

УДК 621.314.27

А.С.Куцик

Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра ЕАП

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ У СИСТЕМІ ТИРИСТОРНОГО ЗБУДЖЕННЯ СИНХРОННОГО ГІДРОГЕНЕРАТОРА

© Куцик А.С., 2002

**Використання силових напівпровідникових перетворювачів – характерна особливість побудови сучасних систем збудження потужних синхронних генераторів. Для комплексного дослідження процесів у таких системах пропонується використовувати метод математичного моделювання. У статті розглянуто один з варіантів системи збудження потужного синхронного гідрогенератора, описано його математичну модель та наведено результати дослідження процесів при початковому збудженні синхронного генератора.**

**The power semiconductor converters are widely used in the modern excitation systems of the power synchronous generators. For research of the processes in such systems the mathematical modeling method are proposed. The excitation system of the power explicit-pole synchronous generators and its mathematical model are described in the paper. The research results of the processes under initial excitation of synchronous generators are presented.**

Успіхи у розвитку напівпровідникової техніки зумовили поштовх до широкого використання у сучасних системах збудження потужних синхронних генераторів напівпровідникових перетворювачів. Системи збудження з напівпровідниковими перетворювачами, порівняно з системами збудження на магнітних підсилювачах, які використовувались раніше, а подекуди експлуатуються і сьогодні, мають деякі суттєві переваги, зокрема вищу швидкість та ширші функціональні можливості.

Функціями сучасних систем збудження з автоматичними регуляторами збудження є:

- підтримання вихідної напруги генератора з заданою точністю та статизмом;
- забезпечення стійкості регулювання у всіх режимах роботи генератора;
- інтенсивне демпфування малих та великих коливань, які виникають в енергосистемі;
- забезпечення високого рівня динамічної стійкості шляхом форсування збудження аж до граничного значення при коротких замиканнях та накиду навантаження в електричній мережі.

Для реалізації цих функцій у сучасних автоматичних регуляторах збудження використовуються як жорсткі, так і гнучкі зворотні зв'язки за регульованими величинами та регулятори різного типу [1].

На рис. 1 показано один із варіантів системи збудження потужного синхронного гідрогенератора, який експлуатується сьогодні в Росії та Україні [1]. У цій схемі обмотка збудження ОЗГ основного генератора Г живиться через робочу (РВГ) та форсуючу (ФВГ) вентильні групи, які з'єднані паралельно, від допоміжного синхронного генератора (збудника ЗБ) з самозбудженням. Статорна обмотка збудника складається з двох півобмоток із співвідношенням витків 1: 3. Відповідно на ФВГ, яка забезпечує режим форсування збудження Г, подається напруга, що в 3 рази перевищує напругу на РВГ. У нормальному

робочому режимі роботи при номінальному струмі збудження основного генератора працюють обидві вентильні групи, причому ФВГ несе 20 % навантаження. В режимі форсування працює лише ФВГ і забезпечує чотирикратне форсування за напругою збудження Г. Перевага такої схеми в тому, що при пошкодженні одного з перетворювачів робота може проходити на іншому без обмеження величини струму збудження. Збудження допоміжного генератора ЗБ здійснюється за схемою самозбудження через трансформатор та перетворювач.

