

## АВАРІЙНІ РЕЖИМИ В ЕНЕРГОБЛОЦІ ЗІ СТАТИЧНОЮ СИСТЕМОЮ САМОЗБУЖДЕННЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Ó Куцик А.С., 2008

Проаналізовано аварійні режими коротких замикань на виході генератора та несправностей в статичній системі самозбудження генератора енергоблока електростанції. Результати досліджень отримано методами математичного моделювання, а також експериментально з використанням реальної системи збудження, під'єднаної до комп'ютерної моделі силової частини генераторної установки, яка функціонує в реальному часі.

**The emergency regimes of short circuit on the synchronous generator's output and of the disrepair in the semiconductor excitation systems of the power plant's generator have been analyzed. The research results have been obtained by mathematical modeling method and, also, with the use of the physical excitation systems connected to the real-time computer model of the power scheme of generator plant.**

**Постановка проблеми. Аналіз останніх досліджень.** Основним засобом керування процесом генерування електроенергії є система регулювання збудження генератора, яка забезпечує регулювання вихідної напруги генератора, стабілізацію режимів роботи генератора в енергосистемі, формування необхідного коефіцієнта потужності на виході генератора. Широке використання сьогодні знаходять, в основному, безщіткові та статичні системи збудження з напівпровідниковими перетворювачами та цифровими регуляторами збудження.

Під час розроблення систем збудження потужних генераторів електростанцій особливий інтерес становить аналіз аварійних режимів, пов'язаних з різними типами коротких замикань на виході блокового трансформатора та в різних точках довгої лінії, а також режимів, пов'язаних з несправностями в напівпровідникових перетворювачах системи збудження. Виконання досліджень цих режимів необхідне для вибору проектних рішень, синтезу системи керування, та налагодження апаратури захисту генератора. Очевидно, що такі дослідження доцільно виконувати засобами математичного моделювання. Використання в такому разі спрощених лінеаризованих математичних моделей, що широко використовуються для синтезу регуляторів збудження [1], не забезпечить адекватності отриманих результатів, оскільки зазначені режими характеризуються значним діапазоном зміни координат.

Тому, для виконання досліджень аварійних режимів коротких замикань на виході генератора та в різних точках довгої лінії, а також несправностей в статичній системі самозбудження генератора, необхідним є розроблення математичних моделей, які враховують нелінійність електричних машин, реальний активно-індуктивно-ємнісний характер лінії електропередачі та розподіленість її параметрів, а також дискретність вентилів напівпровідникових перетворювачів.

**Постановка завдання.** Завданням дослідження є аналіз аварійних режимів в електричній частині енергоблока електростанції з синхронним генератором зі статичною системою самозбудження, пов'язаних з короткими замиканнями на виході блокового трансформатора, а також режимів, пов'язаних з несправностями в напівпровідниковому перетворювачі системи збудження.

Для виконання досліджень пропонується використання об'єктно-орієнтованого методу [2], який передбачає формування моделі системи поєднанням об'єктів, які реалізують моделі типових елементів в об'єктно-орієнтованому вигляді. Цей метод дозволяє також створювати системи, які

поєднують фізичні об'єкти та функціонуючі в реальному часі комп'ютерні моделі електро-механічних та електроенергетичних систем, що розширює можливості аналізу.

**Математична модель генераторної установки зі статичною системою самозбудження синхронного турбогенератора.** Об'єктно-орієнтована модель цієї системи формується з об'єктів-моделей типових елементів електромашинувентильних систем за принципом, описаним в [2, 3]. У цьому разі об'єктами-моделями структурних елементів, згідно з розрахунковими схемами на рис. 1 – рис. 2, є об'єкти, що реалізують моделі: синхронної машини СМ; трифазного трансформатора ВТр; катодної КВГ1 та анодної АВГ1 вентильних груп (з них формується модель тиристорного перетворювача); джерела ЕБ, що еквівалентує інші енергоблоки електростанції (також використовується для моделювання різного роду коротких замикань на виході блокового трансформатора); RL-ланок; секцій лінії електропередачі ЛЕП.

