

*Досліджено вплив розроблених пристроїв з ємнісними накопичувачами енергії в контурі збудження синхронної машини на якість перехідних процесів керування і підвищення надійності роботи машин при посадках напруги на статорі або при підключенні споживачів значної потужності. Доведено, що швидкодія процесу форсування струму збудження та гасіння магнітного поля з накопичувачем енергії значно вища в порівнянні з існуючими системами збудження*

*Ключові слова: ємнісний накопичувач енергії, форсування напруги, гасіння магнітного поля*

*Исследовано влияние разработанных устройств с емкостными накопителями энергии в контуре возбуждения синхронной машины на качество переходных процессов управления и повышения надежности работы машин при посадках напряжения на статоре или при подключении потребителей значительной мощности. Доказано, что быстродействие процесса форсирования тока возбуждения и гашения магнитного поля с накопителем энергии значительно выше по сравнению с существующими системами возбуждения*

*Ключевые слова: емкостный накопитель энергии, форсирование напряжения, гашение магнитного поля*

# ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ РОБОТИ СИНХРОННОЇ МАШИНИ ШЛЯХОМ УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ЗБУДЖЕННЯ

**В. І. Хоменко**

Викладач

Енергетичне відділення

Дніпродзержинський металургійний коледж

пр. Аношкіна, 86, м. Дніпродзержинськ, Україна, 51934

E-mail: homenkovipatriot@ukr.net

**В. Б. Нізімов**

Доктор технічних наук, професор,

завідувач кафедри\*

E-mail: elm@dstu.dp.ua

**С. В. Количев**

Кандидат технічних наук, доцент\*

E-mail: elm@dstu.dp.ua

\*Кафедра електротехніки та електромеханіки

Дніпродзержинський державний

технічний університет

вул. Дніпробудівська, 2,

м. Дніпродзержинськ, Україна, 51918

## 1. Вступ

Для живлення двигунів відповідальних механізмів необхідно забезпечити стійкість роботи автономної генеруючої установки (АГУ) шляхом керування контуром збудження в режимах форсування напруги та гасіння магнітного поля [1, 2]. Не дивлячись на високу швидкодію сучасних тиристорних систем збудження, інерційність контуру збудження призводить в ряді випадків до втрати стійкості АГУ. Тому, вибір критерію стійкості є актуальною науковою роботою.

При порушенні усталеного режиму роботи виникає надлишковий момент, який намагається повернути ротор в початковий стан, що визначається похідною від моменту синхронної машини (СМ) по куту навантаження, тобто поведінка СМ залежить від кутової характеристики машини [3].

## 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Аналіз режимів керування збудженням показує, що форсоване значення напруги збудження синхронних машин застосовується для підвищення динамічної стійкості при підключенні споживачів значної потужності [4, 5]. З цієї причини керування форсуванням збудження здійснюється у функції напруги на статорі

синхронної машини, однак при цьому не враховується знак електромагнітного моменту синхронної машини. Тому керування збудженням необхідно здійснювати не тільки по рівню напруги на статорі, але і з урахуванням режиму роботи СМ: при прискорюючому моменті необхідно форсувати збудження і гасити поле збудження при гальмівному моменті [6, 7].

Розглянемо процеси при зміні режиму роботи СМ на підставі основного закону руху системи при сталому моменті інерції:

$$J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \cdot \frac{dJ}{dt} = M_c - M_{об}, \quad (1)$$

де  $J_{\Sigma}$  – момент інерції системи;  $\frac{d}{dt}$  – оператор диферен-

ціювання;  $M_c$  – момент, що розвиває СМ;  $M_{об}$  – обертовий момент приводного механізму.

В сталому режимі роботи  $M_c = M_{об}, \frac{d\omega}{dt} = 0$ .

Оскільки, позитивний знак першої похідної від моменту по куту навантаження є першим критерієм стійкого характеру статичного режиму роботи синхронної машини, то

$$\frac{\partial M}{\partial \theta} = \frac{E_q U}{x_d} \cos \theta > 0. \quad (2)$$

При порушенні нормального режиму роботи (прикладанні значного навантаження або пониженні напруги) буде змінюватись кут навантаження  $\theta$ . У випадку генератора прискорення ротора в бік збільшення кута викликає збільшення гальмівного (електромагнітного) моменту. При сповільненні ротора зменшується кут  $\theta$ , тобто знижується гальмівний момент [7]. При збільшенні навантаження збільшується кут  $\theta$ , що може

перевищити критичний кут  $\theta_{кр} = \frac{\pi}{2}$ , тому необхідно

вводити форсування напруги збудження при умові  $\frac{\partial M}{\partial \theta} \geq 0$ . В іншому випадку, якщо  $\frac{\partial M}{\partial \theta} < 0$  – необхідно

гасити магнітне поле збудження.

