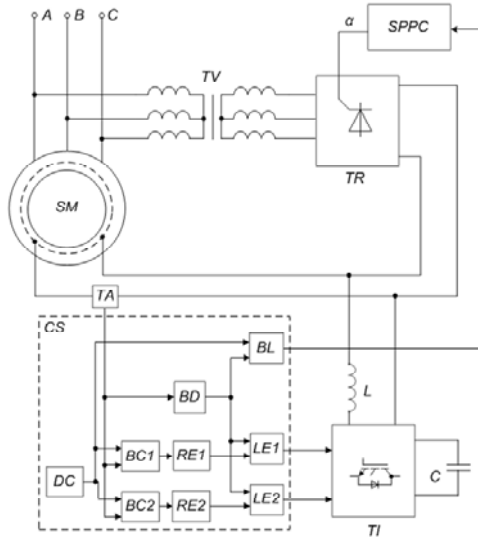


Рис. 3. Система керування збудженням СД в динамічних режимах

Сигнали з блоків порівняння надходять на відповідні релейні елементи (RE1,2), на виході яких формується сигнал:

$$u_{RE1} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \Delta i_1 \geq \Delta i_{ref}; \\ 0, & \text{якщо } \Delta i_1 < \Delta i_{ref}; \end{cases} \quad (6)$$

де  $\Delta i_{ref}$  – наперед задане відхилення струму, яке складає 5 % від номінального струму збудження синхронної машини.

Сигнал з релейних елементів (RE) надходить на другі входи логічних елементів (LE1,2) на перший вхід яких надходить сигнал  $u_{BD}$ , що формується на виході блоку диференціювання (BD). На вхід блоку диференціювання надходить сигнал поточного струму збудження  $i_f$ , на підставі якого формується сигнал:

$$u_{BD} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \frac{di_f}{dt} \neq 0; \\ 0, & \text{якщо } \frac{di_f}{dt} = 0; \end{cases} \quad (7)$$

що забезпечує визначення статичного чи динамічного режиму за струмом збудження

В результаті на виходах логічних елементів формується сигнал:

$$u_{LE} = u_{RE} \cup u_{BD}. \quad (8)$$

Ці сигнали керують роботою транзисторного перетворювача ТІ, забезпечуючи передачу енергії конденсатора. Напряга збудження визначається напругою транзисторного перетворювача та падінням напруги на буферній індуктивності

$$u_f = u_{TI} - L \frac{di_f}{dt}; \quad (9)$$

де  $u_{TI}$  – напруга транзисторного перетворювача:

$$u_{TI} = u_{LE} u_C = u_{LE} \frac{1}{C} \int i_C dt; \quad (10)$$

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

$$u_C = \frac{1}{C} \int i_C dt = \frac{1}{C} \int i_L u_{LE} dt. \quad (11)$$

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:

$$i_f r_f + \frac{d\psi_f}{dt} = u_{LE} \frac{1}{C} \int i_f u_{LE} dt - L \frac{di_f}{dt}. \quad (12)$$

У статичному режимі, коли струм  $i_f$  незмінний та відповідно  $di_f/dt = 0$ , вихідний сигнал BD, що надходить на другий вхід блоку блокування (BL), на перший вхід якого надходить сигнал струму  $i_{ref}$ , розблоковує роботу тиристорного перетворювача (TR), блокуючи роботу транзисторного перетворювача ТІ. При цьому на виході BL формується сигнал управління:

$$u_{BL} = i_{ref} \cdot u_{BD}, \quad (13)$$

де  $u_{BD}$  – логічна інверсія сигналу  $u_{BD}$ .

Сигнал з виходу BL надходить до системи імпульсно-фазового керування (SPPC), що забезпечує формування кута керування TR:

$$\alpha = K \cdot u_{BL} \cdot \pi, \quad (14)$$

де  $K = 1/u_{BLmax}$  – коефіцієнт масштабування,  $u_{BLmax}$  – максимальне значення напруги управління TR.

Напруга конденсатора обирається з умови  $U_C = 5U_{фном}$ , що обумовлено ГОСТ 183-74, по випробуванню ізоляції обмоток синхронних машин, де  $U_{фном}$  – номінальна напруга збудження.

На рис. 4 наведені результати модельних досліджень динамічних режимів роботи пристрою при живленні обмотки збудження синхронного двигуна СДЕ2-15-34-6У2, параметри схеми перетворювача обрані за рекомендаціями [8], буферний дросель,  $L = 4 \cdot 10^{-6}$  Гн, конденсатор,  $C = 0,4$  Ф,  $U_C = 180$  В.

