

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

В.І. Подимака, С.М. Новогрецький

**ПРОЕКТУВАННЯ АВТОМАТИЧНОГО
РЕГУЛЯТОРА ЗБУДЖЕННЯ СУДНОВОГО
СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА**

*Рекомендовано Методичною радою НУК
як методичні вказівки*

Миколаїв 2007

Подимака В.І., Новогрецький С.М. Проектування автоматичного регулятора збудження суднового синхронного генератора: Методичні вказівки. – Миколаїв: НУК, 2007. – 48 с.

Кафедра суднових електроенергетичних систем

Викладено короткі теоретичні відомості з питань проектування автоматичних регуляторів збудження суднових синхронних генераторів. Дано методику розрахунку системи автоматичного регулювання збудження синхронних машин на основі прямого фазового компаундування з трьохобмотковим трансформатором. Розглянуті методики аналізу статичної стійкості роботи синхронного генератора як на потужну мережу, так і на навантаження з урахуванням дії автоматичного регулятора збудження.

Призначено для студентів інституту автоматики і електротехніки НУК.

Рецензенти: д-р техн. наук., проф. А.А. Ставинський
канд. техн. наук, доцент Е.А. Швець

Згідно з наказом № 110 від 25.04.07 "методичні вказівки публікуються в авторській редакції, і відповідальність за їх редагування несе автор".

1. Загальні відомості по системах автоматичного регулювання напруги суднових синхронних генераторів

Створення надійної, якісної електроенергетичної системи неможливе без застосування надійних, точних та швидкодіючих регуляторів. Напруга мережі залежить від таких основних чинників, як струм збудження, характер та величина навантаження, швидкість обертання первинного двигуна синхронного генератора. Відхилення напруги від номінального значення впливає негативно на роботу електрообладнання, а отже, і на економічність роботи електроенергетичної системи.

Зниження напруги призводить до зменшення швидкості обертання електродвигунів, насосів, вентиляторів та значного зниження їх продуктивності, порушення нормального режиму роботи агрегатів системи. Крім того, зниження напруги призводить до зменшення коефіцієнта корисної дії електродвигунів.

Отже, підтримання постійної напруги в електроенергетичній системі основна вимога нормальної роботи споживачів електроенергії.

Система автоматичного регулювання напруги (САРН) являє собою динамічну систему, що складається з об'єкта регулювання – синхронного генератора й автоматичного керуючого пристрою – автоматичного регулятора збудження (АРЗ), що взаємодіють між собою.

Регульованою (керованою) величиною САРН є напруга генератора, керуючою (регулюючою) величиною – напруга або струм збудження генератора. Основний зовнішній вплив на генератор і його вихідну напругу чинять струм навантаження і фаза струму навантаження генератора.

За принципом керування всі САРН поділяються на наступні типи:

– діючі по збудуванню;

- діючі по відхиленню регульованої величини;
- комбіновані системи, що діють одночасно по збудуванню і відхиленню.

До якості роботи САРН і синхронних генераторів, що використовуються в суднових електроенергетичних системах, пред'являються певні вимоги. Найбільш значимі з них наступні:

- кожен генератор повинен мати окремий незалежний АРЗ;
- генератори повинні мати достатній резерв збудження для підтримки протягом двох хвилин номінальної напруги з точністю 10% при перевантаженні генератора струмом, рівним 150% номінального, з коефіцієнтом потужності 0,6;
- САРН повинно забезпечувати підтримку напруги в межах номінального значення при зміні навантаження з номінальним коефіцієнтом потужності від нуля до номінальної;
- різка зміна симетричного навантаження генератора, що працює на номінальній частоті обертання і при номінальній напрузі, не повинне викликати зниження напруги нижче 85% і підвищення вище 120% від номінального значення;
- після закінчення перехідного процесу напруга генератора повинна відновитися не більш ніж за 1,5 секунди з відхиленням від номінального значення в межах $\pm 5\%$ (у випадку відсутності точних даних про максимальне різке навантаження, що підключається до генератора, допускається аналіз ситуації підключення при роботі на холостому ході і подальшому відключенні 60% номінального навантаження з індуктивним коефіцієнтом потужності 0,4);
- відхилення від синусоїдальної форми напруги не повинне бути більше 5% від пікового значення основної гармоніки.

