напряжения (перед анодным эффектом на участке с, рис.2), который мы связываем с увеличением количества твердой фазы в гетерогенной системе после пересечения линии ликвидуса.

6. Полученные теоретические и практические результаты могут быть использованы в промышленности при устранении недопустимого анодного эффекта в случае электролиза в расплавленных электролитах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Thonstad J. On the anode effect in criolyte-alumina melts / Thonstad J., Nordmo F., Vee K. // EIectrochimica Acta, 1973, Vol. 18, pp. 27–32.
2. Стендер В.В. Прикладная электрохимия / В.В.Стендер. – Харьков: Изд-во Харьковского ун-та, 1961. – 540с.
3. Кунтий О.І. Електроліз іонних розплавів. Виробництво магнію / О.І.Кунтий, Г.І.Зозуля. – Львів: Вид-во Львівського ун-ту. – 2006. – 208с.
4. Алаторцев А.В. Повышение эффективности электролиза алюминия с помощью математического моделирования / А.В.Алаторцев, Р.Н.Кузьмин, Н.П.Савенкова // Прикладная физика. –2007. – № 4. – С.34-43.
5. Альфа-металл: справочные материалы: ГОСТ. Глава XVIII. Основы расчета алюминиевого электролизера. 2010 г. (Металлургия алюминия Троицкий И.А., Железнов В.А. mht).
6. Томилов А.П. Прикладная электрохимия / Томилов А.П. – 3-е изд. – М.: Химия, 1984. – 480с.
7. Электропроводность электролитов-суспензий системы $NaF\text{-}AlF_3\text{-}CaF_2\text{-}Al_2O_3$ / К.Б.Бакин, О.Н.Симакова, П.В.Поляков [и др.] // Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies. – 2011. – 2 (4). – P.162-169.
8. Концентрационные изменения в приэлектродных слоях в процессе электролиза / В.С.Кублановский, А.В.Городыский, В.Н.Белинский, Т.С.Глущак. – Киев: Наукова думка, 1978. – 210с.
9. Шаповал В.И. Диффузия ионов кислорода к платиновому аноду в расплавах KC1–LiCl / В.И.Шаповал, В.А.Василенко // Украинский химический журнал. – 1974. – Т. XL, вып. 8. – С.92-94.

Поступила в редколлегию 23.04.2018.

УДК 621.313.322 DOI 10.31319/2519-2884.32.2018.171

НІЗІМОВ В.Б., д.т.н., професор
КОЛИЧЕВ С.В., к.т.н., доцент
ДОНЧЕНКО А.П., зав. лабораторії
ХОМЕНКО В.І.*, викладач

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське
*Придніпровський державний металургійний коледж

ПІДВИЩЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ СТІЙКОСТІ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА АВТОНОМНОЇ ГЕНЕРУЮЧОЇ УСТАНОВКИ

Вступ. На даний час у світовій енергетиці спостерігається зростання автономних генеруючих установок (АГУ) на базі синхронних генераторів (СГ), які є джерелом еле-

ктричної енергії у малонаселених місцевостях, де прокладання ліній електропостачання є недоцільним, а також у місцевостях, доступ до яких ускладнений (гірські місцевості, острова і т.д.) [1]. Крім того, АГУ часто використовується в якості резервного джерела електроживлення для споживачів I та II категорії.

Для підвищення стійкості СГ АГУ та стабілізації вихідної напруги на затискачах статора застосовують релейне або параметричне форсування напруги збудження та системи автоматичного регулювання збудження (АРЗ).

Однак у випадках природних катастроф та стихійних лих при підключенні споживачів співставної потужності, наприклад, асинхронних двигунів з к.з. ротором СГ втрачають стійкість через інерційність контура збудження, значного динамічного падіння напруги та її тривалості, що призводить до відключення захистом мінімальної напруги попередньо підключених споживачів протягом 0,5-1,5 с при зниженні напруги до $0{,}7U_{\text{н}}$ (ПУЕ п. 5.3.52).