Моделювання форсування збудження проведено з лінійним збільшенням струму збудження від 135 до 300 А, та з швидкістю наростання струму  $di_f/dt = 220$  А/с. Моделювання гасіння струму збудження проводилось з лінійним зменшенням струму від 295 до 100 А зі швидкістю спадання струму  $di_f/dt = 300$  А/с. В результаті проведення модельного експерименту отримані часові залежності: зміни напруги (рис. 4,а); струму збудження (рис. 4,б); енергії конденсатора, буферної індуктивності та втрат в контурі (рис. 4,в).

Таким чином, пристрій (рис. 3) забезпечує двосторонню передачу енергії між обмоткою збудження та конденсатором з високими показниками швидкості зміни струму, що може забезпечити достатні показники для підвищення швидкодії системи компаундування в складі АРЗ СД.

Для оцінки впливу імпульсного регулювання напруги транзисторного перетворювача (ТІ, рис. 4) отримано часову залежність коефіцієнту форми напруги – рис. 5, при живленні обмотки збудження від тиристорного перетворювача TR, та накопичувально-го перетворювача ТІ. При чому показник під час роботи ТІ є нижчим ніж під час роботи TR.

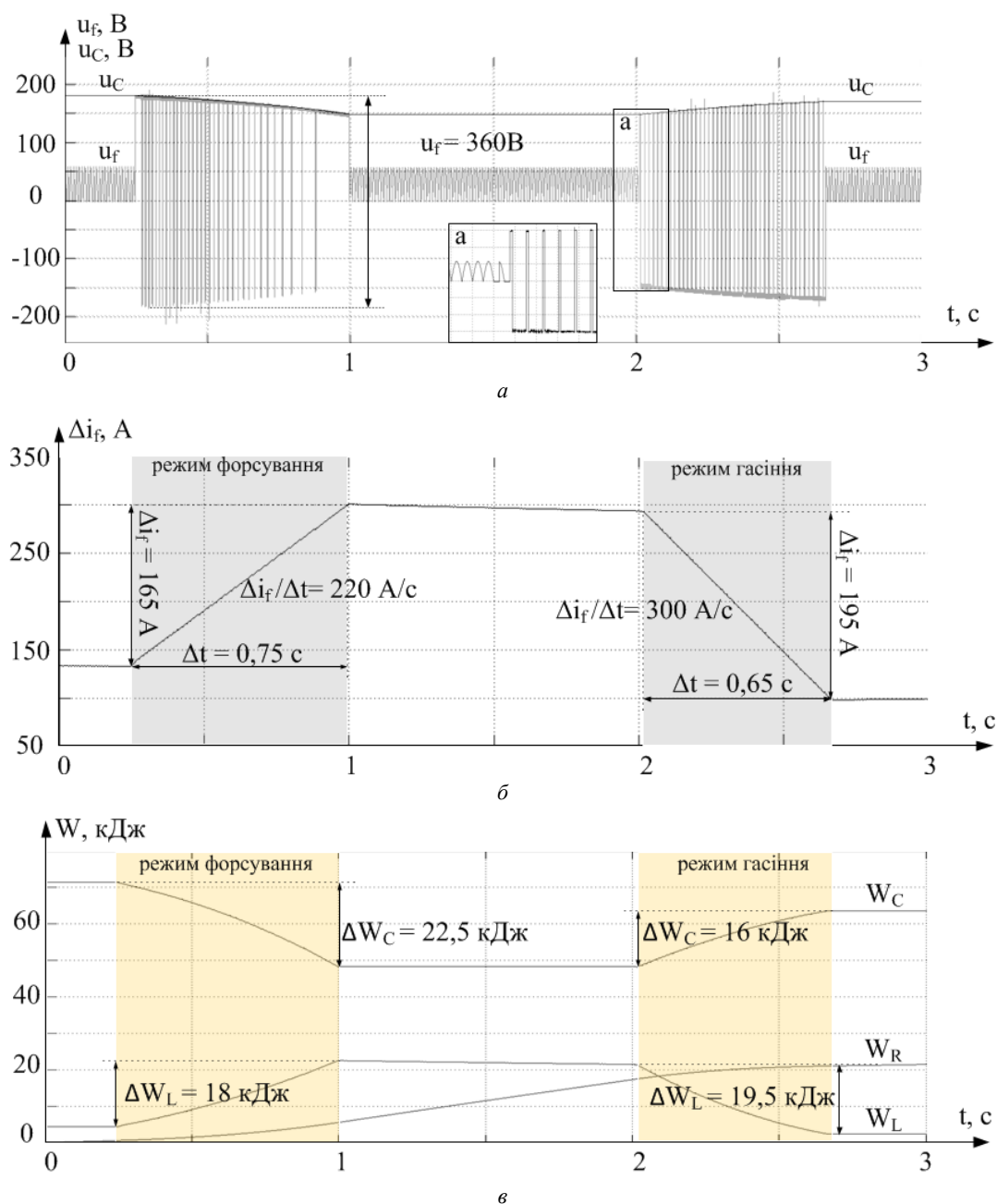


Рис. 4. Напряга (а), струм (б) та енергія (в) збудження при моделюванні режимів форсування і гасіння поля