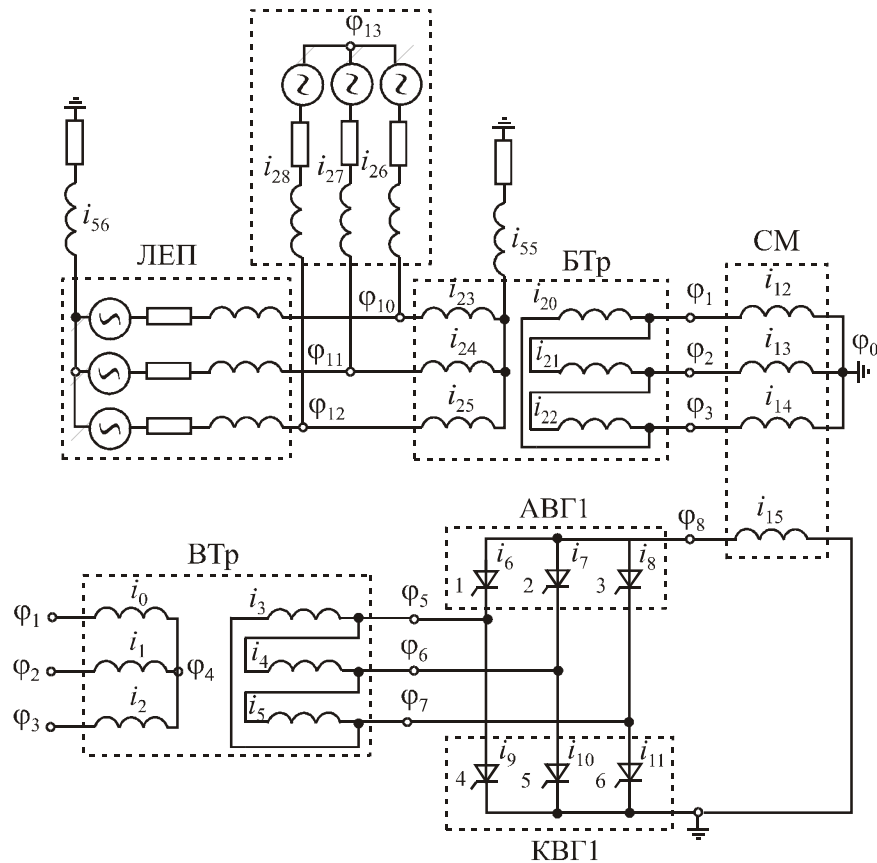


Рис. 1. Розрахункова схема системи самозбудження турбогенератора

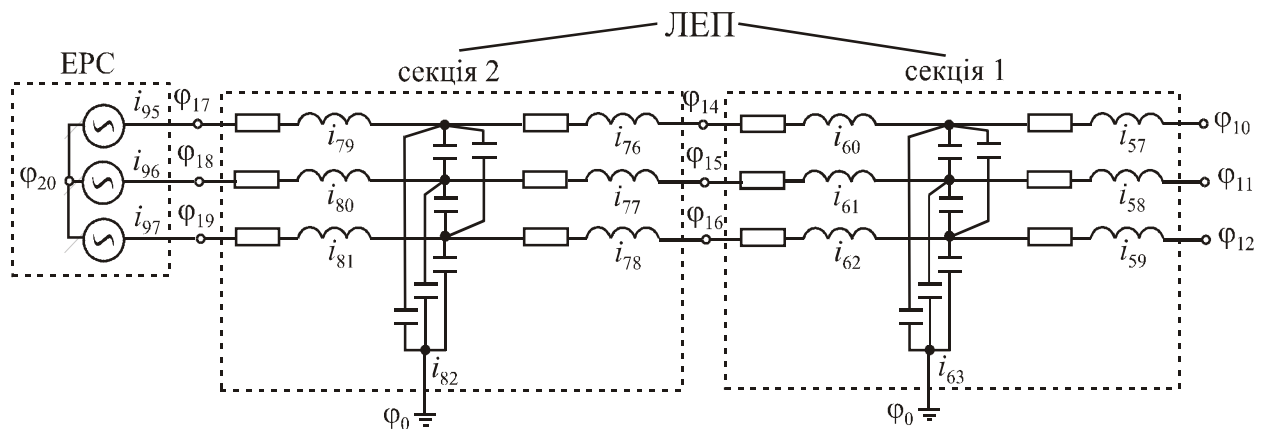


Рис. 2. Розрахункова схема ЛЕП (для моделі системи самозбудження)

Лінію електропередачі (ЛЕП) моделювали як послідовне з'єднання двох секцій згідно з розрахунковою схемою, показаною на рис. 2.

На розрахунковій схемі (рис. 1) позначено:  $i_0 \dots i_{96}$  – струми електричних віток структурних елементів,  $\varphi_1 \dots \varphi_{20}$  – потенціали незалежних вузлів електромашинновентильної системи.