Незважаючи на високу швидкодію тиристорних збуджувачів через інерційність контура збудження СГ відбувається аперіодичне запізнювання струму збудження, що часто є причиною втрати стійкості генератора. Тому підвищення швидкодії режимів форсування досягається за рахунок застосування випереджаючої фази напруги збудження і підвищення її кратності. Крім того, підвищення швидкодії режиму форсування може досягатися за рахунок зменшення інерційності каналів виміру і керування напругою [2-4].

Наприклад, в [2] запропоновано пристрій, в якому підвищення швидкодії режимів форсування забезпечується за рахунок подвійного диференціювання ЕРС тахогенератора, зчленованого з синхронною машиною (СМ), внаслідок чого форсування збудження відбувається у функції потужності прокатки.

Подальше підвищення швидкодії режиму форсування можливе перемиканням секцій обмоток збудження з послідовного на паралельне з'єднання при незмінному рівні напруги збудження [3]. Технічна реалізація такого пристрою вимагає застосування розділових і комутуючих діодів і ключових елементів. Крім того, обмотка збудження СМ має бути секціонованою.

Для СМ з різкозмінним навантаженням запропоновано спосіб, згідно з яким для підвищення швидкодії регулювання збудження вимірюють величину обертового моменту та використовують її як регулюючий параметр [4].

Проте застосування відомих способів і пристроїв форсування напруги збудження не забезпечує зниження інерційності самого контура збудження (КЗ), тобто струм в обмотці збудження (ОЗ) завжди має аперіодичне запізнювання по відношенню до форсувальної напруги, що у результаті визначає стійкість СГ.

Для підвищення динамічної стійкості СГ необхідно компенсувати електромагнітну інерційність контура збудження шляхом вмикання в нього, наприклад, ємнісних накопичувачів енергії (ЄНЕ).

Постановка задачі. Теоретичне та експериментальне дослідження системи керування збудженням АГУ з метою підвищення стійкості та стабілізації вихідної напруги генератора шляхом компенсації інерційності ОЗ при значних збуреннях.

Результати роботи. Принципову схему системи збудження СГ АГУ з компенсованою ОЗ наведено на рис.1 [5].

Стабілізація вихідної напруги СГ при підключені споживачів з номінальним статичним навантаженням забезпечується системою АРЗ. У випадку підключення споживачів співставної потужності, що супроводжується зниженням напруги до $0{,}85U_{\text{н}}$ або зростанням струму вище $2I_{\text{н}}$, блок форсування (БФ) вмикає тиристор VS1, що призво-

дить до розряду конденсатора ЄНЕ на тиристорний перетворювач (ТП) і ОЗ та компенсації інерційності ОЗ. За час, який дорівнює чверті періоду коливального розряду конденсатора, система АРЗ встановлює необхідний рівень напруги збудження, а діод VD4 вимикає конденсатор із контура збудження.