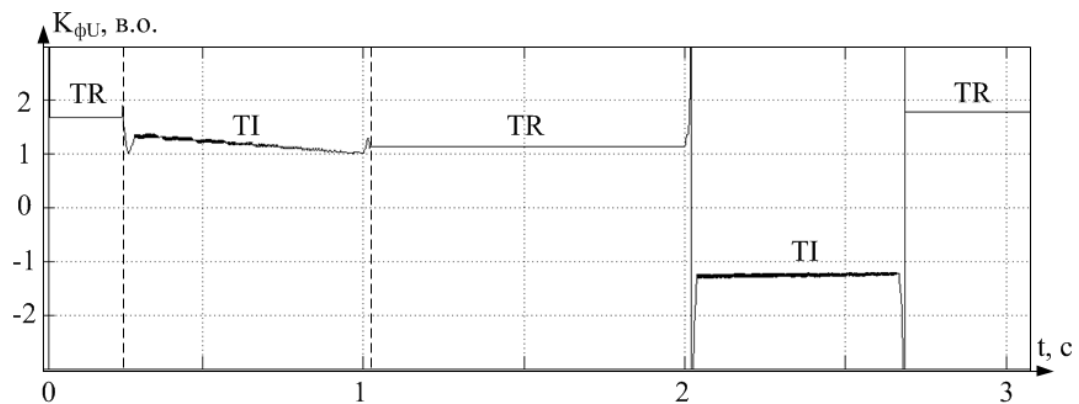


Рис. 5. Коефіцієнт форми напруги обмотки збудження

**Висновок.**

1. Висока інерційність обмотки збудження призводить до збільшення тривалості перехідного процесу

під час роботи систем АРЗ СД, знижуючи їх ефективність, для підвищення якої застосовуються силові схеми, які мають у складі конденсаторні накопичувачі

енергії, при цьому існуючі схемні рушення не забезпечують двосторонній обмін енергією між накопичувачем та обмоткою збудження.

2. Запропонована схема конденсаторного накопичувального пристрою для регулювання струму збудження СД забезпечує високі показники форсування, зокрема для двигуна СДЕ2-15-34-6У2 з номінальним струмом збудження 270А до 200 А/с.

3. Живлення обмотки збудження від транзисторного перетворювача з ємнісним накопичувачем характерно наявністю пульсацій напруги, що обумовлено роботою транзисторного перетворювача, однак коефіцієнт форми напруги є меншим, ніж при живленні від тиристорного перетворювача.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Калентионок Е.В. Устойчивость электроэнергетических систем. – Минск: Техноперспектива, 2008. – 375 с.
2. Слодарж М.И. Режимы работы, релейная защита и автоматика синхронных электродвигателей. – М.: Энергия, 1977. – 216 с.
3. Низимов В.Б., Колычев С.В., Сторожко В.С., Низимов Р.В. Управление синхронными двигателями с накопителями энергии в контуре возбуждения // Вісник КрНУ ім. М. Остроградського. – 2008. – №50. – С. 108-112.
4. Плахтина О.Г., Куцук А.С., Семенюк М.Б. Регулювання збудження синхронних електроприводів з компенсацією реакції якоря // Вісник НТУ «ХПІ». – 2010. – №28. – С. 421-422.
5. Низимов В.Б., Колычев С.В., Снизко А.А. Система параметрического пуска СД со ступенчатым накопителем энергии в обмотке возбуждения // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету. – 2011. – №1(16). – С. 101-106.
6. Осипов О.И., Мельников В.В., Оськин А.А., Куцый К.Л. Управление тиристорными возбудителями высоковольтных синхронных двигателей // Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. – 2008. – №26(126). – С. 56-60.
7. Мыцык Г.С., Бериллов А.В., Михеев В.В. Проектирование устройств силовой электроники (трансформаторно-полупроводниковые устройства): учебное пособие по курсам «Электронные энергетические системы». – Москва: Изд. дом МЭИ, 2010. – 282 с.
8. Routimo M., Salo M., Tuusa H. Comparison of voltage-source and current-source shunt active power filters // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2007. – no.2(22). – pp. 636-643.