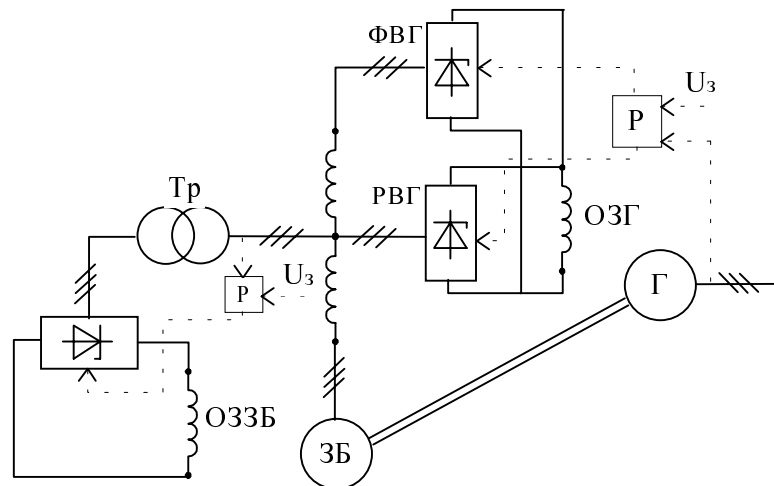


Рис. 1. Система збудження синхронного гідрогенератора

Структура автоматичного регулятора збудження показана на рис. 2. У цій системі використано зворотні зв'язки за частотою (жорсткий та гнучкий), за напругою генератора (жорсткий та гнучкий) та гнучкий за струмом збудження. На рис. 2 позначено:  $W_f(p)$  – передавальна функція блока частоти;  $W_{df}(p)$  – передавальна функція диференціатора каналу частоти;  $W_u(p)$  – передавальна функція блока напруги генератора;  $W_{du}(p)$  – передавальна функція диференціатора каналу напруги;  $W_{If}(p)$  – передавальна функція блока струму збудження;  $W_a(p)$  – передавальна функція блока підсилення;  $K_{of}$ ,  $K_{If}$ ,  $K_u$ ,  $K_{Iu}$ ,  $K_{If}$  – вагові коефіцієнти, які лінійно залежать від перемикача коефіцієнтів підсилення каналів регулювання. Регулювання напруги допоміжного генератора ЗБ здійснюється окремим регулятором.

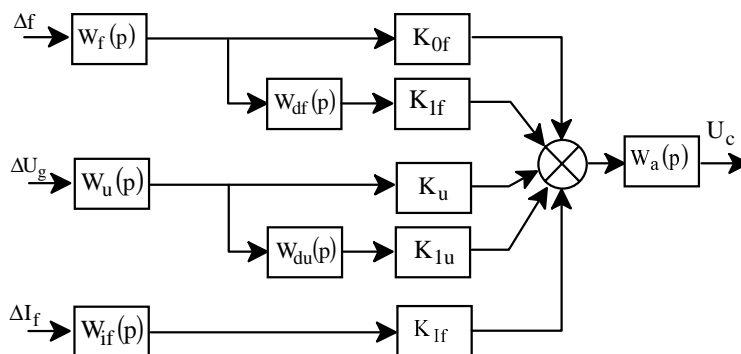


Рис. 2. Структура автоматичного регулятора збудження

Математична модель автоматичного регулятора збудження (АРЗ) для системи збудження синхронного гідрогенератора (рис. 1) показана на рис. 3. На регулятор заводяться сигнали зворотніх зв'язків за напругою, частотою та струмом збудження основного генератора (в моделі ці сигнали у відносних одиницях). Вихідний сигнал АРЗ є керуючим сигналом для РВГ і ФВГ.

