

УДК 621.313.322

О. Г. Плахтина, А.С. Куцик, доктори техн. наук,  
Б. Бастіан

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СУДНОВОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

**Анотація.** *Описано математичну модель суднової електростанції, особливістю якої є врахування нелінійностей синхронних генераторів, взаємних впливів між ними та дискретності вентилів напівпровідникових перетворювачів. Представлено результати розрахунків електромагнітних процесів.*

Е. Г. Плахтина, А.С. Куцик, доктора техн. наук,  
Б. Бастіан

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СУДОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

**Аннотация.** *Описана математическая модель судовой электростанции, которая учитывает нелинейность синхронных генераторов, их взаимные влияния и дискретность вентилей полупроводниковых преобразователей. Приведены результаты исследований электромагнитных процессов.*

Е. G. Plahatina, A. S. Kucik, ScD,  
B. Bastian

## A MATHEMATICAL MODEL OF SHIP POWER

**Abstract.** *The mathematical model of ship's power station is presented, which takes into consideration the nonlinearity of the synchronous generators, the mutual influence of ones and discreteness of the semiconductor converters. The research results are presented.*

### Вступ. Постановка проблеми

Суднова електростанція є складною електротехнічною системою, що об'єднує джерела механічної енергії (переважно дизельні двигуни), генератори (переважно синхронні), що працюють на спільну електромережу, системи збудження генераторів з автоматичними регуляторами збудження. Разом з судною електромережею, розподільчими пристроями суднова електростанція формує суднову електроенергетичну систему.

Основним засобом керування генераторами є їх системи збудження, побудовані з застосуванням напівпровідникових перетворювачів.

До суднової електростанції висувають підвищені вимоги щодо її надійності та якості роботи. Ці вимоги обумовлюють необхідність проведення ґрунтовного аналізу процесів в суднової електростанції на етапі розробки схемотехнічних рішень, здійснення випробувань та діагностування систем збудження генераторів як на стадії їх впровадження, так і періодично в процесі експлуатації. Для цього в ряді випадків застосовують фізичні моделі суднової електроенергетичної системи [3]. Відзначаючи, загалом, практичну цінність таких моделей, слід відмітити їх основні недоліки: громіздкість, нездатність реалізувати весь спектр можливих режимів роботи електроенергетичної системи (зокрема – аварійних), складність параметричних змін для адаптації до різних типів систем збудження.

Цих недоліків позбавлені засоби цифрового (комп'ютерного) тестування, в яких замість моделей фізичних використовують моделі цифрові. Впровадження таких засобів вимагає, в свою чергу, розробки математичних та цифрових моделей, які були би адекватними для широкого діапазону режимів роботи,

© Плахтина О.Г., Куцик А.С., Бастіан Б., 2011

мали би підвищену швидкодію та числову стійкість, були би здатні тривало працювати в реальному часі у взаємодії з фізичними об'єктами.

### Фізична модель суднової електростанції

В Морській академії (м. Гдиня, Польща) в лабораторії суднової електроенергетики створено фізичну модель суднової електростанції [3], що використовується як для проведення наукових досліджень, так і для випробування реальних систем регулювання генераторів.

Дана модель містить три синхронні генератори (СГ), які приводяться в рух електроприводом за схемою "тиристорний перетворювач (ТП) – двигун постійного струму незалежного збудження". Система автоматичного регулювання електроприводу забезпечує формування механічних характеристик, ідентичних характеристикам дизельних приводних двигунів генераторів суднової електростанції (рис.1).

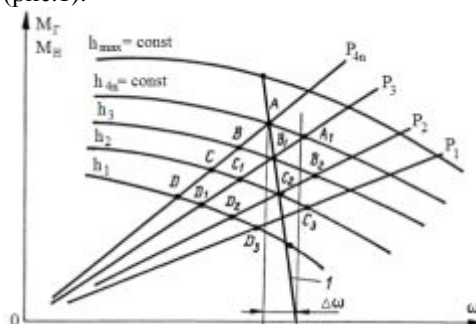


Рис.1. Характеристики рушія і навантаження

На рис.1 позначено:  $h_1 \dots h_{max}$  – характеристики рушія – дизель-двигуна (в фізичній моделі ці характеристики формуються електроприводом постійного струму з системою автоматичного регулювання швидкості), які відповідають різному по-

ложенню паливних засувок;  $P_1 \dots P_{4n}$  – характеристики навантаження для різних значень потужності.