У цій системі використано автоматичний регулятор збудження типу АРВ-СДП1, структура якого описана в [1].

**Результати досліджень.** Параметри системи збудження, які використовували під час виконання розрахунків процесів у цій системі (відповідають параметрами генераторної установки Білоярської АЕС, РФ) були такими. Для синхронного турбогенератора (типу ТГВ-200-2МУ3):  $P_{ном} = 210$  МВт; номінальна напруга та струм  $U_{ном} = 15750$  В,  $I_{ном} = 9060$  А; струм збудження неробочого ходу  $i_{fn.x.} = 715$  А; номінальний струм збудження  $i_{fn.x.} = 1945$  А; активні опори обмоток статора та збудження  $r_{ст} = 0.0024$  Ом,  $r_f = 0.174$  Ом; індуктивні опори  $X_d = 1.997$  в.о.,  $X_{ад} = 1.723$  в.о.,  $X'_d = 0.34$  в.о.,  $X''_d = 0.223$  в.о. Для випрямного трансформатора (ВТр) типу ТСЗП-3000/20 ВУЗ:  $S_{ном} = 2540$  кВА; номінальні напруги первинної і вторинної обмоток  $U_{1н} = 15750$  В,  $U_{2н} = 855$  В; струм неробочого ходу  $I_{нх} = 0.9$  %; напруга к.з.  $U_{кз} = 6.5$  %; активна потужність втрат  $\Delta P_{кз} = 22$  кВт. Для блокового трансформатора: типу ТДЦ-250:  $S_{ном} = 250$  МВА; номінальні напруги первинної і вторинної обмоток  $U_{1н} = 15750$  В,  $U_{2н} = 242000$  В; струм неробочого ходу  $I_{нх} = 0.45$  %; напруга к.з.  $U_{кз} = 11$  %; активна потужність втрат  $\Delta P_{кз} = 650$  кВт. Кількість пар полюсів  $p_0 = 1$ . Момент інерції агрегату  $18500$  кг·м<sup>2</sup>.

Параметри АРЗ були такими:  $K_{OU} = 20$ ,  $K_{IU} = 0.5$ ,  $K_{Ilf} = 1.0$ ,  $K_{Of} = 0.3$ ,  $K_{If} = 0.8$ .

Параметри ЛЕП напругою 220 кВ вибрано такими: індуктивність лінії  $L_{л} = 0.28$  Гн; активний опір  $R_{л} = 24.0$  Ом (для марки проводу АС-240/56); міжфазна ємність  $C_{\phi} = 0.14$  мкФ, ємність фаз на землю  $C_3 = 1.4$  мкФ (ці параметри відповідають орієнтовній довжині лінії 200 км і були поділені порівну між двома секціями згідно з розрахунковою схемою, показаною на рис. 2.

На рис. 3–6 показано результати розрахунку режиму міжфазного (ф.А – ф.В) короткого замикання в кінці лінії електропередачі.

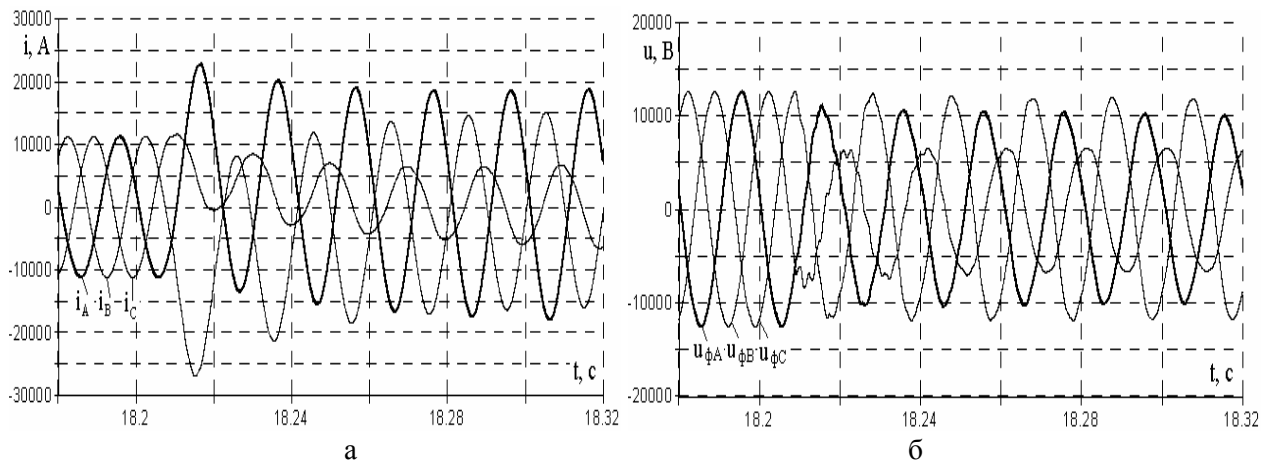


Рис. 3. Струми (а) та фазні напруги (б) на виході СГ в режимі міжфазного к.з. в кінці ЛЕП