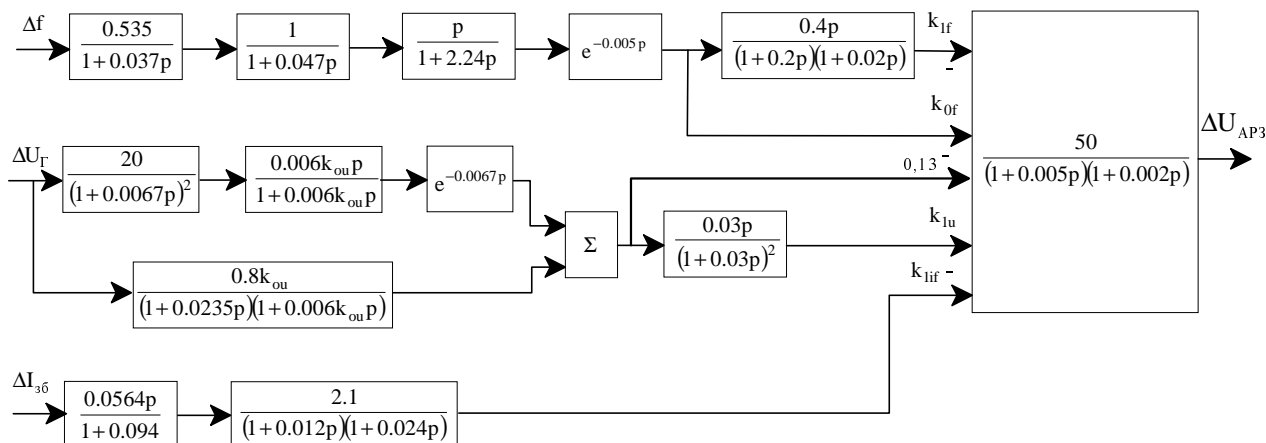


Рис. 3. Математична модель АРЗ

Проектування та експлуатація систем збудження генераторів вимагають комплексної інформації про їх поведінку в різних режимах роботи, зокрема і в аварійних чи близьких до аварійних режимах. Оскільки проведення експериментів на реальних працюючих системах пов'язано зі значними матеріально-технічними затратами здебільшого неможливе взагалі, доцільним є створення математичних моделей, які б дозволяли досліджувати процеси в згаданих системах з достатньо високим ступенем адекватності отриманих результатів.

Для створення математичної моделі досліджуваних систем збудження була використана теорія математичного моделювання електромашинно-вентильних систем, описана в [2]. Цей підхід дозволяє достатньо легко формувати математичні моделі електромеханічних систем будь-якої складності з готових моделей типових елементів (електричні мережі,

електричні машини, вентильні перетворювачі тощо), які реалізовані програмно і входять до бібліотеки програмного комплексу. Залежно від задач дослідження при формуванні моделі електромеханічної системи можна використовувати моделі типових елементів з різним ступенем деталізації математичного опису об'єкта.

Розглянемо математичну модель синхронного гідро-генератора – явнопольсної синхронної машини.

Система рівнянь, яка описує явнопольсну синхронну машину (СМ), зображену на рис. 4, має вигляд

$$\vec{\varphi}_1 - \vec{\varphi}_2 - p\vec{\Psi}_{ee} - \vec{R}_{ee} \cdot \vec{i}_{ee} = 0, \quad p\vec{\Psi}_{ii} - \vec{R}_{ii} \cdot \vec{i}_{ii} = 0, \quad (1)$$

де  $\vec{\varphi}_1 = (\varphi_{A1}, \varphi_{B1}, \varphi_{C1}, \varphi_{f1})$ ,  $\vec{\varphi}_2 = (\varphi_{A2}, \varphi_{B2}, \varphi_{C2}, \varphi_{f2})$  – вектори потенціалів у вузлах під'єднання;  $\vec{i}_{ee} = (i_a, i_b, i_c, i_f)$  – вектор струмів статора і обмотки збудження;  $\vec{i}_{ii} = (i_d, i_q)_t$  – вектор струмів внутрішніх контурів;  $\vec{\Psi}_{ee} = (\Psi_a, \Psi_b, \Psi_c, \Psi_f)$  – вектори потокозчеп-

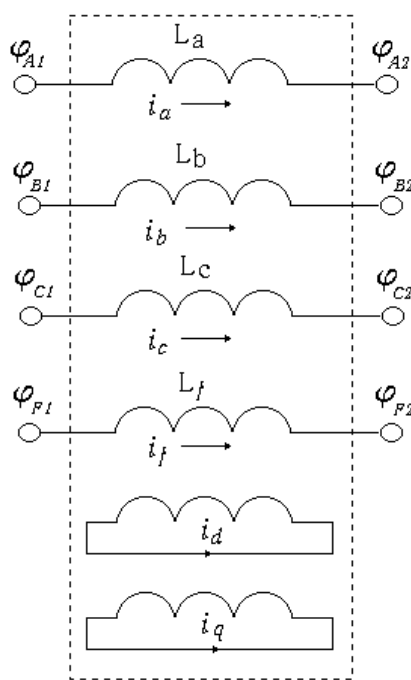


Рис. 4. Схема СМ

лень;  $\check{R}_{ee} = \text{diag}(r_A, r_B, r_C, r_f)$  – матриця активних опорів фазних обмоток і обмотки збудження;  $\check{R}_{ii} = \text{diag}(r_d, r_q)$  – матриця активних опорів демпферних обмоток.

