

2. При роботі на швидкостях, близьких до синхронної, ця потужність є малою і недостатньою для виконання завдань керування. Отже, запропонована система забезпечує роботу АМ в діапазоні швидкостей від нуля до  $\sim 4/5$  номінальної.

3. При наближенні до межі робочого діапазону швидкостей характеристики системи можуть погіршуватись, особливо у перехідних режимах (потужність ковзання є недостатньою).

1. Плахтина О.Г., Куцик А.С., Кузнецов О.О. *Експериментальні дослідження статичних характеристик в асинхронному електроприводі зі збудженням енергією ковзання* // Вісн. Нац. ун-ту "Львівська політехніка". – 2008. – № 615: Електроенергетичні та електромеханічні системи. – С. 111–115. 2. Плахтина О.Г., Куцик А.С., Йовбак В.Д. *Електромагнітні та електромеханічні процеси асинхронної машини з інвертором напруги в колі ротора при векторному керуванні* // Технічна електродинаміка. – 2004. – № 5. – С. 30–36. 3. Плахтына Е.Г. *Математическое моделирование электромашиинно-вентильных систем.* – Львов: Вища шк., 1986. 4. Куцик А.С. *Аналіз та синтез систем збудження машин змінного струму електромашиинновентильних комплексів генерування електроенергії: Дис. ...д-ра техн. наук.* – Львів: Нац. ун-т "Львівська політехніка", 2006. – 365 с. – Машинопис.

УДК 621.313.333

А.С. Куцик, В.Д. Йовбак

Національний університет "Львівська політехніка",  
кафедра ЕАП,  
Свалявський технічний коледж НУХТ

## КОМП'ЮТЕРНЕ ДІАГНОСТУВАННЯ БЕЗЩІТКОВИХ СИСТЕМ ЗБУДЖЕННЯ ГЕНЕРАТОРІВ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

© Куцик А.С., Йовбак В.Д., 2009

**Описано розроблений програмно-технічний комплекс для діагностування безщіткових систем збудження генераторів електростанцій з використанням працюючих в реальному часі комп'ютерних моделей генераторних блоків. Наведено результати експериментальних досліджень режимів роботи безщіткових систем збудження, знятих під час їх діагностування.**

**The program-technical complex is developed for diagnosing of the brushless excitation systems of power plant generators with the use of the real time computer models of generator blocks. The results of experimental researches of the work regimes of the brushless excitation systems obtained under their diagnosing are presented.**

**Постановка проблеми.** Модернізація існуючих систем збудження генераторів електростанцій, розробка і впровадження нових систем регулювання збудження вимагає їх обов'язкового випробування перед введенням в експлуатацію, оскільки несправності в системі регулювання збудження, спричинені дефектами та некоректним налаштуванням регулятора збудження і захистів, можуть призвести до аварійних ситуацій на діючому енергоблоці. Необхідність такого тестування відзначається, зокрема, в нормативних документах РАО "СЕС Росії" [1]. У зв'язку з цим існує проблема створення методів та засобів діагностування систем збудження, здатних забезпечити комплекс випробувань у всіх режимах роботи системи збудження та об'єкта регулювання (генераторного блока), а також здійснити налагодження регулятора збудження та системи захистів.

**Аналіз останніх досліджень.** Одним із способів тестування систем збудження є застосування фізичних моделей генераторних блоків. У СРСР науковим колективом під керівництвом М.П. Костенка було розроблено теорію створення фізичних моделей енергосистем та їх елементів, а В.А. Веніков розробив теорію подібності модельних машин. Відповідні фізичні моделі були створені у НДІЕлектромаш, Електросилі.

На рис. 1 показано структуру фізичної моделі для випробування систем збудження, яка розроблена у НДІ з передачі електроенергії постійним струмом високої напруги [1]. Фізична модель енергосистеми містить 6 модельних синхронних генераторів зі своїми блочними трансформаторами, 6 комплексних навантажень і 9 моделей ліній електропередачі. У цій моделі синхронні генератори МГ-64, МГ-55, МГ-47, МГ-42, МГ-8 моделюють ТЕС (ГРЕС), АЕС, ГЕС, а генератор МГ-13 являє собою концентрований еквівалент енергосистеми. Моделі ліній електропередачі (Л6 – Л18) представлені П-подібними схемами заміщення і еквівалентують мережу 500 кВ енергосистеми. Моделями навантажень (Н) використовують активні опори (R) та асинхронні двигуни (Д) з генератором постійного струму на валу, який може повертати електроенергію в мережу, від якої отримує живлення фізична модель.