У разі короткого замикання в кінці довгої лінії струми синхронного генератора зростають у фазах А і В, між якими відбувається коротке замикання. Струм у ф. С дещо зменшується (рис. 3.а). У струмах всіх фаз з'являється аперіодична складова, що загасає.

Внаслідок просадки напруги на виході генератора під дією АРЗ зростає напруга збудження та струм збудження турбогенератора (рис. 5). Пульсації струму збудження, зумовлені несиметрією струмів статора, призводять до пульсуючого характеру вихідного сигналу АРЗ, пульсацій напруги збудження та електромагнітного моменту турбогенератора (рис. 5, б). Величина електромагнітного моменту зменшується, а швидкість ротора зростає (рис. 5, а).

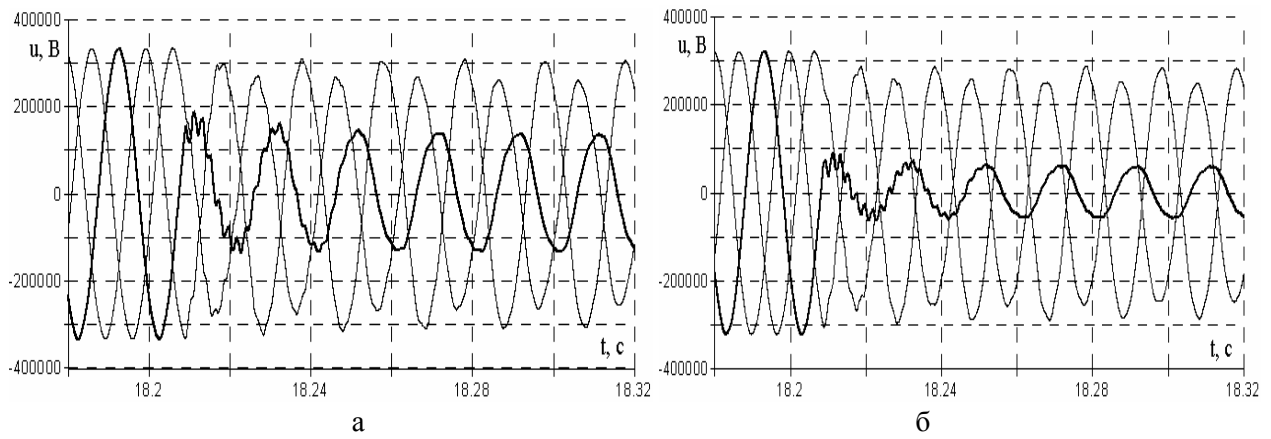


Рис. 4. Напруги на виході блокового трансформатора (а) та посередині довгої лінії (б) в режимі міжфазного к.з. в кінці довгої лінії