Оскільки

$$\check{\Psi}_{ee} = \Psi_{ee}(\vec{i}_{ee}, \vec{i}_{ii}, \gamma), \quad \check{\Psi}_{ii} = \Psi_{ii}(\vec{i}_{ee}, \vec{i}_{ii}, \gamma),$$

тоді

$$\begin{aligned} p\check{\Psi}_{ee} &= \frac{\partial \check{\Psi}_{ee}}{\partial \vec{i}_{ee}} \cdot p\vec{i}_{ee} + \frac{\partial \check{\Psi}_{ee}}{\partial \vec{i}_{ii}} \cdot p\vec{i}_{ii} + \frac{\partial \check{\Psi}_{ee}}{\partial \gamma} \cdot p\gamma = \check{L}_{ee} \cdot p\vec{i}_{ee} + \check{L}_{ei} \cdot p\vec{i}_{ii} + \check{\Psi}_{ee}^\gamma \cdot p\gamma; \\ p\check{\Psi}_{ii} &= \frac{\partial \check{\Psi}_{ii}}{\partial \vec{i}_{ee}} \cdot p\vec{i}_{ee} + \frac{\partial \check{\Psi}_{ii}}{\partial \vec{i}_{ii}} \cdot p\vec{i}_{ii} + \frac{\partial \check{\Psi}_{ii}}{\partial \gamma} \cdot p\gamma = \check{L}_{ie} \cdot p\vec{i}_{ee} + \check{L}_{ii} \cdot p\vec{i}_{ii} + \check{\Psi}_{ii}^\gamma \cdot p\gamma. \end{aligned} \quad (2)$$

Коефіцієнти рівнянь системи (2) визначаються так:

$$\check{\Psi}_{ee}^\gamma = \check{L}_{ee}^\gamma \cdot \vec{i}_{ee} + \check{L}_{ei}^\gamma \cdot \vec{i}_{ii}, \quad \check{\Psi}_{ii}^\gamma = \check{L}_{ie}^\gamma \cdot \vec{i}_{ee}, \quad (3)$$

де  $\check{L}_{ee}^\gamma, \check{L}_{ei}^\gamma, \check{L}_{ie}^\gamma$  – похідні матриць  $\check{L}_{ee}, \check{L}_{ei}, \check{L}_{ie}$  за кутом повороту ротора;

$$\check{L}_{ee} = \begin{bmatrix} L_{AA} & L_{AB} & L_{AC} & L_{Af} \\ L_{BA} & L_{BB} & L_{BC} & L_{Bf} \\ L_{CA} & L_{CB} & L_{CC} & L_{Cf} \\ L_{fA} & L_{fB} & L_{fC} & L_{ff} \end{bmatrix}, \quad \check{L}_{ei} = \begin{bmatrix} L_{AD} & L_{BD} & L_{CD} & L_{fD} \\ L_{AQ} & L_{BQ} & L_{QD} & L_{fQ} \end{bmatrix}, \quad \check{L}_{ie} = \begin{bmatrix} L_{DA} & L_{DB} & L_{DC} & L_{Df} \\ L_{QA} & L_{QB} & L_{QC} & L_{Qf} \end{bmatrix}$$

$\check{L}_{ee}$  – матриця (4×4) взаємних і власних індуктивностей фазних обмоток статора та обмотки збудження, де діагональні елементи  $L_{AA}, L_{BB}, L_{CC}, L_{ff}$ , – власні індуктивності фазних обмоток і обмотки збудження, а всі інші – взаємні індуктивності відповідних обмоток;  $\check{L}_{ei}, \check{L}_{ie}$  – матриці взаємних індуктивностей демпферних обмоток та обмоток фаз статора і збудження машини;  $\check{L}_{ii} = (L_{dd}, L_{qq})$  – матриця власних індуктивностей демпферних обмоток.