Наприклад, при зниженні напруги на статорі  $U_n$  в результаті збільшення навантаження на автономну генеруючу установку визначимо момент СМ.

У випадку використання явнополюсного синхронного двигуна в якості генератора автономної генеруючої установки момент має вигляд [8]:

$$M_c = \frac{E_q U}{x_d} \sin \theta + \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \frac{U^2}{2} \sin 2\theta, \quad (3)$$

де  $U$  – напруга статора АГУ;  $E_q$  – електрорушійна сила по вісі q;  $\theta$  – кут навантаження;  $x_d, x_q$  – індуктивні опори відповідно по вісі d, q;

$$E_q = x_{afd} \cdot I_f,$$

де  $x_{afd}$  – індуктивний опір обмотки збудження (ОЗ);  $I_f$  – струм ОЗ.

Приймаючи параметри СМ, рівними  $U=1; E_q=1;$

$\theta_n = 30^\circ; \frac{x_q}{x_d} = 0,6; x_d = 1,6; x_q = 1$  визначимо критичний кут

навантаження явнополюсної СМ.

$$\left( \frac{\partial M}{\partial \theta} \right)_{\theta=\theta_{кр}} = \frac{E_q U}{x_d} \cos \theta_{кр} + U^2 \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cos 2\theta_{кр} = 0. \quad (4)$$

Підставляючи задані значення в (4) отримаємо  $\cos \theta_{кр} = 0,404; \theta_{кр} = 66^\circ$ .

При номінальній напрузі і номінальному навантаженні для неявнополюсної СМ приймаємо:  $U=1; E_q=1;$

$\theta_n = 30^\circ; \frac{x_q}{x_d} = 0,6.$

$$M_c = \frac{E_q U}{x_d} \sin \theta; \quad (5)$$

$$M_c = \frac{1 \cdot 1}{1} \cdot 0,5 = 0,5,$$

при зниженні напруги на статорі до  $0,8U_n$

$$0,5 = \frac{1 \cdot 0,8}{1} \sin \theta;$$

звідки

$$\sin \theta = 0,625; \theta = 38^\circ.$$

Якщо момент синхронної машини збільшиться в два рази:

$$2M_c = \frac{E_q U}{x_d} \sin \theta; \quad (6)$$

$$2M_c = \frac{1 \cdot 1}{1} \cdot \sin \theta = 0,5,$$

звідки

$$\sin \theta = 1; \theta = 90^\circ.$$

Таким чином, керування контуром збудження повинно здійснюватись не лише в функції напруги на статорі але і в функції похідної електромагнітного моменту по куту навантаження СМ.

У ряді випадків через інерційність самого контура збудження СМ сучасні пристрої автоматичного регулювання збудження (АРЗ) виявляються недостатньо ефективними. Обмежені можливості існуючих тиристорних збуджувачів і пристроїв АРЗ можна суттєво розширити [9]. Найефективнішим способом реалізації вказаної задачі є форсування збудження з ємнісною компенсацією інерційності контура збудження шляхом розряду заздалегідь зарядженого ємнісного накопичувача енергії в цьому контурі з одночасною подачею форсованої напруги від тиристорного перетворювача. Інтенсивне гасіння поля синхронної машини здійснюється за рахунок вмикання в контур збудження ємнісного елемента [10]. При цьому управління збудженням СМ досягається зміною структури силового перетворювача, який забезпечує релейне управління в області великих навантажень. В області малих навантажень реалізується управління пристроями АРЗ.

Оскільки електрична ємність накопичувача енергії на інтервалі провідності тиристора вмикається в контур збудження, то доцільно визначити її вплив на перехідні процеси в роторному колі, зокрема на характер зміни струму в обмотці збудження в режимі форсування збудження та гасіння магнітного поля [10].