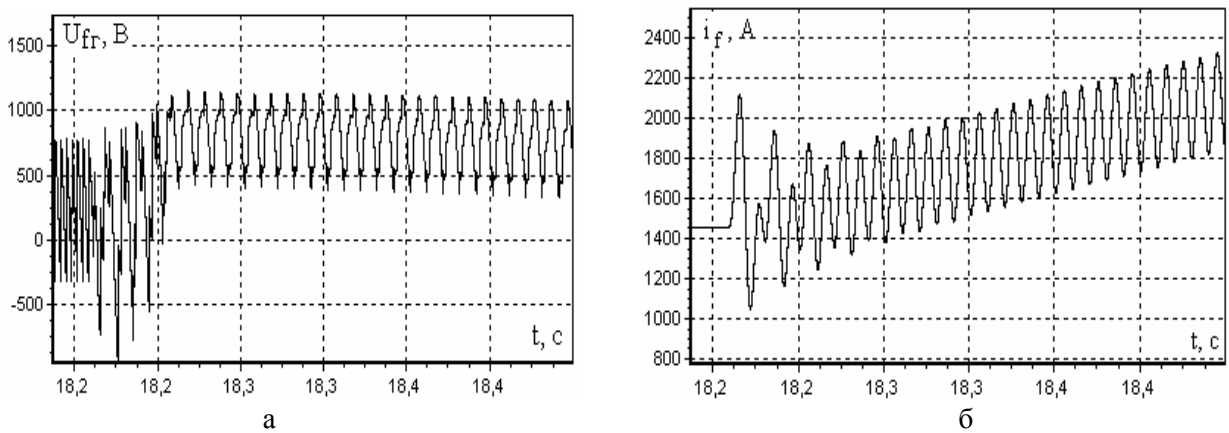


Рис. 5. Напруга (а) та струм (б) збудження генератора

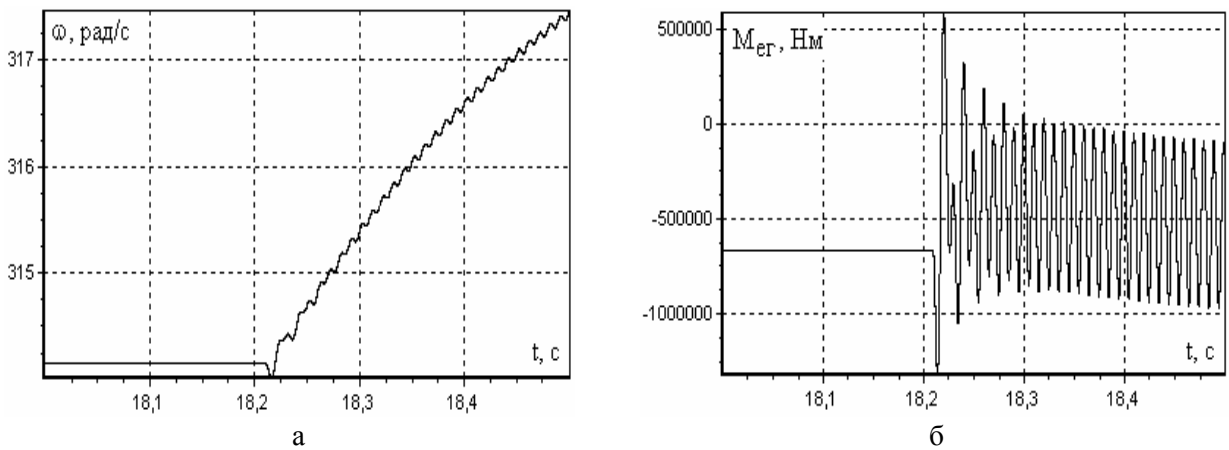


Рис. 6. Швидкість ротора (а) та електромагнітний момент (б) турбогенератора

На рис. 7–9 показано результати розрахунку режиму невідкриття одного вентиля (першого з анодної вентиляльної групи) тиристорного перетворювача, що живить обмотку збудження генератора. У такому разі спостерігається зменшення струму збудження в перший момент з подальшим відновленням до попереднього значення (рис. 7, а) за рахунок зростання вихідного сигналу АРЗ і зменшення кута відкриття працюючих тиристорів (рис. 9, б).

Пулсації напруги та струму збудження генератора у разі виходу з ладу одного вентиля ТП зростають (рис. 7), однак величина пулсацій струму збудження є достатньо малою (0.5 %), і вони не впливають на форму вихідної напруги та струму генератора (рис. 8).

За рахунок просадки струму збудження синхронного генератора в перший момент виходу з ладу вентиля кут навантаження генератора незначно зростає (рис. 9, а)