До складу фізичної моделі енергоблока електростанції входить первинний двигун (еквівалентує турбіну), синхронний генератор з трансформатором, а також аналогова модель збудника, регулятора збудження, регулятора швидкості турбіни (первинного двигуна).

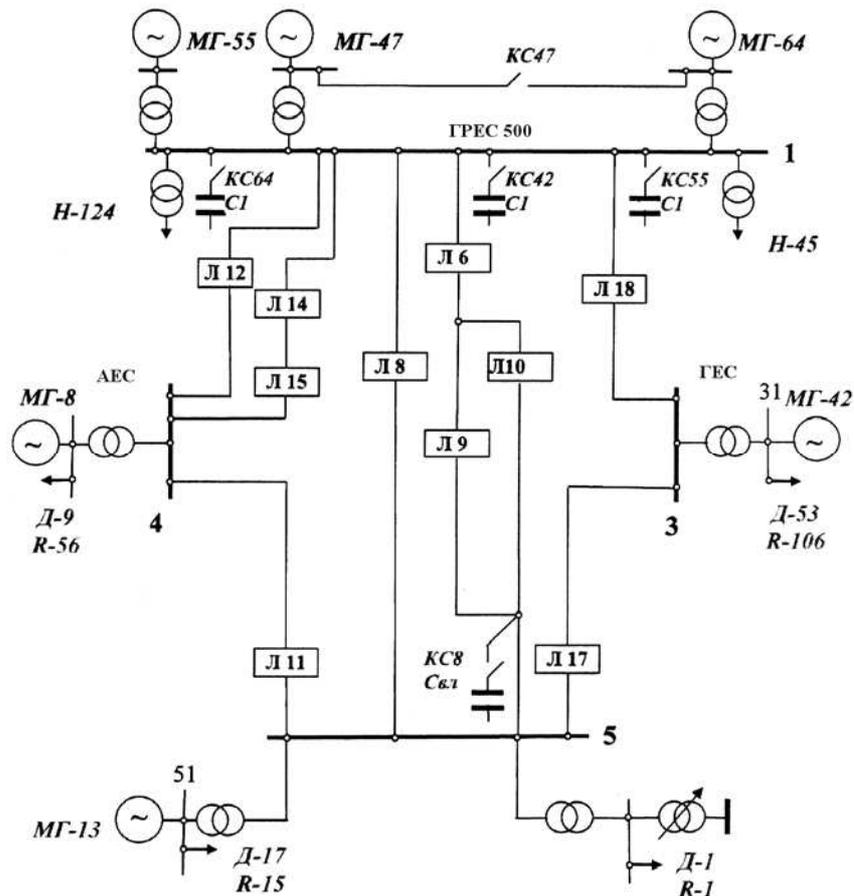


Рис. 1. Схема фізичної моделі для випробування регулятора збудження КОСУР-Ц, створена у ВАТ "НДІ з передачі електроенергії постійним струмом високої напруги" (Санкт-Петербург, Росія)

Система збудження, яку випробовують, під'єднується до одного або двох генераторів ГРЕС (МГ-64, МГ-47).

Подібні фізичні моделі дають можливість проводити випробування регуляторів збудження, однак, їм притаманні деякі недоліки. Зокрема, у фізичних моделях достатньо важко реалізуються

параметричні зміни, необхідні для проведення випробувань широкого класу систем збудження. Так, постійні часу обмоток збудження модельних генераторів істотно менші, ніж у потужних реальних генераторів. Тому для адекватного моделювання характеристик реальних генераторів синхронні генератори моделі оснащено спеціальними модельними збудниками, які містять потужні електронні підсилювачі, на вході якого підсумовуються вихідний сигнал від системи збудження та сигнал додатного зворотного зв'язку за струмом збудження, який забезпечує потрібну величину сталої часу обмотки збудження [1]. Все це істотно ускладнює конструкцію системи та її налагодження.

Крім цього, за допомогою фізичних моделей складно перевірити роботу системи збудження в аварійних режимах роботи об'єктів регулювання, оскільки це пов'язано з можливістю пошкодження фізичного обладнання, а випробування систем збудження в таких режимах є особливо важливе. Нарешті, недоліком таких фізичних моделей є їх стаціонарність, необхідність значних капітальних та експлуатаційних витрат, а також значних площ для розміщення.