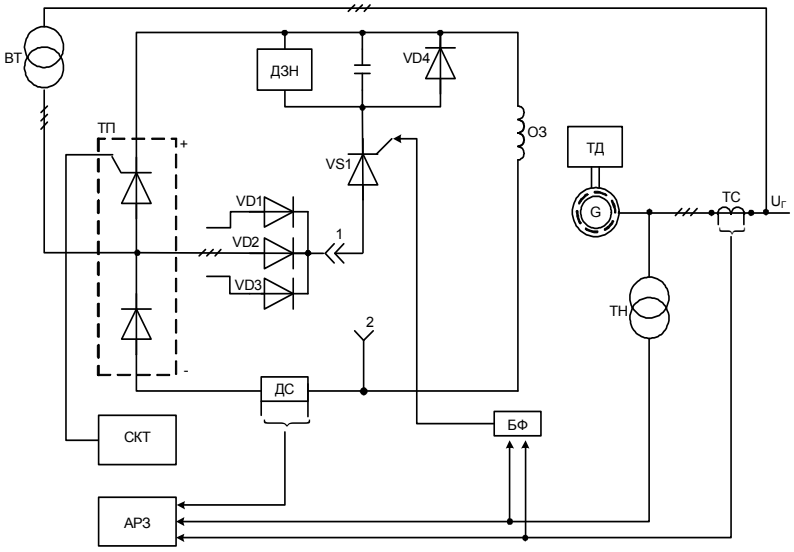


Рисунок 1 – Принципова схема системи збудження СГ АГУ

Для підвищення швидкодії режимів форсування необхідно визначити алгоритм керування контуром збудження СГ.

При підключенні споживачів до СГ кут навантаження можна визначити за виразом:

$$\theta = \theta_0 + \Delta\theta, \qquad (1)$$

де θ_0 – кут навантаження, який відповідає електромагнітному моменту генератора M_{c0}, рівному новому значенню механічного моменту M_0. Відповідно і електромагнітний момент СГ можна представити виразом

$$M_c = M_{c0} + \Delta M_c, \qquad (2)$$

в якому ΔM_c обумовлений кутом $\Delta\theta$.

Рівняння моментів генератора прийме вигляд:

$$M_0 - M_c = J_\Sigma p\omega,$$

де J_Σ – сумарний момент інерції генератора і приводного двигуна; ω – кругова частота обертання ротора генератора; $p = d / dt$ – оператор диференціювання.

З урахуванням того, що $M_0 = M_{c0}$, $p\theta = \omega_0 - \omega$, а також співвідношень (1), (2) рівняння моментів прийме вигляд:

$$J_\Sigma p^2\Delta\theta + \Delta M_c = 0, \qquad (3)$$

де ω_0 – синхронна кругова частота.

При прийнятих допущеннях M_c є функцією лише однієї змінної – кута θ, і тому можна записати

$$\Delta M_c = M_s\Delta\theta, \qquad (4)$$

де M_s – коефіцієнт синхронізуючого моменту:

$$M_s = \left(\frac{\partial M_c}{\partial\theta}\right)_{\theta=\theta_0}. \qquad (5)$$

Таким чином, керування контуром збудження повинно здійснюватись не лише у функції напруги на статорі але і у функції похідної електромагнітного моменту за кутом навантаження СГ.

Математичну модель СГ та структурну схему системи керування контуром збудження наведено на рис.2.