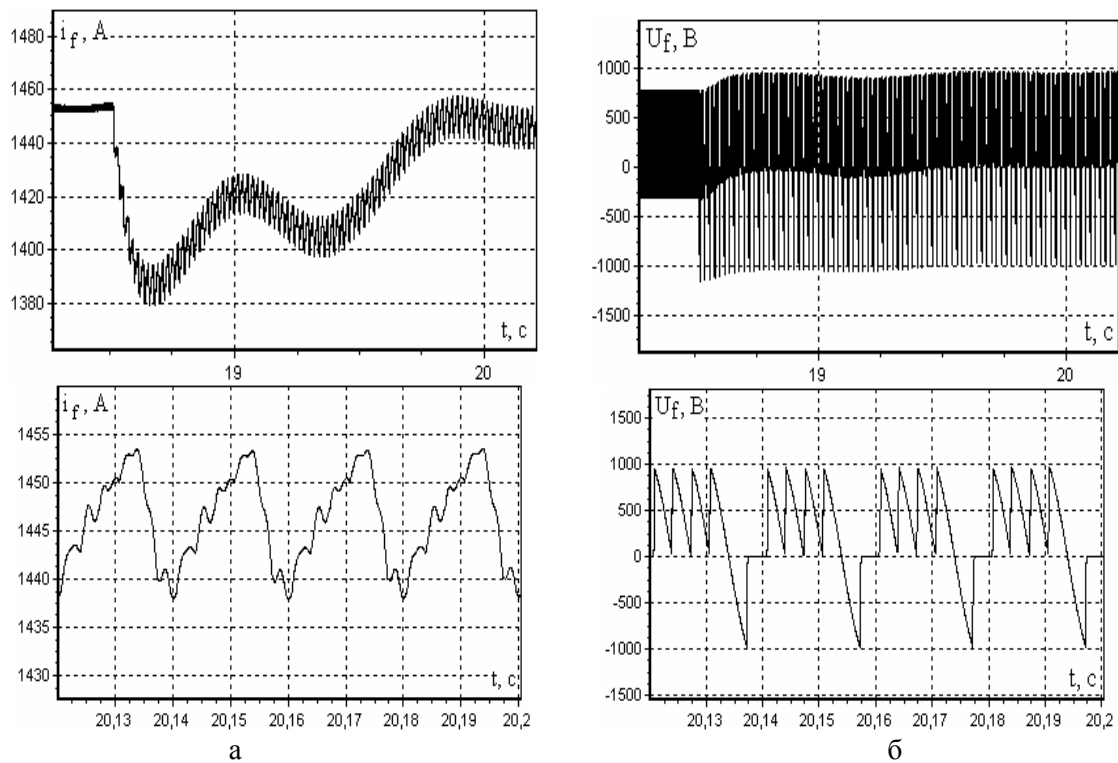


Рис. 7. Струм збудження (а) та напруга збудження генератора (б) (навідкривання вентиля ТП)

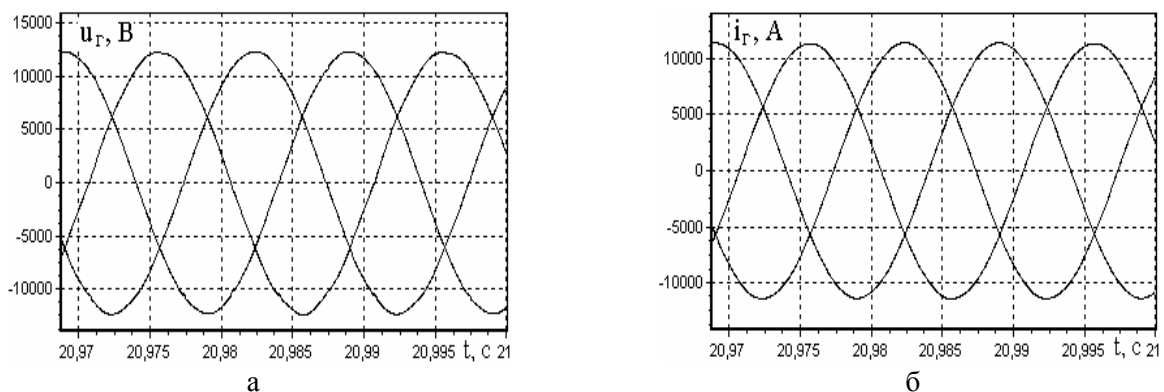


Рис. 8. Фазні напруги (а) та струми (б) статора турбогенератора

Запропонований об'єктно-орієнтований метод [2] дозволяє поєднати в єдиній системі фізичні та комп'ютерні об'єкти (моделі), що дає змогу широко застосовувати його для розв'язання задач випробування та налагодження фізичних пристроїв керування і захисту в умовах відсутності реального об'єкта керування.

На рис. 10–11 показано результати досліджень аварійних режимів у разі роботи реального регулятора збудження з комп'ютерною моделлю силової частини енергоблока, яка містить генератор з системою самозбудження, блоковий трансформатор і ЛЕП. Вхідними сигналами для моделі є відкриваючі імпульси для тиристорів перетворювача, що формуються реальним регулятором збудження. З моделі на регулятор збудження надходять сигнали зворотних зв'язків за напругою генератора, струмом статора і ротора генератора, а також синхронізуюча напруга для формування відкриваючих імпульсів тиристорів. Детальніше принцип роботи відповідного програмно-технічного комплексу описано в [4]. В експериментах використано реальну систему збудження КОСУР-201 (забезпечує струм збудження генератора до 2 кА) виготовлену на підприємстві "Роселпром-Електромаш" (Санкт-Петербург, Росія).