Система регулювання швидкості дизель-двигуна забезпечує зміну положення паливних засувок (подачі палива) відповідно до зміни потужності навантаження, формуючи при цьому характеристику 1.

Фізична модель суднової електростанції дає можливість [3]:

- навантаження генераторів в діапазоні  $0 \div 1,5$  номінального при  $\cos\varphi = 0,3 \div 1,0$ ;
- стрибкоподібної симетричної зміни навантаження генератора в діапазоні  $0 \div 1,5$  номінального при  $\cos\varphi_{\text{інд.}} \leq 0,4$ ;
- регулювання напруги і швидкості генератора в межах  $0,9 \div 1,1$  номінальної;
- проведення ручної, напівавтоматичної та автоматичної синхронізації генераторів;
- реалізації двофазних і трифазних коротких замикань на виводах генератора, а також віддалених коротких замикань в мережі.

З метою розширення можливостей аналізу процесів в суднових електростанціях та діагностування їх систем керування розроблено математичний аналог моделі суднової електростанції, що описаний далі.

### Математична модель суднової електростанції

Для створення математичної моделі суднової електростанції використано числовий однокроковий метод середньокрокових напруг [1]. Як показали авторські дослідження, даний метод забезпечує вищу числову стійкість розрахунку у порівнянні з іншими відомими методами чисельного інтегрування, що дає змогу збільшити швидкодію комп'ютерних моделей і забезпечити їх тривалу роботу у взаємодії з фізичними об'єктами.

Згідно з методом середньокрокових напруг електричну вітку, що загалом містить активний опір  $R$ , індуктивність  $L$ , ємність  $C$  та е.р.с.  $E$ , представлено на рис.2.

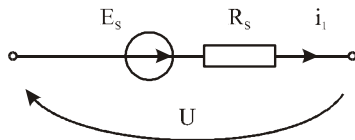


Рис.2. Вітка електричного кола

На цій схемі:  $R_S$  – кроковий опір вітки

$$R_S = \frac{R}{m+1} + \frac{\Delta t}{C(m+1)(m+2)} + \frac{L_1}{\Delta t}; \quad (1)$$

$E_S$  – крокова електрорушійна сила. Визначається початковими для кроку умовами

$$E_S = E - u_{R0} - u_{C0} + \left( \frac{R}{m+1} + \frac{\Delta t}{C} \cdot \frac{2 - (m+1)(m+2)}{2(m+1)(m+2)} + \frac{L_0}{\Delta t} \right) i_0 - \sum_{k=1}^{m-1} \left( \frac{R \Delta t^k}{(k+1)!} \cdot \frac{m-k}{m+1} + \frac{\Delta t^{k+1}}{C(k+2)!} \cdot \frac{(m+1)(m+2) - (k+1)(k+2)}{(m+1)(m+2)} \right) \frac{d^{(k)} i_0}{dt^{(k)}}; \quad (2)$$

де:  $m$  – порядок полінома, що описує криву струму в межах кроку інтегрування  $\Delta t$ ;  $u_R$ ,  $u_C$  – спад напруги на активному опорі та напруга на конденсаторі; індекс 1

– відповідає значенню змінної в кінці кроку, а 0 – значенню змінної на початку кроку.

З застосуванням згаданого методу створено моделі типових елементів електромашинувентильних систем (ЕМВС) (електричні машини, джерела живлення, вентильні групи і ін.), які представлені у вигляді багатополосників і цифрові моделі яких представлені як об'єкти згідно з принципами об'єктно-орієнтованого підходу. Модель ЕМВС формується з моделей елементів згідно з методом вузлових потенціалів, які в презентованому методі є середніми кроковими потенціалами (середніми значеннями потенціалів на кроці чисельного інтегрування).

Алгоритм формування моделі є наступним.