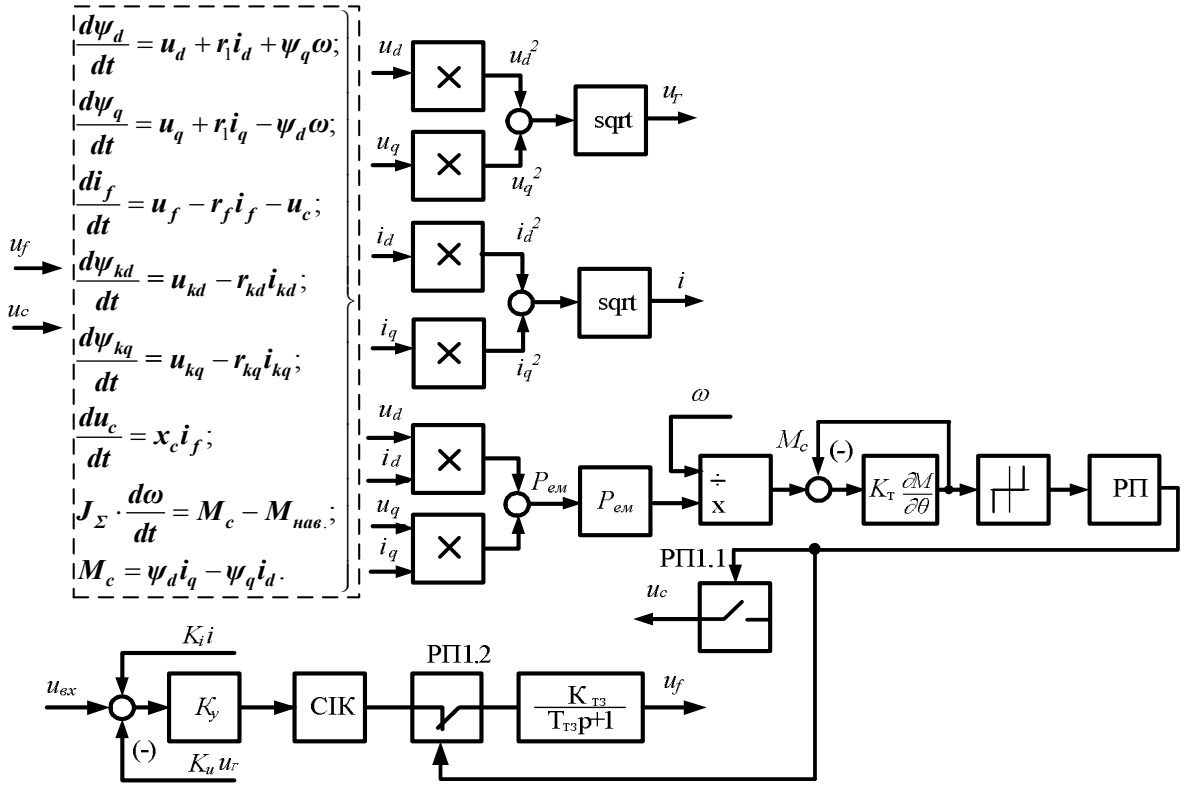


Рисунок 2 – Математична модель СГ та структурна схема системи керування контуром збудження

Обчислення струмів за поздовжньою і поперечною осями, струму контура збудження, поздовжнього і поперечного струмів демпферних контурів здійснюється за виразами:

$$\left.\begin{aligned} i_d &= \Delta_{ID} / \Delta_{AD}; \\ i_q &= \Delta_{IQ} / \Delta_{AQ}; \\ i_f &= \Delta_{IF} / \Delta_{AD}; \\ i_{kd} &= \Delta_{IKD} / \Delta_{AD}; \\ i_{kq} &= \Delta_{IKQ} / \Delta_{AQ}. \end{aligned}\right\}. \qquad (6)$$

Обчислення значень $\Delta_{ID}, \Delta_{IQ}, \Delta_{IF}, \Delta_{IKD}, \Delta_{IKQ}, \Delta_{AD}, \Delta_{AQ}$ здійснюється за співвідношеннями:

$$\left.\begin{aligned}
&\Delta_{AD} = x_\sigma \cdot x_{\sigma f} \cdot x_{\sigma kd} + x_{ad}\left(x_{\sigma f} \cdot x_{\sigma kd} + x_\sigma \cdot x_{\sigma kd} + x_\sigma \cdot x_{\sigma f}\right);\\
&\Delta_{AQ} = x_\sigma \cdot x_{\sigma kq} + x_{aq} \cdot x_{\sigma kq} + x_{aq} \cdot x_\sigma;\\
&\Delta_{ID} = \left(x_{\sigma f} \cdot x_{\sigma kd} + x_{ad} \cdot x_{\sigma kd} + x_{\sigma f} \cdot x_{ad}\right)\psi_d - x_{ad} \cdot x_{\sigma kd} \cdot \psi_f - x_{ad} \cdot x_{\sigma f} \cdot \psi_{kd};\\
&\Delta_{IQ} = \left(x_{\sigma kq} + x_{aq}\right)\psi_q - x_{aq} \cdot \psi_{kq};\\
&\Delta_{IF} = -x_{ad} \cdot x_{\sigma kd} \cdot \psi_d + \left(x_\sigma \cdot x_{\sigma kd} + x_{ad} \cdot x_{\sigma kd} + x_\sigma \cdot x_{ad}\right)\psi_f - x_{ad} \cdot x_\sigma \cdot \psi_{kd};\\
&\Delta_{IKD} = -x_{ad} \cdot x_{\sigma f} \cdot \psi_d - x_\sigma \cdot x_{ad} \cdot \psi_f + \left(x_\sigma \cdot x_{\sigma f} + x_{ad} \cdot x_{\sigma f} + x_\sigma \cdot x_{ad}\right)\psi_{kd};\\
&\Delta_{IKQ} = -x_{aq} \cdot \psi_q + \left(x_\sigma + x_{aq}\right)\psi_{kq}.
\end{aligned}\right\} \quad (7)$$