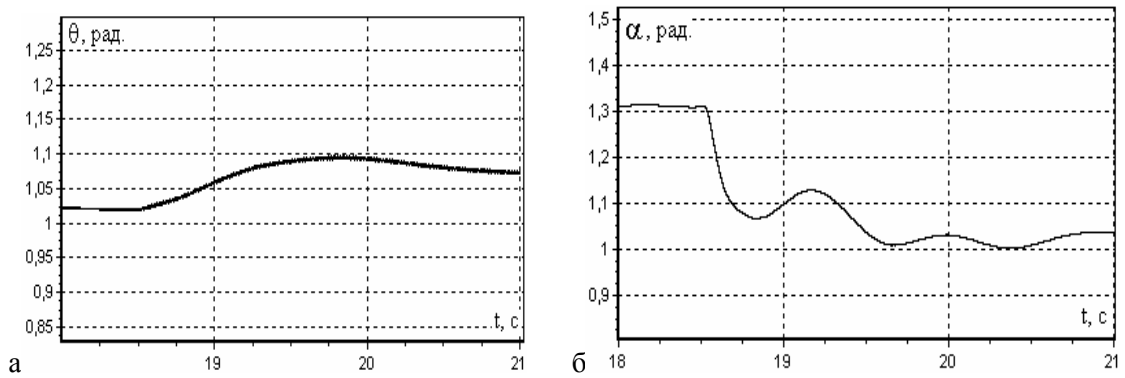


Рис. 9. Кут навантаження турбогенератора (а) та кут відкриття вентилів ТП (б)

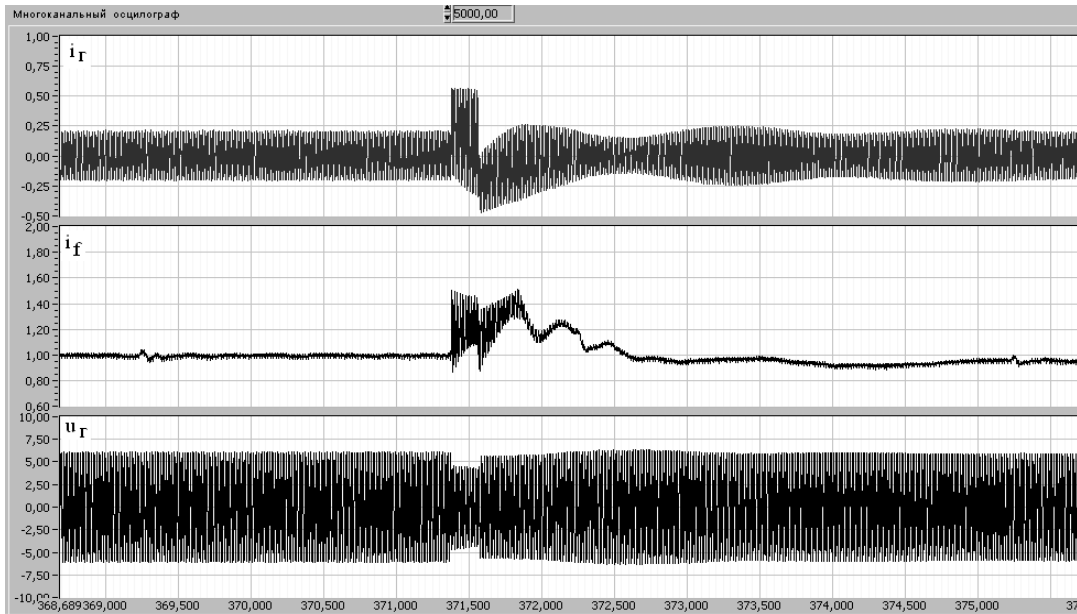


Рис. 10. Результати досліджень режиму однофазного к.з. на шинах станції в системі з фізичною статичною системою збудження КОСУР-201 ( $i_r$ ,  $i_f$ ,  $u_r$  – миттєві значення струмів статора та збудження генератора, миттєве значення напруги статора генератора)