Математична модель кожного елемента як багатополосника представляється зовнішнім векторним рівнянням

$$\vec{i}_e + \vec{G}_{se} \vec{V}_e + \vec{C}_{se} = 0, \quad (3)$$

де  $\vec{V}_e = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} \vec{\phi}_e dt$  – вектор середніх на кроці значень потенціалів зовнішніх полюсів елемента-багатополосника;  $\vec{i}_e$  – вектор струмів зовнішніх віток (в кінці кроку чисельного інтегрування);  $\vec{G}_{se}$ ,  $\vec{C}_{se}$  – матриця коефіцієнтів та вектор вільних членів. Рівняння (3) отримується шляхом представлення розрахункової схеми елемента-багатополосника як сукупності віток згідно з рис. 1 і застосування виразів (1) і (2) до розрахункової схеми.

Під час формування моделей систем зовнішні вітки електричних багатополосників з'єднуються між собою у вузлах ЕМВС. Зв'язок між середньокроковими потенціалами зовнішніх полюсів багатополосника  $\vec{V}_e$  та середньокроковими потенціалами незалежних вузлів ЕМС  $\vec{V}_c$  представляється рівнянням

$$\vec{V}_e = \vec{\Pi}^T \vec{V}_c, \quad (4)$$

де  $\vec{\Pi}$  – матриця інциденції, яка визначає спосіб під'єднання зовнішніх віток елемента до незалежних вузлів ЕМВС.

Середньокрокові потенціали незалежних вузлів ЕМВС визначаємо з наступного векторного алгебраїчного рівняння

$$\vec{G}_{sc} \vec{V}_c + \vec{C}_{sc} = 0, \quad (5)$$

коефіцієнти якого визначаються на основі коефіцієнтів зовнішніх векторних рівнянь виду (3) всіх елементів, що входять до складу ЕМВС, та їх матриць інциденцій за формулами:  $\vec{G}_{sc} = \sum_{j=1}^L \vec{\Pi}_j \vec{G}_{sej} \vec{\Pi}_j^T$ ,

$\vec{C}_{sc} = \sum_{j=1}^L \vec{\Pi}_j \vec{C}_{sej}$  ( $L$  – кількість елементів у складі ЕМВС).

Після визначення з рівняння (5) середньокрокових потенціалів незалежних вузлів ЕМВС визначаємо з рівняння (4) середньокрокові потенціали

зовнішніх полюсів кожного елемента, а на їх основі з рівняння 3 визначаємо вектор струмів їх зовнішніх віток.

Розрахункова схема моделі силової частини суднової електростанції показана на рис.3, де позначено: АВГ, КВГ – анодні та катодні вентиляльні групи;  $\varphi_1 \dots \varphi_{12}$  – потенціали незалежних вузлів системи (їх середньокрокові значення формують вектор  $\vec{V}_c$  в рівнянні 5).

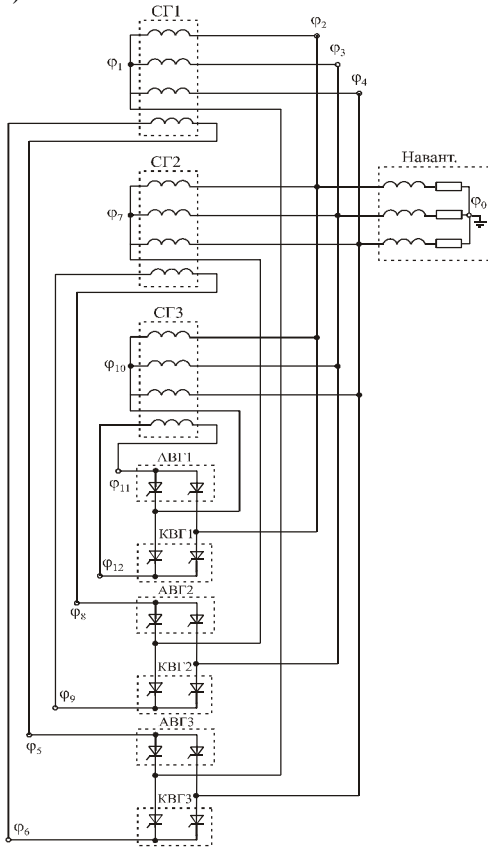


Рис.3. Розрахункова схема силової частини

Збудження СГ, що працюють на спільну мережу, здійснюється за схемою самозбудження, при чому ТП систем збудження живляться фазними напругами різних фаз мережі для симетрування навантаження.