2. Система автоматичного регулювання збудження синхронних генераторів типу МСК

Для генераторів типу МСК застосовується система фазового компаундування з коректором напруги (рис. 1). Основним елементом системи є трансформатор фазового компаундування ТФК із магнітним шунтом. Трансформатор має п'ять обмоток: струмову $w_{\text{ст}}$, напруги $w_{\text{н}}$, сумуючу $w_{\text{с}}$, живлення коректора напруги $w_{\text{кн}}$ і додаткову $w_{\text{дод}}$. Сумуюча обмотка $w_{\text{с}}$ здійснює живлення збудження генератора. Додаткова обмотка $w_{\text{дод}}$ застосовується для живлення конденсаторів і дроселя відбору ДВ.

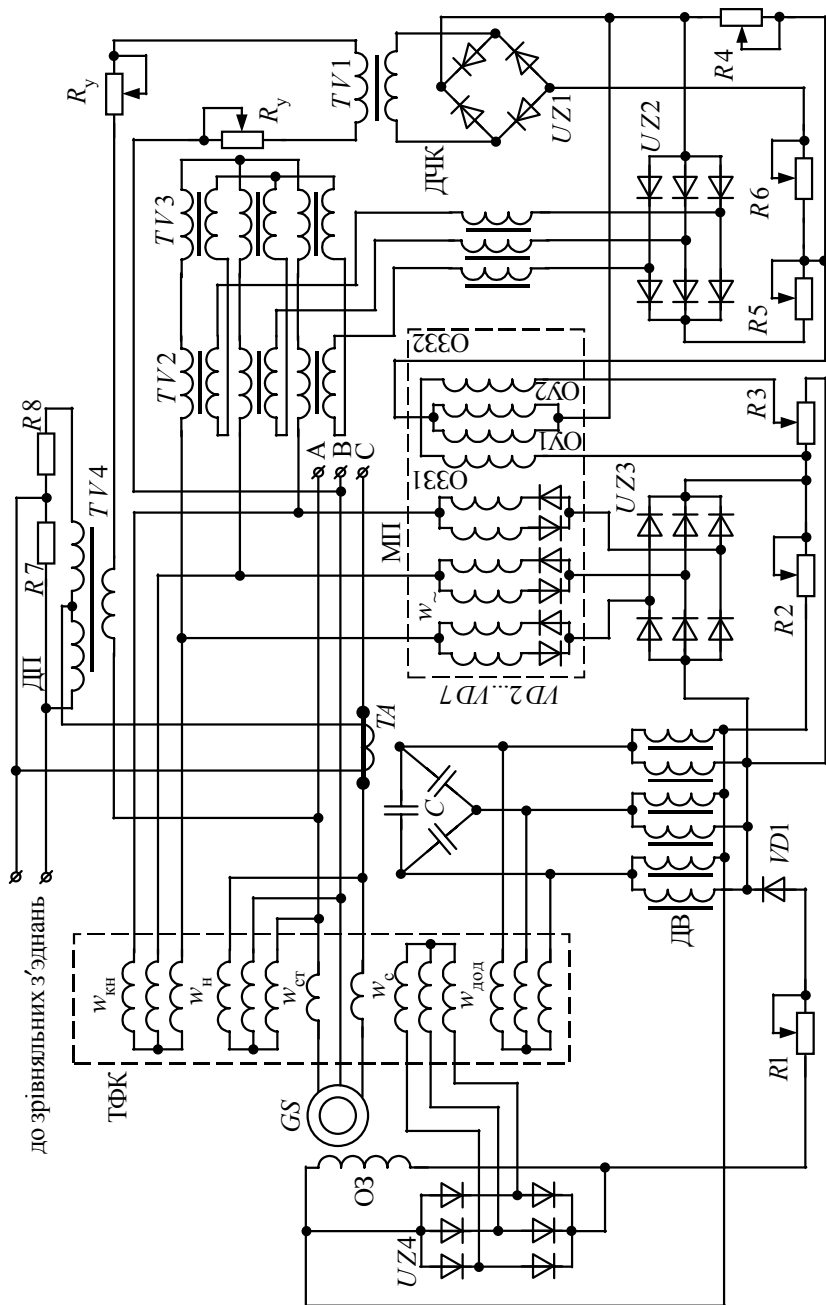


Рис. 1

Початкове збудження генератора здійснюється від залишкової напруги за допомогою резонансного контуру, що складається з ємнісного опору конденсаторів C і індуктивного опору, зумовленого магнітним шунтом трансформатора ТФК. Контур налаштований на резонанс при частоті 70...80 % від номінального значення. При досягненні резонансної частоти в процесі збільшення швидкості обертання ротора генератора струм у резонансному контурі, а отже і в обмотці $w_{\text{дод}}$, різко зростає. Опори обмоток $w_{\text{дод}}$, $w_{\text{н}}$ трансформатора ТФК обираються таким чином, щоб струм обмотки збудження був достатній для початкового самозбудження генератора при залишковій напрузі генератора 0,8...1,1% від номінального.

Спочатку процес самозбудження визначається характеристикою холостого ходу і характеристикою самозбудження генератора. В міру наближення напруги якоря до номінального значення в дію вступає коректор напруги, і при наявності ЕРС, індуктованій в обмотці $w_{\text{кн}}$, процес самозбудження генератора закінчується.