Для оцінки впливу ЄНЕ і автоматичного регулятора збудження на вихідні параметри АГУ виконано розрахунки з використанням розробленої моделі [6].

На рис.3, 4 наведено розрахункові залежності вихідної напруги СГ U_Γ = 230 В з початковим збудженням U_f = 22 В і вмиканням співставного навантаження у вигляді активних резисторів з опором 10 Ом в кожній фазі на 4-ій секунді t = 4 с. При відсутності і наявності ємності накопичувача енергії C = 100 мкФ.

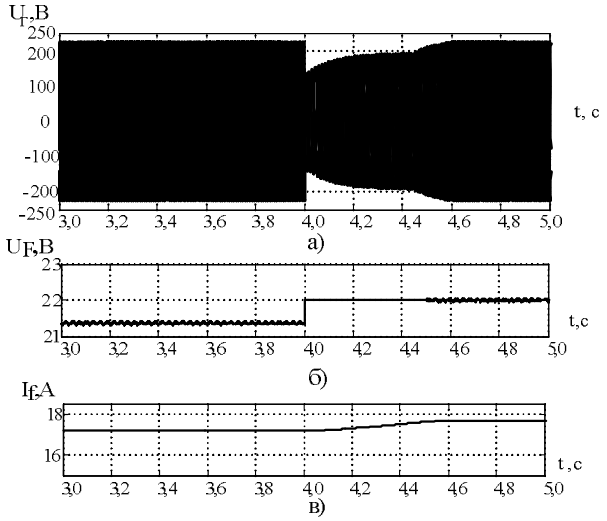


Рисунок 3 – Розрахункові залежності режиму форсування струму збудження СГ без ЄНЕ

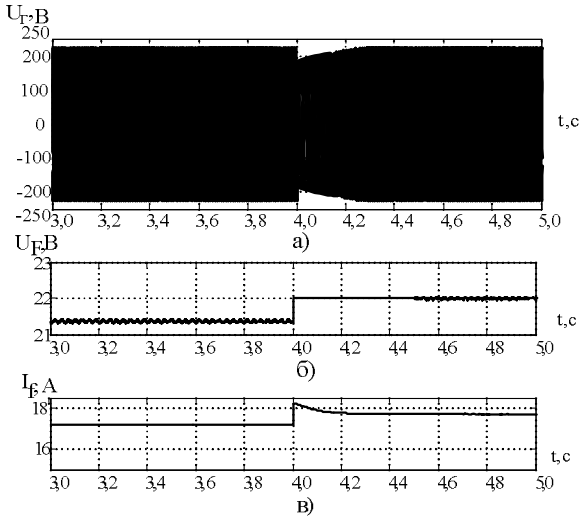


Рисунок 4 – Розрахункові залежності режиму форсування струму збудження СГ з ЄНЕ

Аналіз перехідних процесів показує, що час стабілізації вихідної напруги СМ без ЄНЕ складає t ≈ 0,6 с, а з ЄНЕ t ≈ 0,2 с. Таким чином при одній і тій самій кратності максимальної напруги збудження швидкодія пристрою, що досліджується, в режимі форсування в три рази вища, ніж без ЄНЕ, а падіння напруги відповідно складає ΔU = 40% та ΔU = 10%.