**Постановка завдання.** Враховуючи зазначені вище недоліки фізичних моделей, доцільним є застосування методів цифрового моделювання для проведення діагностування систем збудження генераторів електростанцій [2]. Ці методи передбачають використання працюючих в реальному часі цифрових (комп'ютерних моделей) генераторних блоків електростанцій, які враховують всі визначальні фактори і є адекватними в широкому діапазоні режимів роботи. Застосування таких моделей для діагностування безщіткових систем збудження потужних генераторів електростанцій є завданням цього дослідження.

**Виклад основного матеріалу.** Для створення математичних та комп'ютерних моделей, які використовуються для діагностування систем збудження генераторів електростанцій, використовується об'єктно-орієнтований метод [3], який передбачає формування моделі системи шляхом поєднання об'єктів, які реалізують моделі типових елементів електромеханічних та електроенергетичних систем (електричні машини, вентильні перетворювачі, джерела живлення, трансформатори, ЛЕП). Цей метод дозволяє, також, створювати системи, які поєднують фізичні об'єкти та функціонуючі в реальному часі комп'ютерні моделі електромеханічних та електроенергетичних систем. Діагностування систем збудження, в цьому випадку, здійснюється шляхом їх під'єднання до комп'ютерної моделі генераторного блока.

Розрахункова схема моделі генераторного блока для діагностування безщіткових систем збудження показана на рис. 2. На розрахунковій схемі позначено:  $i_0 \dots i_{25}$  – струми електричних віток структурних елементів,  $\varphi_1 \dots \varphi_9$  – потенціали незалежних вузлів електромашинувентильної системи.

Згідно з вибраним методом об'єктно-орієнтована модель цієї системи формується з таких об'єктів: синхронних машин СМ1 (безщітковий збудник) та СМ2 (основний турбогенератор); катодної КВГ1 та анодної АВГ1 вентильних груп; ЛЕП (трифазна мережа, що містить у кожній фазі активний опір, індуктивність та ЕРС); RL-ланки з ЕРС, що живить обмотку збудження допоміжного генератора – безщіткового збудника і ЕРС якої дорівнює напрузі збудження, що формується фізичною системою збудження.

Математична модель враховує: нелінійність синхронних машин, які моделюються у фазних координатах, та вплив демпферних контурів ротора; дискретність вентилів напівпровідникових перетворювачів.

Структурна схема діагностичного комплексу показана на рис. 3. До складу фізичної системи збудження, яку діагностують, входять: випрямний трансформатор, тиристорний перетворювач ТП з системою керування тиристорами СКТ та автоматичний регулятор збудження АРЗ.

Комп'ютерна модель, до якої під'єднують фізичну систему збудження, охоплює: безщітковий збудник ЗБ, на обмотку збудження якого подається напруга з тиристорного перетворювача фізичної системи збудження, синхронний генератор Г та лінію електропередачі ЛЕП.