### 3. Ціль та задачі дослідження

Проведені дослідження ставили за мету підвищити стійкість роботи синхронної машини в складі автономної генеруючої установки.

Для досягнення поставленої мети вирішували наступні задачі:

1. Розробити принципову схему системи збудження з ємнісним накопичувачем енергії для синхронної машини в складі автономної генеруючої установки;

2. Дослідити вплив ємнісного накопичувача енергії на інтенсивність зміни струму обмотки збудження синхронної машини і на підвищення динамічної стійкості її роботи;

3. Провести експериментальні дослідження режимів роботи синхронної машини автономної генеруючої установки з компенсацією інерційності контуру збудження при живленні споживачів співставної потужності.

**4. Матеріали і методи дослідження впливу ємнісних накопичувачів енергії в контурі збудження СМ на стійкість роботи автономної генеруючої установки**

**4. 1. Методика досліджень режимів роботи та визначення виразу струму контуру збудження синхронної машини для режимів форсування і гасіння магнітного поля**

В основу методики досліджень покладено аналіз режимів роботи синхронної машини шляхом розгляду складового рівняння руху і аналітичних залежностей струму контуру збудження в режимах форсування напруги збудження і гасіння магнітного поля [11–13].

З цією метою запишемо рівняння рівноваги напруг для контуру збудження СМ в наступному вигляді [7, 10]:

$$u_f = R_f \cdot i_f + x_{\sigma f} \cdot \dot{i}_f + p\psi_{\delta d} + \frac{x_c}{p} \cdot \dot{i}_f, \quad (7)$$

звідки струм обмотки збудження СМ буде мати вигляд [4]:

$$i_f = \frac{pT_c}{R_f(T_{\sigma f}T_c p^2 + T_c p + 1)}(U_{\phi} - p\psi_{\delta d}) \quad (8)$$

або

$$i_f = \frac{pT_c}{R_f(T_0^2 p^2 + 2\xi T_0 p + 1)}(U_{\phi} - p\psi_{\delta d}), \quad (9)$$

де  $\xi = T_c / 2T_0$  – коефіцієнт демпфування контуру збудження СМ;

$T_{\sigma f} = \frac{x_{\sigma f}}{R_f}$ ;  $T_c = \frac{x_c}{R_f}$ ;  $T_0 = \sqrt{T_{\sigma f} T_c}$ ; – відповідно постійні

часу контуру збудження;  $x_{\sigma f}$  – індуктивний опір розсіювання контуру збудження;  $\psi_{\delta d}$  – складова робочого потокозчеплення в зазорі СМ;  $x_c$  – ємнісний опір накопичувача на частоті мережі;  $U_{\phi}$  – напруга збудження для збуджувача в режимі форсування;  $U_f$ ,  $i_f$ ,  $R_f$ ,  $\psi_f$  – відповідно напруга, струм, активний опір і потокозчеплення ОЗ;

$p = \frac{d}{dt}$  – оператор диференціювання по часу.

В режимі форсування напруга збудження для збуджувача, що розглядається прийме вид:

$$U_{\phi} = U_{\phi} + U_c, \quad (10)$$

де  $U_{\phi}$ ,  $U_c$  – відповідно форсоване значення напруги тиристорного збуджувача і напруга зарядженого ЄНЕ.

Тоді вираз струму ОЗ в режимі форсування має вид:

$$i_f = \frac{pT_c}{R_f(T_0^2 p^2 + 2\xi T_0 p + 1)}(U_{\phi} + U_c - p\psi_{\delta d}). \quad (11)$$

Вираз струму ОЗ в режимі форсування без використання ЄНЕ:

$$i_f = \frac{1}{R_f(T_{\sigma f} p + 1)}(U_{\phi} - p\psi_{\delta d}). \quad (12)$$

Порівняльний аналіз одержаних виразів (12), (13) показує, що наявність ЄНЕ в контурі збудження спри-

яє більш інтенсивній зміні струму в даному контурі, оскільки в чисельнику знаходиться форсуючий член, а знаменник еквівалентний знаменнику коливальної ланки при відповідному виборі величини ємності. Крім того, сумарна напруга в контурі збудження за рахунок ЄНЕ може в 5–10 разів перевищувати форсовану напругу серійних тиристорних збуджувачів.