#### REFERENCES

1. Kalentionok E.V. *Ustoichivost' elektroenergeticheskikh sistem* [The stability of electric power systems]. Minsk, Tekhnoperspektiva Publ., 2008. 375 p. (Rus).
2. Slodazh M.I. *Rezhimy raboty, releinaia zashchita i avtomatika sinkhronnykh elektrodvigateli* [Safe mode works, relay protection and automation synchronous motors]. Moscow, Energiia Publ., 1977. 216 p. (Rus).
3. Nizimov V.B., Kolychev S.V., Storoshzko V.S., Nizimov R.V. Control of synchronous motors with energy storage in circuit excitation. *Visnyk KrNU im. M. Ostrohradskoho – Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University*, 2008, no.50, pp. 108-112. (Rus).
4. Plahytina O.G., Kucyk A.S., Semenjuk M.B. Excitation regulation of synchronous electric drives with compensation of armature reaction. *Visnyk NTU «KhPI» – Bulletin of NTU "KhPI"*, 2010, no.28, pp. 421-422. (Ukr).
5. Nizimov V.B., Kolychev S.V., Snizhko A.A. Parametric system start-up of a synchronous motor with a step-energy storage in the field winding. *Zbirnyk naukovykh prac' Dniprodzherzhyn'skogo derzhavnogo tehnicnogo universytetu – The*

*collection of scientific works of Dneprodzerzhinsk State Technical University*, 2011, no.1(16), pp. 101-106. (Rus).

6. Osipov O.I., Mel'nikov V.V., Os'kin A.A., Kutsyi K.L. Control of thyristor exciters for high-voltage synchronous motors. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta – Bulletin of the South Ural State University*, 2008, no.26(126), pp. 56-60. (Rus).

7. Mytsyk G.S., Berilov A.V., Mikheev V.V. *Poiskovoe proektirovaniye ustroystv silovoi elektroniki: (transformatorno-poluprovodnikovye ustroystva): uchebnoye posobie po kursam «Elektronnyye energeticheskie sistemy»* [Exploratory design of power electronics devices (transformer-semiconductor devices): a textbook for the course "E-Energy Systems"]. Moscow, MEI Publ., 2010. 282 p. (Rus).

8. Routimo M., Salo M., Tuusa H. Comparison of voltage-source and current-source shunt active power filters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2007, no.2(22), pp. 636-643. doi: 10.1109/tpel.2006.890005.

Надійшла (received) 27.01.2015

Слободенюк Дмитро Володимирович<sup>1</sup>, аспірант,  
Бялобржеський Олексій Володимирович<sup>1</sup>, к.т.н., доц.,

<sup>1</sup>Кременчуцький національний університет  
ім. Михайла Остроградського,  
39600, Полтавська обл., Кременчук, вул. Першотравнева, 20,  
тел/phone +38 05366 30050,  
e-mail: dv2907@mail.ru, seemal@kdu.edu.ua

D.V. Slobodeniuk<sup>1</sup>, O.V. Bialobrzieski<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University,  
20, Pershotravneva Str., Kremenchuk, Poltava region, 39600,  
Ukraine.

#### The capacitive storage device in the circuit of synchronous motor excitation for the field forcing and discharge.

**Purpose.** Development of circuitry and control system with capacitive storage device in the exciting circuit of the synchronous motor for forcing and blacking out the field. **Methodology.** Mathematical modeling of transient process in dynamic modes in exciting coil of the synchronous motor with taking into consideration the flux linkage in the exciting circuit and analysis of the received results, possible future researches in this field.

**Results.** This paper analyzes the existing loading patterns of regulating exciting current of the synchronous motors. The authors study the issues of applying the storage device in the circuit coil and suggest the structure of the system of controlling dynamic modes of exciting synchronous motor which allows maintaining the specified synchronous motor exciting circuit during a certain period of time due to the capacitor energy introduced into the exciting circuit by a transistor converter. A mathematical model of the suggested device has been developed. There have been received diagrams of the transient process by modeling dynamic modes. **Originality.** The authors suggest the system of exciting with the storage condenser to apply effectively the compensative ability and enhance stability of the synchronous engine by regulating the exciting circuit in the dynamic modes. **Practical value.** On the basis of the conducted investigations the device ensures two-way transmission of energy between the exciting coil and capacitor with high characteristics of the circuit change speed which can provide sufficient characteristics for enhancing the automatic control system performance of exciting the synchronous motor is developed. References 8, figures 5.

**Key words:** synchronous motor, automatic control of exciting, relay control, transistor converter, storage condenser, mathematical model.