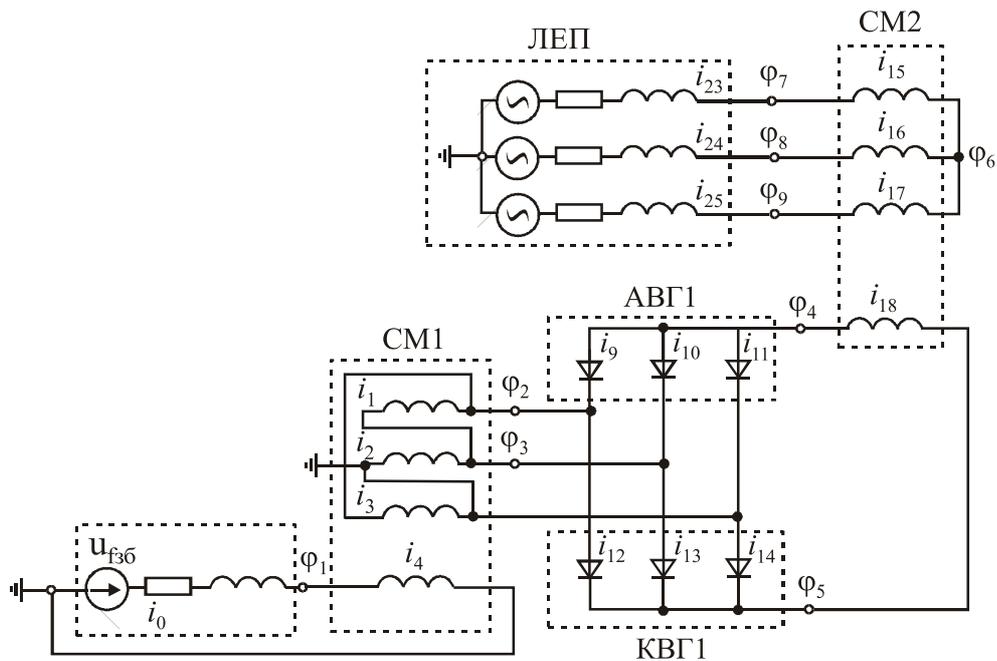


Рис. 2. Розрахункова схема генераторної установки для діагностування безщіткових систем збудження

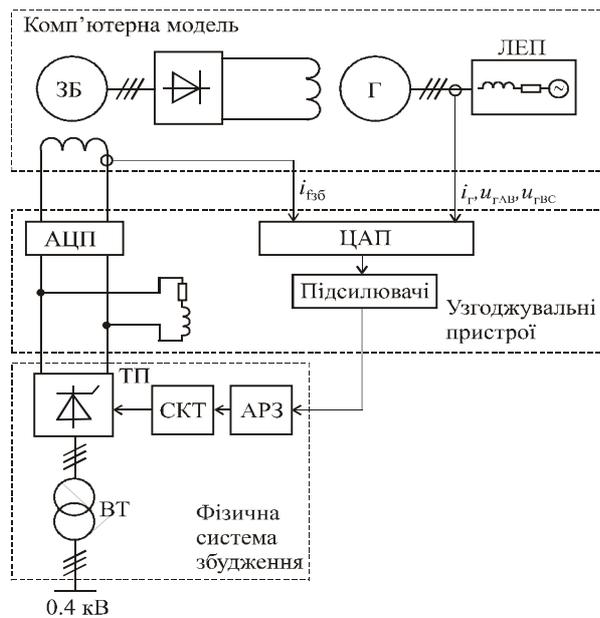


Рис. 3. Структурно-функціональна схема комплексу для діагностування безщіткових систем збудження синхронних генераторів

Призначенням узгоджувальних пристроїв є забезпечення обміну інформацією між системою збудження та комп'ютерною моделлю об'єкта регулювання. На систему збудження з комп'ютерної моделі подається така інформація: лінійна напруга  $u_{rAB}$  та  $u_{rBC}$  з виходу генератора, струм статора генератора  $i_r$ , струм збудження допоміжного  $i_{f36}$  генератора. Для забезпечення необхідних параметрів сигналів, з якими працюють реальні системи збудження на електростанціях (напруга на виході генератора 105 В і струм генератора 5 А) після ЦАП сигнали проходять через блок підсилювачів.

Вхідним сигналом для комп'ютерної моделі є напруга збудження з виходу тиристорного перетворювача системи збудження, яка через блок гальванічного розмежування подається на вхід карти АЦП. Для забезпечення нормальної роботи тиристорного перетворювача на його вихід

ввімкнено RL-навантаження, параметри якого відповідають параметрами обмотки збудження реального генератора. Зауважимо, що при наявних параметрах системи збудження струм, що протікає через тиристорний перетворювач істотно не впливає на значення його вихідної напруги, яка визначається сигналом АРЗ, що своєю чергою є функцією сигналів зворотних зв'язків: напруги генератора, струму генератора та струму збудження допоміжного генератора, які формуються комп'ютерною моделлю.

Програмне забезпечення діагностичного комплексу обладнане зручним графічним інтерфейсом користувача (рис. 4). Комп'ютерна модель дає можливість відтворити під час випробування всі характерні режими роботи генераторної установки, зокрема: початкове збудження на неробочому ході, вмикання в мережу, зміна навантаження, різного роду к.з. на виході генератора (на початку або в кінці лінії) з їх відімкненням, зміну напруги в лінії.