Для підтвердження теоретичних положень проведено експериментальні дослідження на синхронному генераторі типу МСА-72/4А: $P_н$ = 12 кВт; $U_с$ = 230 В;

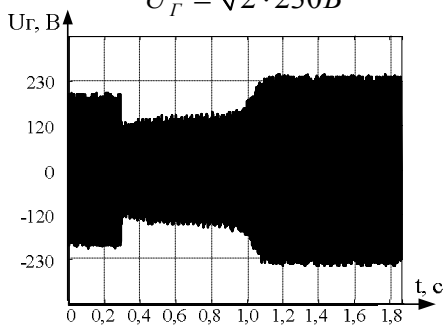
$i_{1н}$ = 37,6 А; $U_{fн}$ = 27 В; $i_{fн}$ = 23 А; $n_н$ = 1500 об/хв. в режимі форсування струму збудження з запропонованим пристроєм і з серійними тиристорними збуджувачами при підключенні споживачів співставної потужності (рис.5, 6).

Ефективність впливу компенсованої системи збудження на динамічну стійкість СГ підтверджено експериментальними дослідженнями при підключенні споживача з різним співставним навантаженням.

На рис.5 наведено осцилограми при підключені АД потужністю 11 кВт до СГ з некомпенсованим контуром збудження, а на рис.6 – осцилограми з компенсованим контуром збудження.

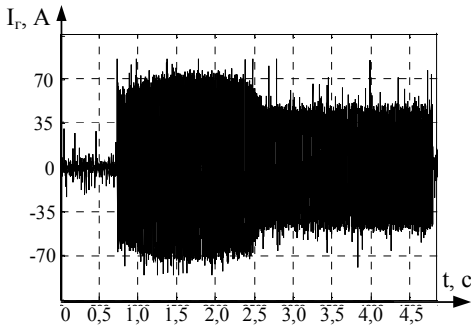
Напруга статора

$U_Г = \sqrt{2} \cdot 230B$



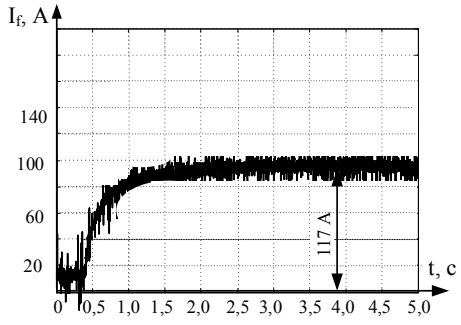
$\Delta U_Г\% = 39\%;\ \ t_{стаб} = 1,2c$