Порівняльний аналіз існуючих способів і засобів гасіння поля СМ дозволили створити основу для розробки пристроїв форсування та гасіння поля на базі ємнісних накопичувачів енергії, що володіють поліпшеними експлуатаційними показниками при високій надійності їх функціонування.

Розглянемо вираз струму контура збудження при різних системах збудження в режимі гасіння поля СМ. При включенні в ОЗ розрядного резистора з коефіцієнтом кратності форсування напруги  $K_f$ :

$$i_f = -\frac{1}{R_f(K_f + 1)(T_{\sigma f} p + 1)} p\psi_{\delta d}, \quad (13)$$

де  $T_{\sigma f} = \frac{T_{\sigma f}}{K_f + 1}$  – постійна часу контура збудження.

При переведенні збуджувача в режим інвертування з  $K_f$ -кратним форсуванням:

$$i_f = -\frac{1}{R_f(T_{\sigma f} p + 1)} \cdot (K_f \cdot U_f + p\psi_{\delta d}). \quad (14)$$

При вмиканні електричної ємності в контур збудження:

$$i_f = -\frac{T_c p}{R_f(T_{\sigma f} \cdot T_c p^2 + T_c p + 1)} p\psi_{\delta d}. \quad (15)$$

Порівняльний аналіз одержаних виразів (13)–(15) показує, що вмикання електричної ємності сприяє більш інтенсивній зміні струму ОЗ, оскільки в чисельнику знаходиться форсуючий член, а знаменник відповідає знаменнику коливальної ланки. При інвертуванні збуджувача або вмиканні розрядного резистора в ОЗ зміна струму носить аперіодичний характер, але з різними постійними часу контура збудження.

**4. 2. Досліджувані процеси та обладнання, що використовувалось в експерименті**

Для введення в контур збудження СМ додаткових елементів в режимах форсування напруги та гасіння поля необхідно застосовувати або силову контактну апаратуру, або цю операцію проводити за допомогою безконтактних силових елементів. Для статичних напівпровідникових систем збудження використання сильнострумової контактної апаратури є проблематичним, тому для переривання струму прийнято примусове виключення тиристорів збуджувачів із застосуванням ємнісних накопичувачів енергії.

Розглянемо процес форсування збудження в стандартних і розроблених схемах. Принципова схема пристрою, що забезпечує режими форсування або гасіння поля з урахуванням режиму роботи СМ приведена на рис. 1.

У початковому стані при синхроннім ході машини в режимі двигуна замикаючі ключі K1.2, K1.3, K2.2 розі-

мкнені, розмикаючі ключі K1.1 і K2.1 замкнуті. Струм в обмотці збудження синхронної машини визначається сигналами датчиків струму TA, напруги TV і потужності UP, а також початковою уставкою системи управління AUL мостовим випрямлячем, що впливає через ключі K1.1 і K2.1 на кут керування тиристорів катодної групи випрямляча UZ. Форсууючий конденсатор накопичувача енергії заряджений від джерела зарядної напруги (ДЗН).

При короткому замиканні в системі електропостачання, що супроводжується глибокою посадкою напруги або короткочасною перервою електроживлення, синхронна машина може працювати або в режимі двигуна, або генератора залежно від типу машини, привідного механізму і параметрів мережі. Синхронні машини з великим запасом кінетичної енергії переходять в генераторний режим, мають додатковий гальмівний момент і інтенсивно гальмуються. Двигуни з меншим запасом кінетичної енергії одержують додатковий момент за рахунок підживлення від машин, що працюють в генераторному режимі. Тому для забезпечення умов успішного самозапуску синхронної машини необхідно або проводити форсування збудження, або інтенсивно гасити магнітне поле залежно від режиму роботи останньої [7, 13].