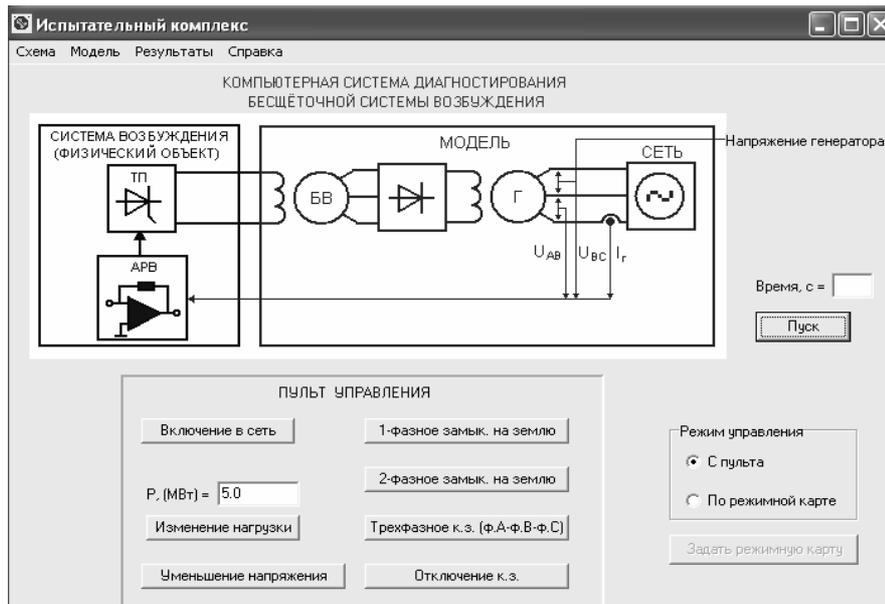


Рис. 4. Комп'ютерний інтерфейс діагностичного комплексу

Інтерфейс забезпечує два режими управління моделлю об'єкта регулювання: з пульта управління у головному вікні програми та за режимною картою. У режимі керування з пульта події ініціалізуються користувачем натисканням відповідної клавіші на пульті управління в головному вікні програми. У режимі роботи за режимною картою події відбуваються автоматично, а час їх появи задається у вікні режимної карти.

Комп'ютерний інтерфейс забезпечує, також: можливість перегляду та зміни параметрів генераторного блока, збереження результатів випробування з можливістю їх подальшого перегляду у графічному вигляді

**Результати застосування.** Розроблений діагностичний комплекс було впроваджено на ТзОВ "Руселпром-Електромаш" (м. Санкт-Петербург) і використано для випробування безщіткової системи збудження КОСУР – 220 з такими параметрами. Для безщіткового збудника: ном. потужність  $P_n = 80$  кВт; ном. напруга та струм збудження  $u_{f\delta} = 40$  В,  $i_{f\delta} = 4$  А; струм збудження неробочого ходу  $i_{f\delta нх} = 1.26$  А; індуктивні опори  $X_d = 0.86$  в.о.,  $X_{ad} = 0.75$  в.о.,  $T'_{d0} = 0.86$  с.,  $T'_d = 0.16$  с. Для синхронного генератора:  $P_n = 12$  МВт;  $U_n = 6.3$  кВ,  $I_n = 1375$  А; ном. напруга та струм збудження  $u_f = 220$  В,  $i_f = 250$  А; струм збудження неробочого ходу  $i_{fnх} = 75$  А; індуктивні опори  $X_d = 2.2$  в.о.,  $X_{ad} = 2.0$  в.о.,  $X'_d = 0.236$  в.о.,  $X''_d = 0.135$  в.о.,  $T'_d = 0.56$  с,  $T''_d = 0.03$  с. Лінію електропередачі на виході генератора представляли активно-індуктивними вітками з ЕРС ( $R_{л} = 0.002$  Ом,  $L_{л} = 0.0007$  Гн).

Результати випробувань у вигляді експериментальних осцилограм для струму збудження  $i_{\text{ББ}}$ , напруги на виході генератора  $U_{\text{Г}}$ , активної та реактивної потужностей на виході генератора  $P_{\text{Г}}$ ,  $Q_{\text{Г}}$ , зняті під час роботи реальної фізичної системи збудження з комп'ютерною моделлю генераторної установки показано на рис. 5 – рис. 7. Для знімання осцилограм використовувалася інформація з фізичної системи збудження та її програмно-технічне забезпечення. Всі величини на осцилограмах подано у відносних одиницях.

На рис. 5, а показано експериментальну осцилограму для режиму початкового збудження генератора на неробочому ході (генератор від'єднано від мережі). Характер збудження, в цьому випадку, програмний (струм збудження змінюється за програмою – стрибкоподібна подача певного завдання на початку, після чого плавне зростання поки напруга не досягне заданого значення). Налаштування АРЗ, як видно з результатів експерименту, забезпечує практично аперіодичне наростання вихідної напруги генератора.