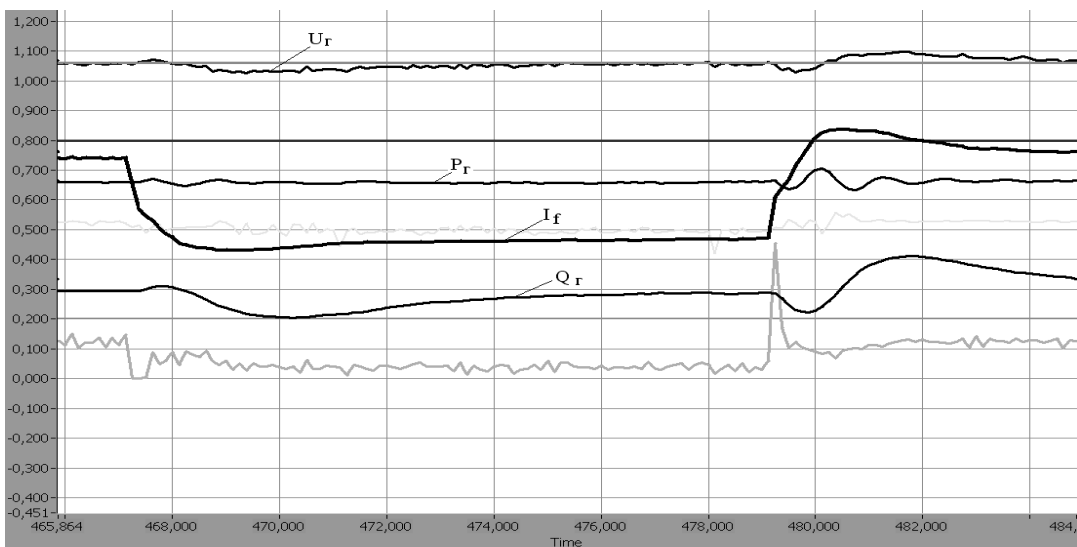


Рис. 11. Результати досліджень режиму невідкриття двох вентилів тиристорного перетворювача (з подальшим відновленням їх роботи) в системі з фізичною статичною системою збудження КОСУР-201 ( $U_r$ ,  $I_f$ ,  $P_r$ ,  $Q_r$  – діючі значення напруги статора генератора, струму збудження генератора, активної та реактивної потужностей на виході генератора)

**Висновки.** 1. Результати аналізу процесів в генераторних установках у разі коротких замикань в ЛЕП продемонстрували зміну амплітуд та струмів в лінії, а також зміну гармонічного складу напруг у лінії (виникнення вищих гармонік), зумовлену несиметрією та індуктивно-емнісним характером лінії, його залежність від параметрів лінії, її довжини та часу, а також впливи процесів у лінії на процеси в напівпровідниковій системі збудження, що проявляються у виникненні значних пульсацій струму збудження, струмів демпферних контурів та електромагнітного моменту СГ, середнє значення якого зменшується у разі к.з., що призводить до зростання швидкості СГ за незмінної потужності турбіни.

2. Наявність напівпровідникових перетворювачів як джерел живлення обмоток збудження синхронних генераторів (які працюють із значними кутами відкриття вентилів в ustalених робочих режимах) через значну сталу часу обмотки збудження не впливає негативно на якість струму збудження та вихідної напруги генератора. Пульсації струму збудження основного генератора істотно не зростають навіть за несправності одного з вентилів напівпровідникового перетворювача.

3. Поєднання в одній системі фізичних систем регулювання збудження і захисту генераторів та функціонуючих в реальному часі комп'ютерних моделей силових кіл електричної частини енергоблока дає змогу використати випробування, діагностування та налаштування згаданих фізичних пристроїв керування і захисту перед введенням в експлуатацію.

1. Юрганов А.А., Кожевников В.А. *Регулирование возбуждения синхронных генераторов.* - СПб.: Наука, 1996. 2. Куцук А.С. *Об'єктно-орієнтований метод аналізу електромеханічних систем // Технічна електродинаміка.* - 2006. - № 2. - С. 57–63. 3. Плахтина О.Г., Куцук А.С. *Математичне моделювання системи самозбудження синхронного генератора з використанням об'єктно-орієнтованого методу // Технічна електродинаміка. Тем. вип. Силова електроніка та енергоефективність. Ч. 3.* - 2005. - С. 107–111. 4. Плахтина О.Г., Куцук А.С., Тутка В.В. *Комп'ютерне тестування і діагностика систем керування і захисту синхронних генераторів з самозбудженням // Зб. наук. праць Дніпродзержин. держ. техн. ун-ту (технічні науки). Тем. вип. Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика.* - Дніпродзержинськ, 2007. - С. 493–494