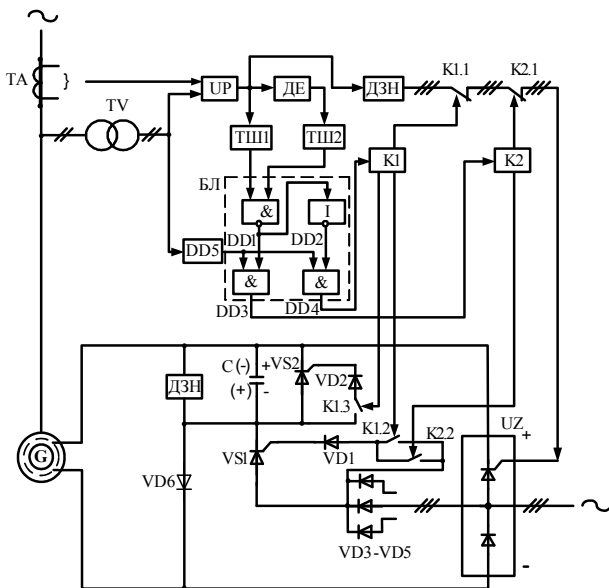


Рис. 1. Принципова схема пристрою для керування контуром збудження синхронної машини

При посадці напруги на якорі синхронної машини нижче за заданий рівень на виході порогового блоку DD5 з'являється рівень логічної одиниці і подається на перші входи логічних елементів I DD3 і DD4. Одночасно контролюється знак активної потужності статора і її похідної.

При позитивному знаку активної потужності на виході першого тригера Шмітта ТШ1 з'являється рівень логічної одиниці і подається на перший вхід логічного елементу I – НЕ DD1. При позитивному знаку похідної з виходу другого тригера Шмітта ТШ2 на другий вхід логічного елементу I – НЕ DD1 надходить рівень логічної одиниці. При цьому на

виході логічного елементу I – НЕ DD1 з'являється рівень логічного нуля і надходить на другий вхід логічного елементу I DD3, а на другий вхід логічного елементу I DD4 надходить рівень логічної одиниці, що інвертується логічним елементом НЕ DD2. В результаті цього на виході логічного елементу I DD3 виникає рівень логічного нуля, а на виході логічного елементу I DD4 – рівень логічної одиниці, що призводить до спрацьовування блоку форсування збудження K1. При спрацьовуванні блоку форсування збудження K1 розмикаються ключі K1.1, замикаються ключі K1.2 і K1.3 відповідно в керуючих електричних колах комутуючого тиристора VS1 і шунтуючого тиристора VS2. Вмикається комутуючий тиристор VS1 і зустрічним струмом заздалегідь зарядженого конденсатора С ЄНЕ замикає катодну групу тиристорів мостового випрямляча UZ. Обмотка збудження синхронної машини підключається на додаткове джерело форсованої напруги, утворене групою розподільчих діодів VD3 – VD5 і анодною групою випрямлячів мостового випрямляча. В знову створеному контурі збудження відбувається ємнісна компенсація індуктивності обмотки збудження, зменшення постійної часу контура і розряд форсууючого конденсатора С, що призводить до інтенсивного наростання струму збудження. При досягненні на конденсаторі С, що перезаряджається, заданого рівня напруги включається шунтуючий тиристор VS2, який виводить форсууючий конденсатор з контура збудження. При цьому утворюється новий контур збудження: (+) С – O3 CM – діоди анодної групи мостового випрямляча UZ – група розподільчих діодів VD3 – VD5 – комутуючий тиристор VS1 – (-) С, внаслідок чого струм в O3 визначається форсууючим значенням напруги мостового випрямляча.

При перезаряді конденсатора, тиристор VS2 шунтує останній і утворює другий контур: катод тиристора VS1 – тиристор VS2 – O3 CM – діоди анодної групи мостового випрямляча UZ – група розподільчих діодів VD3 – VD5 – анод тиристора VS1.

При роботі синхронної машини в режимі генератора в результаті посадки напруги на статорі нижче за заданий рівень на виході порогового елементу DD5 з'являється рівень логічної одиниці і подається на перші входи логічних елементів I DD3 і DD4. Оскільки активна потужність якоря в цьому режимі негативна, на перший вхід логічного елементу I – НЕ DD1 подається рівень логічного нуля, в результаті цього рівень логічної одиниці з'являється на виході логічного елементу I DD3, що призводить до спрацьовування блоку гасіння поля K2. При цьому знак похідної активної потужності не має значення. Блок розбудження K2 спрацьовує і у тому випадку, коли активна потужність позитивна, а її похідна негативна, що характерне для переходу синхронної машини з режиму двигуна в генераторний режим. При спрацьовуванні блоку розбудження K2 керувані ключі K2.1 знімають керуючі імпульси із збуджувача, а ключ K2.2 вмикає комутуючий тиристор VS1. При вмиканні тиристора VS1 зустрічним струмом ЄНЕ закривається катодна група тиристорів збуджувача, відбувається компенсація ємності індуктивності O3 і розряд форсууючого конденсатора С ЄНЕ, що призводить до короткочасного кидка струму в ком-

пенсованому контурі. В процесі перезаряду форсуючого конденсатора С відбувається зменшення струму збудження і при досягненні цим струмом нульового значення перезаряджений форсуючий конденсатор вимикає комутуючий тиристор VS1 та розряджається на ОЗ через діод VD6, що створює контур розряду: (+) С – діод VD6 – ОЗ СМ – (-) С.