Режим регулювання вихідної напруги генератора на неробочому ході шляхом стрибкоподібної зміни сигналу завдання напруги проілюстровано осцилограмою на рис. 5, б. АРЗ налаштовують так, щоб забезпечити зміну вихідної напруги генератора без перерегулювання, що підтверджується результатами цього експерименту.

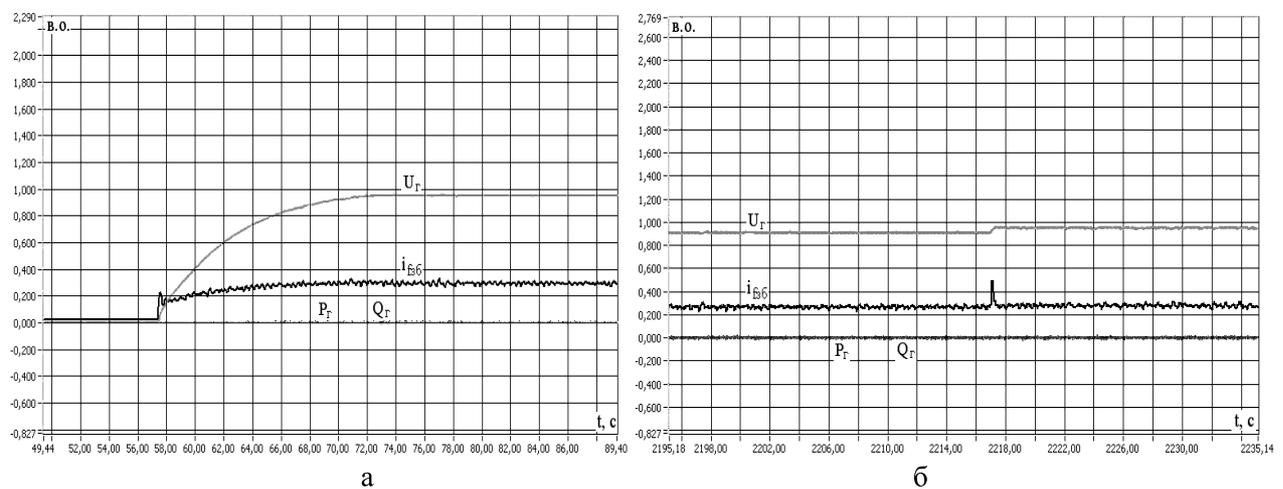


Рис. 5. Експериментальні осцилограми для режимів початкового збудження на неробочому ході (а) та регулювання напруги на виході генератора стрибкоподібною зміною сигналу завдання (б)

Режим вмикання генератора в лінію без його завантаження активною та реактивною потужністю проілюстровано осцилограмою на рис. 6, а. Вмикання генератора в лінію відбувається в момент часу  $t = 90$  с з виконанням умов точної синхронізації, тому, коливання струму збудження та напруги в цьому випадку відсутні. Оскільки генератор не завантажується його струм збудження практично не змінюється. На рис. 6, б показано результати випробування для режиму стрибкоподібного завантаження генератора активною потужністю (перший накид навантаження в момент часу  $t = 247.5$  с, другий –  $t = 262$  с). Величина реактивної потужності на виході генератора залишається постійною, відтак, струм збудження істотно не змінюється.

На рис. 7, а показано результати випробування системи збудження в режимі однофазного короткого замикання на землю в кінці лінії. Тривалість к.з. в цьому випадку становила 0.5 с. Оскільки к.з. відбувається в кінці лінії, напруга на виході генератора просідає незначно (до величини 0.9 в.о.). У разі просідання напруги на виході генератора вмикається максимальне форсування, при якому струм збудження обмежується на рівні 2.2 в.о., що передбачено відповідним налаштуванням АРЗ. На рис. 7, б показано експериментальні осцилограми для роботи системи збудження у випадку двофазного замикання в кінці лінії. Тривалість к.з. становила 0.6 с. У цьому випадку напруга на виході генератора просідає більше ніж у випадку однофазного к.з. (до величини

0.6 в.о.), а характер зміни струму збудження є аналогічний. При значному форсуванні зростає величина реактивної потужності на виході генератора.