Струм статора



$I_{уст} = \sqrt{2} \cdot 36A;\ \ I_{мах} = \sqrt{2} \cdot 70A$

Струм збудження

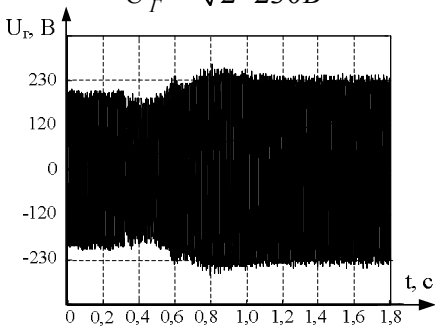


$I_{f_{поч}} = 13A;\ \ I_{f_{фор}} = 117A$

Рисунок 5 – Режим підключення АД до СГ з некомпенсованим контуром збудження

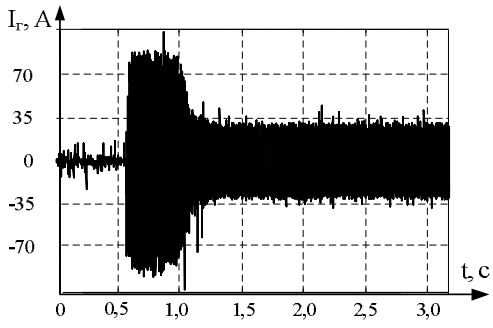
Напруга статора

$U_Г = \sqrt{2} \cdot 230B$



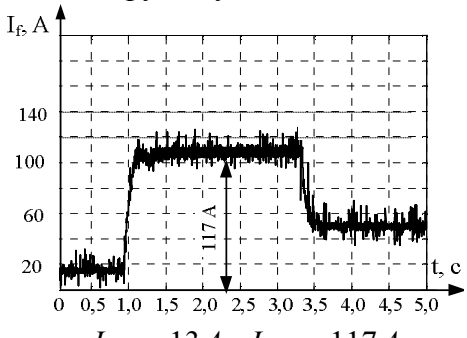
$\Delta U_Г\% = 11\%;\ \ t_{стаб} = 0,36c$

Струм статора



$I_{уст} = \sqrt{2} \cdot 36A;\ \ I_{мах} = \sqrt{2} \cdot 70A$

Струм збудження



$I_{f_{поч}} = 13A;\ \ I_{f_{фор}} = 117A$

Рисунок 6 – Режим підключення АД до СГ з компенсованим контуром збудження

Таким чином, результати дослідження динамічних режимів роботи СГ типу МСА-72/4А доводять, що час досягнення струмом збудження форсованого значення з некомпенсованим контуром становить 1 с при падінні напруги 39%, а з ємнісним накопичувачем енергії – 0,01 с, компенсація електромагнітної інерційності в тих же умовах забезпечує падіння напруги не більше 11%.

Висновки. Підвищення динамічної стійкості синхронного генератора АГУ при підключені споживачів співставної потужності може бути забезпечене ємнісною компенсацією інерційності контура збудження з керуванням режимами форсування у функції похідної електромагнітного моменту за кутом навантаження.

ЛІТЕРАТУРА

1. Праховник А.В. Малая энергетика: распределенная генерация в системах электроснабжения / А.В.Праховник. – Київ: Освіта України, 2007. – 462с.
2. А.с. №538469 СССР, МКИ Н 02 Р 9/14. Устройство форсирования возбуждения синхронного двигателя / М. Ю. Файнберг (СССР). – №1411358/07; Заявлено 05.03.70; Опубл. Бюл. №45. – 3 с.
3. А.с. №597062 СССР, МКИ Н 02 Р 9/14. Устройство для форсировки возбуждения электрической машины / В.В.Бочаров, А.П.Князев, Л.Е.Ломоносов, С.Г.Мизюрин, О.Б.Резников, В.Р.Чорба (СССР). – №1338647/24-07; заявл. 25.03.76; опубл. 05.03.78, Бюл. №9. – 2с.
4. А.с. №877772 СССР, МКИ Н 02 Р 9/14. Устройство для форсирования возбуждения синхронного двигателя / М.Ю.Файнберг (СССР). – №2883440/24-07; заявл. 15.02.80; опубл. 30.10.81, Бюл. №40. – 4с.
5. А.с. №1312715 СССР, МКИ Н 02 Р 9/12, 9/14. Устройство для управления возбуждением синхронной машины / В.Б.Низимов, С.В.Колычев (СССР). – №3965507/24-07; заявл. 21.10.85; опубл. 23.05.87, Бюл. №19. – 3с.
6. Нізімов В.Б. Підвищення стійкості автономної генеруючої установки при значних збуреннях / Нізімов В.Б., Количев С.В., Хоменко В.І. // Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – PEMS'17: міжнар. наук.-техн. та навч.-метод. конф., 25-27 квітня 2017 р.: збірник матеріалів конференції. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – С.49-50.

Надійшла до редколегії 21.05.2018.