Форсоване гасіння поля збудження необхідне для обмеження обсягу руйнування синхронних машин при внутрішніх коротких замиканнях обмоток статора.

### 5. Результати досліджень ефективності використання ємнісного накопичувача енергії для підвищення стійкості роботи автономної генеруючої установки

Для порівняльної оцінки ефективності форсування і гасіння магнітного поля проведені експериментальні дослідження модельної синхронної машини. При синхронному ході навантаженої машини проводилося форсування струму і гасіння поля СМ дією на відповідні блоки К1 і К2 [14]. На рис. 2, 3 приведені осцилограми режимів форсування і гасіння поля СМ в серійних тиристорних збуджувачах і в розробленому пристрої.

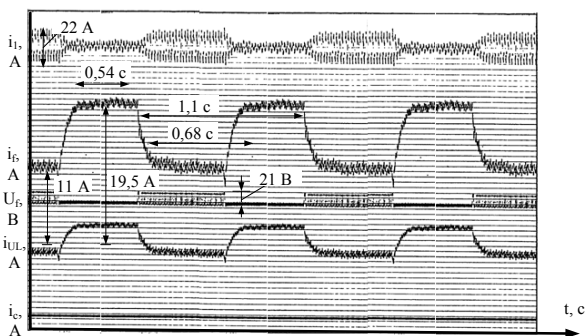


Рис. 2. Осцилограма режимів форсування збудження та гасіння поля СМ у існуючих збуджувачів

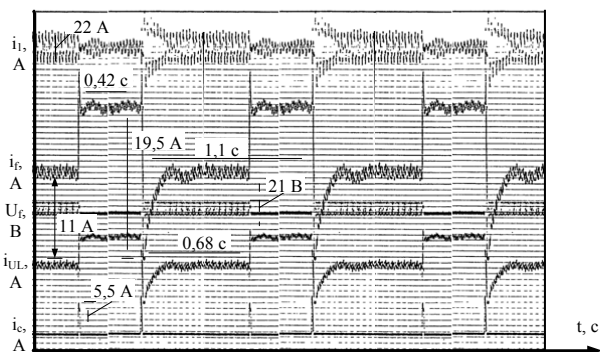


Рис. 3. Осцилограма режимів форсування збудження та гасіння поля СМ в розробленій схемі

Аналіз наведених осцилограм показує, що час досягнення струмом збудження в режимі форсування і гасіння поля СМ заданого значення приблизно на порядок менший в розробленому пристрої управління збудженням в порівнянні з аналогічними режимами серійних збуджувачів.

### 6. Обговорення результатів досліджень використання ємнісного накопичувача енергії в контурі збудження синхронної машини

При визначенні ефективності використання ємнісного накопичувача енергії в контурі збудження синхронної машини, як витікає з отриманих осцилограм (рис. 2, 3), закономірним є підвищення стійкості роботи автономної генеруючої установки. Слід зазначити, що можливості існуючих тиристорних збуджувачів і пристроїв АРЗ можуть бути розширені за рахунок ємнісної компенсації інерційності контура збудження шляхом розряду заздалегідь зарядженого ємнісного накопичувача енергії в цьому контурі з одночасною подачею форсованої напруги від тиристорного перетворювача в режимі форсування збудження та гасіння магнітного поля синхронної машини [10, 14]. При цьому управління збудженням СМ досягається зміною структури силового перетворювача, який забезпечує релейне управління в області великих навантажень. В області малих навантажень реалізується управління пристроями АРЗ.