Згідно зі згаданими принципами математичного моделювання електромашинувентильних систем математична модель системи формувалася з моделей її окремих структурних елементів, а саме: синхронних машин СГ; катодних та анодних вентиляльних груп (з них формувалися моделі тиристорних перетворювачів), навантаження.

В математичних моделях елементів суднової електростанції використано такі основні допущення:

математична модель синхронної машини побудована у фазних координатах і враховує нелінійність та вплив демпферної системи ротора (демперна система моделюється в dq-координатах). Детально модель синхронної машини описано в [2];

тиристори представляються ланками з активним опором та індуктивністю, значення яких визначаються станом вентиля (відкритий чи закритий). Момент відкриття вентиля визначається з логічних рівнянь,

що описують систему керування ТП; закриваються вентиля в момент переходу їх струмів через 0 з додатного у від'ємне значення (цей момент визначається шляхом інтерполяції).

Для регулювання напруги на виході генераторів застосовано ПІ-регулятор.

### Результати досліджень

Параметри неявнополюсного СГ, використані для досліджень такі:  $S_n = 27$  кВт,  $U_n = 400$  В,  $I_n = 39$  А,  $U_{fn} = 95$  В,  $I_{fn} = 5.7$  А,  $I_{fxx} = 2.75$  А,  $n_n = 1500$  об/хв,  $L_d = 0.032$  Гн,  $L_{ad} = 0.028$  Гн, індуктивність розсіювання обмотки збудження (приведена до статора) –  $L_{of} = 0.006$  Гн.

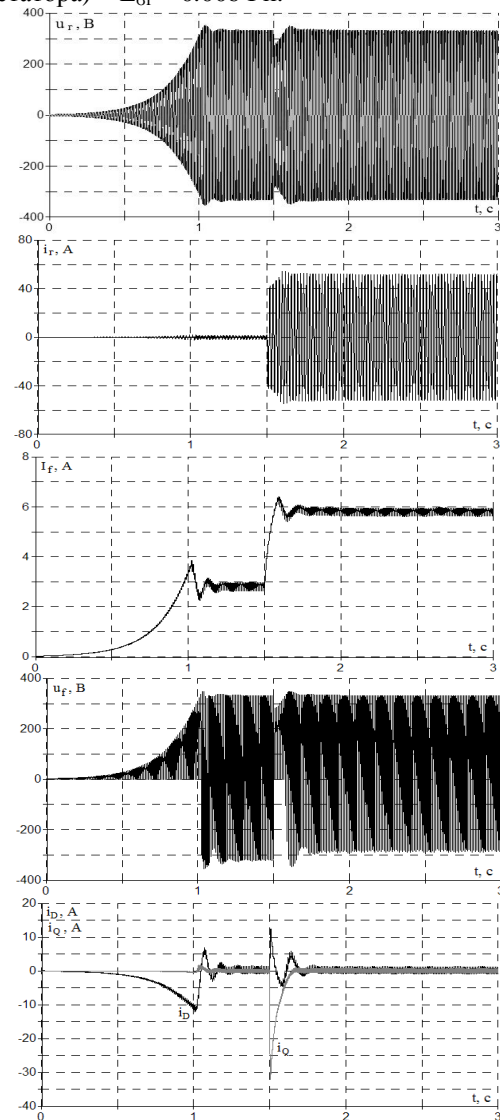


Рис.4. Результати розрахунку режимів початкового збудження і завантаження:  $u_r, i_r$  – фазні напруги та струм СГ;  $u_f, I_f$  – напруга та струм збудження СГ;  $i_d, i_q$  – струми демпферних контурів ротора в координатах d-q

Характер перехідного процесу при початковому збудженні СГ та його стрибкоподібним номінальним завантаженням визначається налаштуванням ПІ-регулятора напруги і, в цілому, є задовільним. Статична похибка регулювання напруги відсутня, динамічна похибка 4.5 % при початковому збу-

дженні і 9 % при стрибкоподібному накиді навантаження.