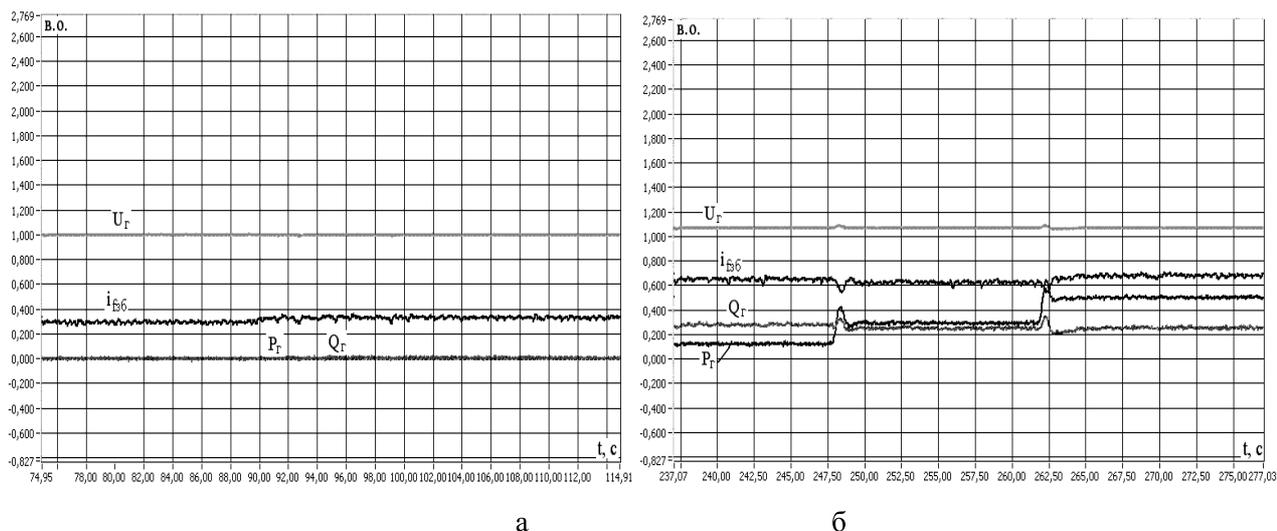


Рис. 6. Експериментальні осцилограми для режимів вмикання турбогенератора в мережу (без завантаження) (а) і завантаження активною потужністю (б)

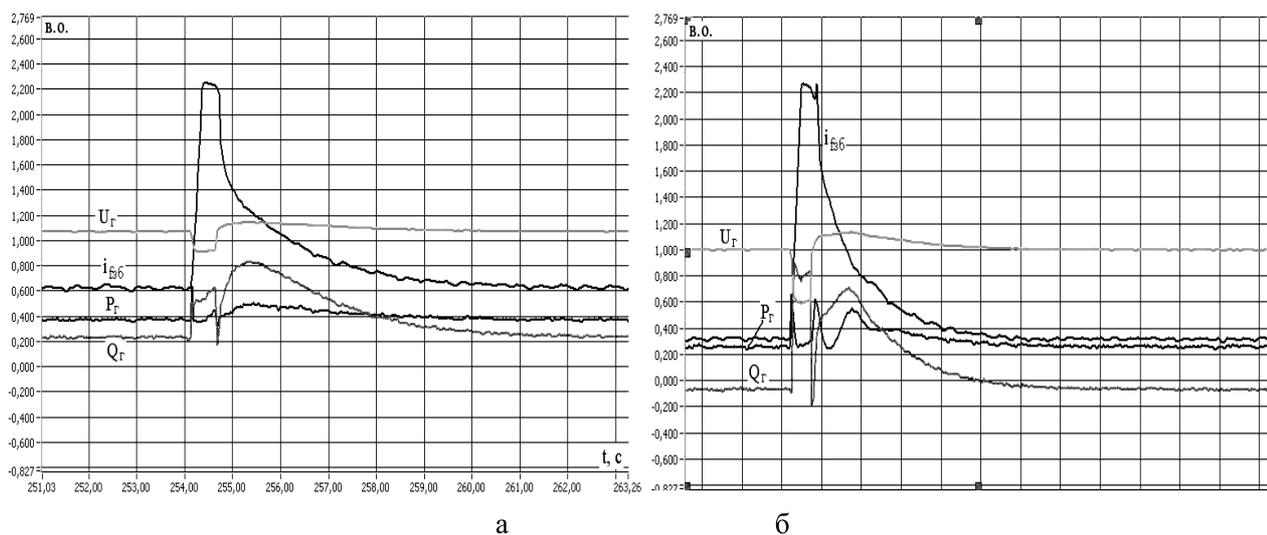


Рис. 7. Експериментальні осцилограми для режимів однофазного (а) та двофазного (б) коротких замикання в кінці лінії