### 7. Висновки

На підставі аналітичного і теоретичного огляду доведено, що інерційність контуру збудження й наявність заспокоюючих контурів синхронної машини не дозволяє ефективно керувати контуром збудження в режимах форсування напруги та гасіння поля впливом тільки на кути керування тиристорного збуджувача. Використання ємнісного накопичувача енергії в схемі системи збудження синхронної машини в складі автономної генеруючої установки дало можливість встановити особливості перехідних процесів в контурі збудження в порівнянні з існуючими системами. Безпосередній вплив накопичувача енергії на інерційність контуру збудження сприяє більш інтенсивній зміні струму в даному контурі за рахунок чверті коливального розряду ємності, яка потім виводиться з контуру збудження, а напруга збудження збільшується до форсованого значення.

Проведеними експериментами доведено доцільність використання розробленого пристрою в різних режимах роботи синхронної машини і переваги над існуючими збуджувачами.

Таким чином, розроблені пристрої з ємнісними накопичувачами енергії та дозволяють автоматично регулювати збудження синхронних машин, забезпечуючи високу якість перехідних процесів керування і підвищують стійкість роботи синхронних машин при посадках напруги на статорі або при підключенні споживачів значної потужності.

### Література

1. Соловьев, И. И. Автоматические регуляторы синхронных генераторов [Текст] / И. И. Соловьев, Н. И. Овчаренко. – М.: Энергоиздат, 1981. – 248 с.
2. Глебов, И. А. Электромагнитные процессы систем возбуждения синхронных машин [Текст] / И. А. Глебов – Л.: Наука, 1987. – 344 с.

3. Boldea, I. Synchronous generators [Text] / I. Boldea. – Polytechnical Institute Timisoara, Romania, 2006. – 448 p.
4. Hamata, V. Solution of the Equation of Motion of a Synchronous Machine [Text] / V. Hamata // Acta Technica Csav. – 1981. – Vol. 26, Issue 6. – P. 688–699.
5. Абрамович, Б. Н. Возбуждение, регулирование и устойчивость синхронных двигателей [Текст] / Б. Н. Абрамович, А. А. Круглый. – Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отд-ние, 1983. – 128 с.
6. Низимов, В. Б. Управление форсировкой возбуждения синхронных двигателей с компенсацией инерционности контура возбуждения [Текст]: Сб. науч. тр. / В. Б. Низимов // Кременчуг: КГПИ. – 1998. – Вып 1. – С. 87–91.
7. Fick, P. D. Accurate digital current control of the reluctance synchronous machine with constant current angle [Text] / P. D. Fick, M. J. Kamper // Trans. SA Inst. Electr. Eng. – 2004. – Vol. 95, Issue 1. – P. 47–50.
8. Важнов, А. И. Переходные процессы в машинах переменного тока [Текст] / А. И. Важнов. – Л.: Энергия. Ленинград. отд-ние, 1980. – 256 с.
9. Семенюк, М. Б. Генераторна установка з фазовим компаундуванням [Текст] : Зб. матеріалів міжнар. наук.-техн. конф./ М. Б. Семенюк // Енергетика та системи керування ЕРЕКС-2010. – Л., 2010. – С. 36–37.
10. Хоменко, В. І. Розробка системи збудження синхронного генератора з компенсацією інерційності контуру збудження [Текст] / В. І. Хоменко, В. Б. Нізімов, С. В. Количев // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету. – 2011. – Вип.1. – С. 106–111.
11. Kyriakides, E. An observer for the estimation of synchronous generator damper currents for use in parameter identification [Text] / E. Kyriakides, G. T. Haydt // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2003. – Vol. 18, Issue 1. – P. 175–177. doi: 10.1109/tec.2002.808413.
12. Kyriakides, E. On-line estimation of synchronous generator parameters using an observer for damper currents and a graphical user interface [Text] / E. Kyriakides, G. T. Haydt, V. Vittal // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2004. – Vol. 19, Issue 4. – P. 499–507. doi: 10.1109/tec.2004.832057.
13. Marti, J. R. A phase-domain synchronous generator model including saturation effects [Text] / J. R. Marti, K. W. Louie // IEEE Transactions on Power Systems. – 1997. – Vol. 12, Issue 1. – P. 222–229. doi: 10.1109/59.574943
14. Низимов, В. Б. Пусковые характеристики синхронного двигателя при дискретном управлении контуром возбуждения [Текст] / В. Б. Низимов, Р. В. Низимов // Проблемы создания новых машин и технологий. – 2001. – Вып. 1. – С. 34–38.