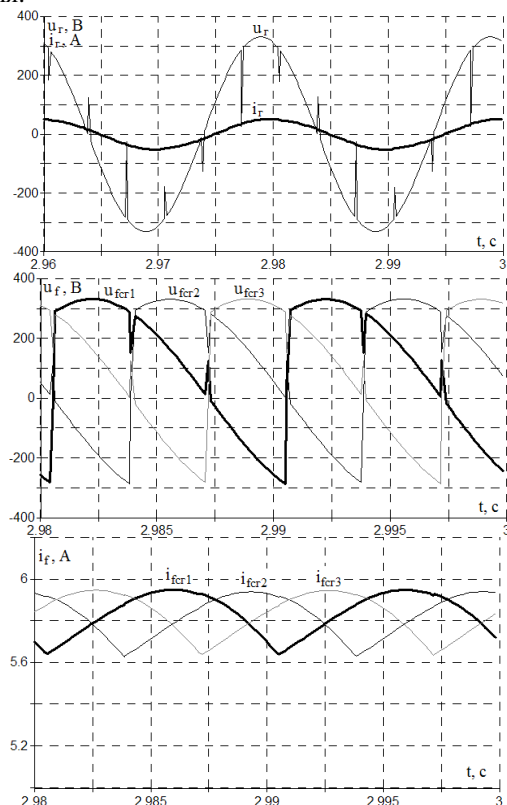


Рис.5. Результати розрахунку усталеного режиму роботи з номінальним навантаженням:  $u_{fcr1}$ ,  $u_{fcr2}$ ,  $u_{fcr3}$ ,  $i_{fcr1}$ ,  $i_{fcr2}$ ,  $i_{fcr3}$  – напруги та струми збудження СГ1, СГ2, СГ3

В номінальному режимі ТП працює з кутами відкривання вентилів близько 60 ел.град. При цьому система збудження забезпечує форсування за напругою збудження 3. Внаслідок того, що живлення обмотки збудження здійснюється однофазною схемою випрямлення, мають місце підвищені пульсації струму збудження (майже 6 %, рис.5). Через відсутність проміжних трансформаторів в системі збудження (ТП отримують живлення напряму від обмотки статора СГ) мають місце комутаційні спотворення напруги в електромережі (рис.5).

#### Висновки

Розроблена математична модель суднової електростанції враховує нелінійність синхронних машин, взаємні впливи між ними, дискретність вентилів тиристорних перетворювачів систем збудження, що робить її придатною для аналізу електромагнітних та електромеханічних процесів як в робочих, так і аварійних режимах.

Розроблена з застосуванням методу середньокрокових напруг згадана модель суднової електростанції характеризується високою швидкістю та числовою стійкістю, що розширює галузь її застосування. Зокрема, дана модель здатна працювати в реальному масштабі часу, що дає змогу застосувати її для тестування систем керування збудженням генераторів суднової електростанції на стадії їх впровадження, а також періодично під час експлуатації.

#### Список використаної літератури

1. Плахтина О.Г. “Числовий однокроковий метод аналізу електричних кіл і його застосування в задачах електромеханіки” / О.Г.Плахтина // Вісн. НТУ «Харківський політехнічний інститут». – 2008. – № 30. – С. 223-225.

2. Плахтина О.Г. Математичне моделювання електромеханічної системи з компенсацією реакції якоря синхронної машини з застосуванням авторського методу середньокрокових напруг / Плахтина О.Г., Куцик А.С., Семенюк М.Б. // Технічна електродинаміка. Тем.вип. Силова електроніка та енергоефективність. – Ч. 2. – К.:– 2010. – С. 201-206

3. Laboratorium elektroenergetyki okretowej. Zbiór dokumentacji. – Wyższa szkoła morska w Gdyni, Instytut elektroenergetyki okretowej. – 1989.

Отримано 06.07.2011



Плахтина  
Омелян Григорович,  
докт. техн. наук, проф.  
Гдинської Морської  
Академії,  
Akademia Morska,  
Morska 83, Gdynia,  
Polska, 81-225  
тел +48-601-672-425,  
plakht@utp.edu.pl



Куцик  
Андрій Степанович,  
докт. техн. наук, проф. каф.  
электроприводу Нац. ун-ту  
«Львівська політехніка»,  
вул. С. Бандери, 13, Львів,  
т. 032-258-2468,  
kutsyk@i.ua



Бастіан Бартоломій,  
магістр-інженер, асист.  
Гдинської Морської Академії,  
Morska 83, Gdynia,  
Polska, 81-225,  
тел. +48-500-309-659,  
Bartłomiej-bastian@wp.pl.