Система рівнянь (1) після підстановки виразів з (2) матиме вигляд

$$\begin{aligned} \check{\Phi}_1 - \check{\Phi}_2 - \check{L}_{ee} \cdot p\vec{i}_{ee} - \check{L}_{ei} \cdot p\vec{i}_{ii} - \check{\Psi}_{ee}^\gamma \cdot p\gamma - \check{R}_{ee} \cdot \vec{i}_{ee} &= 0, \\ \check{L}_{ie} \cdot p\vec{i}_{ee} + \check{L}_{ii} \cdot p\vec{i}_{ii} + \check{\Psi}_{ii}^\gamma \cdot p\gamma + \check{R}_{ii} \cdot \vec{i}_{ii} &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Знайшовши з другого рівняння системи (4) вираз для  $p\vec{i}_{ii}$  і підставивши його в перше рівняння, отримаємо

$$\check{\Phi}_1 - \check{\Phi}_2 - (\check{L}_{ee} - \check{L}_{ei} \cdot \check{L}_{ii}^{-1} \cdot \check{L}_{ie}) \cdot p\vec{i}_{ee} - (\check{\Psi}_{ee}^\gamma \cdot p\gamma + \check{R}_{ee} \cdot \vec{i}_{ee} - \check{L}_{ei} \cdot \check{L}_{ii}^{-1} \cdot (\check{\Psi}_{ii}^\gamma \cdot p\gamma + \check{R}_{ii} \cdot \vec{i}_{ii})) = 0. \quad (5)$$

Враховуючи, що  $p\gamma = p_0\omega$ , де  $\gamma$  – кут повороту ротора в ел. град,  $p_0$  – кількість пар полюсів,  $\omega$  – кутова швидкість обертання ротора, та ввівши позначення

$$\begin{aligned} \check{L} &= \check{L}_{ee} - \check{L}_{ei} \cdot \check{L}_{ii}^{-1} \cdot \check{L}_{ie}, \\ \check{E} &= \check{\Psi}_{ee}^\gamma \cdot p\gamma + \check{R}_{ee} \cdot \vec{i}_{ee} - \check{L}_{ei} \cdot \check{L}_{ii}^{-1} \cdot (\check{\Psi}_{ii}^\gamma \cdot p\gamma + \check{R}_{ii} \cdot \vec{i}_{ii}), \end{aligned}$$

запишемо систему рівнянь (4) в такому вигляді:

$$\begin{aligned} \check{\Phi}_1 - \check{\Phi}_2 - \check{L} \cdot p\vec{i}_{ee} - \check{E} &= 0, \\ p\vec{i}_{ii} &= -\check{L}_{ii}^{-1} \cdot (\check{L}_{ie} \cdot p\vec{i}_{ee} + \check{\Psi}_{ii}^\gamma \cdot p_0\omega + \check{R}_{ii} \cdot \vec{i}_{ii}) \end{aligned} \quad (6)$$

Додавши до системи рівнянь (11) рівняння механічного стану

$$M + Mn = Jp\omega, \quad (7)$$

де  $M$  – електромагнітний момент машини,  $M_p$  – момент, прикладений до вала ротора,  $J$  – момент інерції ротора, одержимо математичну модель явнополюсної синхронної машини.