**Висновки.** 1. Недоліком використання фізичних моделей для виконання завдань діагностування систем збудження потужних генераторів електростанцій є складність реалізації параметричних змін, необхідних для проведення випробувань широкого класу систем збудження, реалізації аварійних режимів роботи об'єктів регулювання, їх стаціонарність, необхідність значних капітальних та експлуатаційних витрат, а також значних площ для розміщення.

2. Перспективним для виконання завдань діагностування систем збудження є використання функціонуючих в реальному часі комп'ютерних моделей, які реалізують відсутню фізично на стадії випробування силову частину генераторного блока, що дає змогу перевірити роботу системи збудження для будь-яких режимів роботи об'єкту регулювання, зокрема і аварійних. Такі моделі можуть бути створені з застосуванням об'єктно-орієнтованого методу аналізу електромашинно-вентильних систем, який дозволяє, також, поєднати в єдиному комплексі функціонуючі в реальному часі комп'ютерні моделі та фізичні об'єкти.

3. Результати практичної апробації розробленого діагностичного комплексу свідчать про його ефективність для виконання завдань діагностування та налагодження безщіткових систем збудження потужних генераторів електростанцій.

1. *Научно-технические рекомендации по применению цифрового регулятора возбуждения синхронных генераторов КОСУР разработки ОАО “НИИЭлектромаши” на электростанциях ЕЭС России. Отчет по работе на оказание научно-технических услуг “Испытания цифрового регулятора возбуждения синхронных генераторов типа КОСУР разработки ОАО “НИИЭлектромаши” на цифро-аналогово-физическом комплексе ОАО “НИИПТ”. ОАО “НИИПТ”, Инв. № 0-7878. – СПб., 2008.* 2. *Плахтина О.Г., Куцук А.С. Программно-технический комплекс для випробування систем збудження в енергоблоках електричних станцій // Технічна електродинаміка, тем. випуск “Проблеми сучасної електротехніки”. – 2006. – Ч. 6. – С. 22–25.* 3. *Куцук А.С. Об’єктно-орієнтований метод аналізу електромеханічних систем // Технічна електродинаміка. – 2006. – № 2. – С. 57–63.*

УДК 621.313.333

А.С. Куцук, М.Б. Семенюк

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра ЕАП

## АПЛИКАЦІЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ ГЕНЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ СИНХРОННОЮ МАШИНОЮ В КОМП’ЮТЕРНІЙ МЕРЕЖІ

© Куцук А.С., Семенюк М.Б., 2009

**Розроблено багатокomp’ютерну (багатопроесорну) систему, в якій розділені розрахунок математичної моделі системи генерування електроенергії синхронною машиною, керування математичною моделлю і реєстрація результатів розрахунку.**

**Multiprocessor system, which separated the calculation of power generation system mathematical model and model control and registration of calculation results, has been developed.**

**Постановка проблеми. Аналіз останніх досягнень та публікацій.** В роботах [1, 3] запропоновано використання комп’ютерних моделей реального часу для тестування систем збудження синхронних генераторів електростанцій. Особливістю таких моделей є те, що вони, окрім розрахунку та взаємодії з цифро-аналоговими і аналого-цифровими перетворювачами (ЦАП/АЦП), повинні реалізувати керування режимами розрахунку, реєстрацію і збереження результатів розрахунку. Тому виникає проблема забезпечення роботи комп’ютерної моделі в реальному масштабі часу у разі використання одного комп’ютера.

**Задача досліджень.** Проведений аналіз вказує на необхідність створення багатокomp’ютерної (багатопроесорної) системи, в якій відбуватиметься розділення процесів розрахунку математичної моделі, керування математичною моделлю, візуалізації і збереження інформації. Виконати поставлене завдання можна шляхом використання комп’ютерних мереж, в яких передача інформації відбувається за допомогою взаємодії між клієнтом і сервером [4]. Такі мережі побудовані за протоколом TCP-IP [5] і можуть передавати інформацію в реальному масштабі часу.