Модель електричної машини як структурного елемента схеми складається з зовнішнього вузлового рівняння вигляду

$$p\vec{i}_{CM} + \vec{G}_{CM} \cdot \vec{\Phi}_{CM} + \vec{C}_{CM} = 0 \quad (8)$$

і внутрішніх рівнянь, що дозволяють разом з (13) визначати вектор інтегрування  $p\vec{Y}_{CM}$ . Для даної моделі

$$\begin{aligned} \vec{i}_{CM} &= (\vec{i}_{ee}, -\vec{i}_{ee})_t, & \vec{\Phi}_{CM} &= (\vec{\Phi}_1, \vec{\Phi}_2)_t \\ \vec{G}_{CM} &= \begin{pmatrix} \vec{L}^{-1} & -\vec{L}^{-1} \\ -\vec{L}^{-1} & \vec{L}^{-1} \end{pmatrix} & \vec{C}_{CM} &= \begin{pmatrix} \vec{L}^{-1} \\ -\vec{L}^{-1} \end{pmatrix} \times \vec{E} \end{aligned}$$

Внутрішні рівняння мають вигляд, аналогічний другому рівнянню системи (6).

Математичні моделі трансформатора та вентильних груп описано в [3].

На рис. 5–16 показано результати досліджень процесів в системі збудження явнополюсного синхронного генератора (рис. 1) для режиму початкового збудження (вихід на номінальну напругу в режимі неробочого ходу при постійній швидкості обертання).

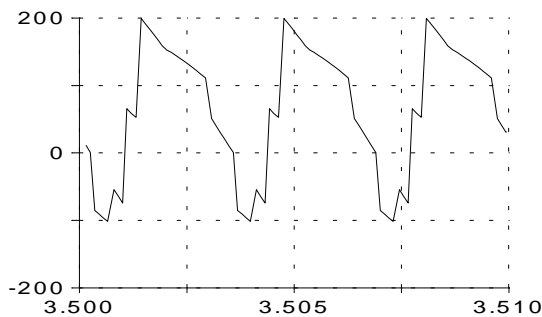


Рис. 5. Напруга збудження допоміжного генератора

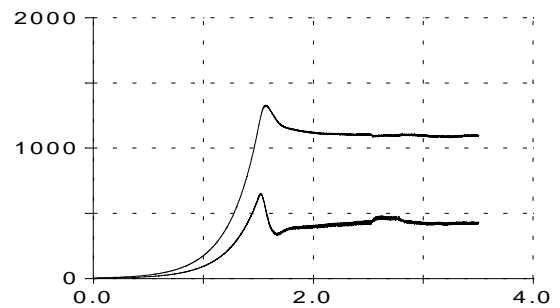


Рис. 6. Амплітуда напруги і струм збудження ДГ

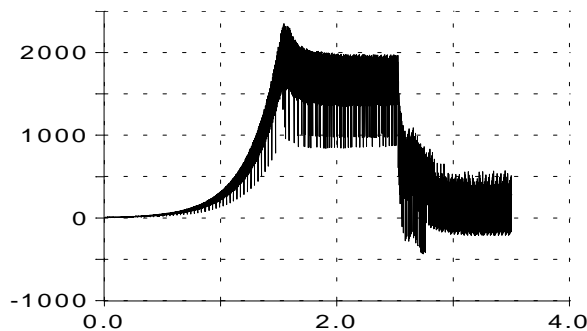


Рис. 7. Напруга на ОЗ генератора

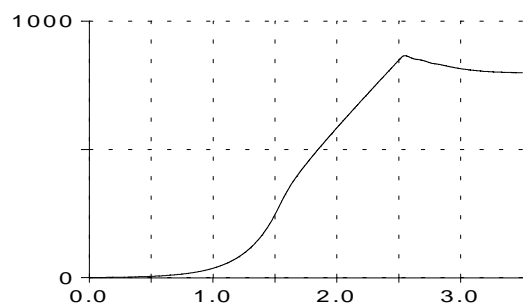


Рис. 8. Струм збудження генератора

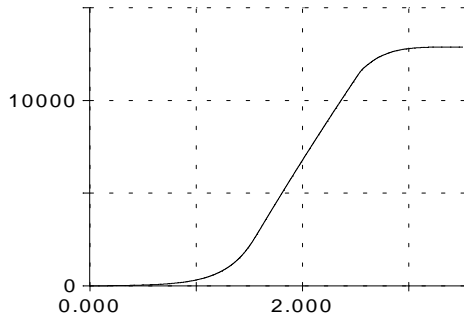


Рис. 9. Амплітуда напруги генератора

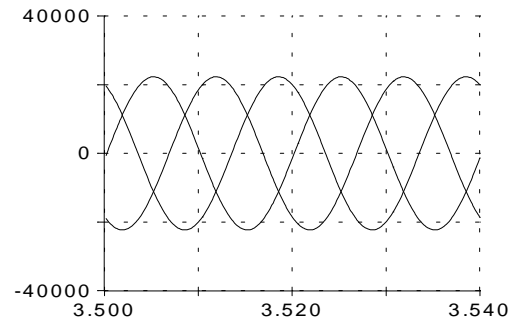


Рис. 10. Напруга генератора

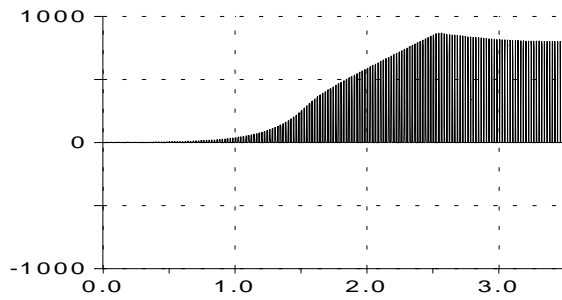


Рис. 11. Струм тиристора ФГ

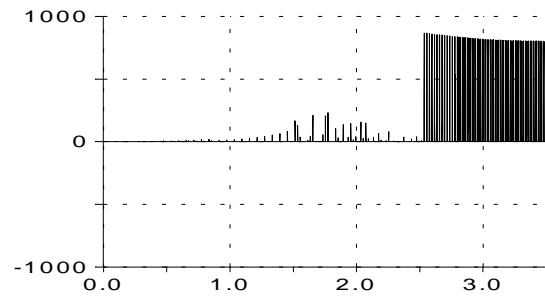


Рис. 12. Струм тиристора РГ

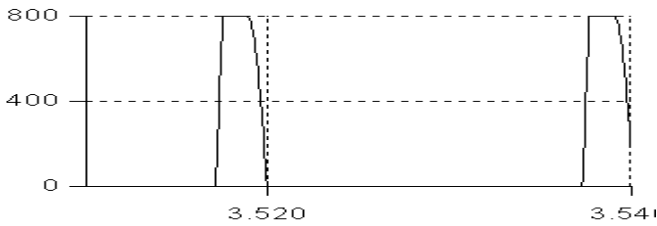


Рис. 13. Струм тиристора ФГ в усталеному режимі

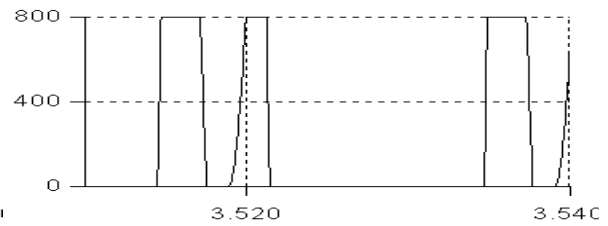


Рис. 14. Струм тиристора РГ в усталеному режимі

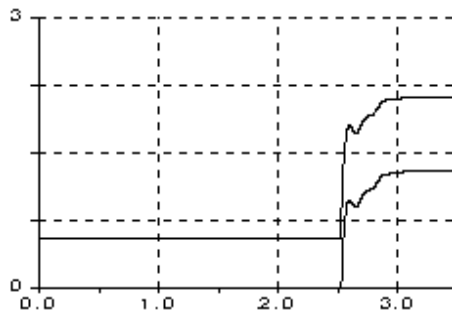


Рис. 15. Куті відкриття тиристорів РГ і ФГ

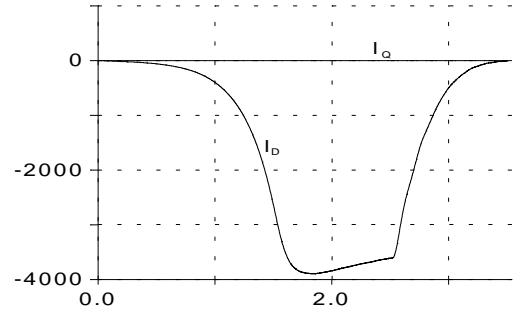


Рис. 16. Струм демпферної обмотки генератора

Кут відкриття вентилів форсуючої вентиляльної групи у всіх режимах роботи зміщений на кут  $55^{\circ}$  по відношенню до кута відкриття вентилів робочої вентиляльної групи (рис. 15). Тому в усталеному режимі роботи для номінального струму збудження синхронного генератора в режимі неробочого ходу спочатку відкривається вентиль робочої вентиляльної групи (рис. 11), а лише потім відповідний вентиль ФВГ (рис. 12). Після відкриття вентиля ФВГ, струм через вентиль РВГ зникає, оскільки форсуюча вентиляльна група живиться напругою, що в 3 рази перевищує напругу живлення робочої вентиляльної

групи. Після того, як струм через вентиль ФВГ зникає, знову відкривається вентиль РВГ. У результаті в усталеному режимі роботи навантаження несуть обидві вентильні групи. Під час початкового збудження синхронного генератора кут відкривання вентилів є малий (рис. 15) і напруга з виходу ФВГ запирає вентиля РВГ. Відповідно в цьому режимі, коли напруга генератора є значно меншою від заданої, працює лише ФВГ (рис. 11–12), яка забезпечує максимальне форсування за напругою збудження (рис. 7).

Як видно з рис. 8, під час початкового збудження синхронного генератора його струм збудження зростає і виходить на усталене значення з певним перерегулюванням. Однак, зважаючи на наявність демпферної обмотки в синхронному генераторі, напруга на виході генератора зростає до заданого значення без перерегулювання (рис. 9), оскільки перерегулювання струму збудження компенсується відповідною зміною струму демпферної обмотки по осі  $d$  (рис. 16). Струм демпферної обмотки по осі  $q$  близький до нуля, оскільки синхронна машина працює без навантаження.

Як показали результати досліджень, незважаючи на наявність тиристорних перетворювачів у системі збудження синхронного генератора, вихідна напруга останнього не зазнає спотворень (рис. 10), незважаючи на те, що обмотка збудження генератора живиться напругою із значними пульсаціями. Це пояснюється значними сталими часу обмотки збудження та демпферної обмотки синхронного генератора.

1. Юрганов А.А., Кожевников В.А. Регулирование возбуждения синхронных генераторов. – СПб., 1996. 2. Плахтина Е.Г. Математическое моделирование электромашинно – вентильных систем. – Львов, 1986. 3. Плахтина О.Г., Боднар Г.Й., Куцик А.С. Математичне моделювання перетворювача частоти з каскадним включенням інверторів // Вісн. ДУ “Львівська політехніка”. – 1998. – № 340. – С. 91–96.

УДК 621.314.223

Г.М. Лисяк, О.М. Равлик, В.Й. Іваноньків

Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра ЕМС,  
Західна електроенергетична система, СРЗА

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АВАРІЙНИХ РЕЖИМІВ В АВТОТРАНСФОРМАТОРАХ ПІДСТАНЦІЙ 750 кВ

© Лисяк Г.М., Равлик О. М., Іваноньків В.Й., 2002

**Розроблено математичні та цифрову моделі аналізу аварійних режимів в автотрансформаторах 750 кВ з поздовжньо-поперечним регулюванням для налагодження та перевірки функціонування систем їх захисту й автоматики.**

**Developed mathematical and digital models to analysis of malfunctions in avtotransformers 750 кV with longitudinal-transversal adjustment for adjusting and systems functioning verification of their protections and automations.**

Електрична мережа (ЕМ) 750 кВ відіграє важливу роль в електроенергетиці України. Від надійності її функціонування значною мірою залежить надійність функціонування всієї електроенергетичної системи України. Аварії в цій мережі, які з тієї чи іншої причини