Автоматичне регулювання збудження має місце в результаті дії фазового компаундування, тобто геометричного підсумовування магніто-рушійних сил струмової обмотки $w_{\text{ст}}$ і обмотки напруги трансформатора ТФК, що залежить від величини і коефіцієнта потужності навантаження. Керування фазовим компаундуванням при зміні напруги здійснюється коректором напруги, що складається з вимірювального органа, дроселя відбору ДВ і додаткової обмотки $w_{\text{дод}}$.

У вимірювальний орган входить лінійний елемент – випрямляч UZ_1 і лінійний трансформатор TV_1 , струм виходу якого $I_{\text{л.е}}$ пропорційний напрузі генератора $U_{\text{г}}$. Первинна обмотка трансформатора включена на затискачі генератора через установлюючий опір R_y і додатковий пристрій ДП. Нелінійний елемент вимірювального органа утворений з нелінійного TV_3 і лінійного TV_2 трансформаторів з випрямлячем UZ_2 . Таке з'єднання

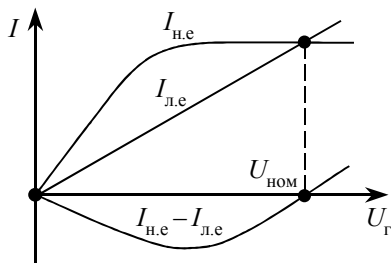


Рис. 2

дозволяє отримати вихідний струм нелінійного елемента $I_{\text{н.е}}$ практично постійним у досить широких межах зміни напруги генератора (рис. 2). Вихідні струми лінійного і нелінійного елементів електрично віднімаються в обмотках управління ОУ1, ОУ2 магнітного підсилювача, за рахунок чого змінюється індуктивний опір робочих обмоток.

Якщо напруга на затискачах генератора стане меншою від заданої, то струм керування магнітного підсилювача збільшиться, його результуючий магнітний потік зменшиться і, отже, зменшиться опір робочих обмоток $w_{\sim}$. Струм виходу магнітного підсилювача, що керує дроселем ДВ, зменшиться, опір робочих обмоток дроселя зросте. Це приведе до зниження струму в обмотці $w_{\text{дод}}$ трансформатора ТФК і до зростання струму збудження генератора. Напруга на затискачах генератора відновиться. При збільшенні напруги процес регулювання проходить у зворотному порядку.

Обмотки ОЗ31, ОЗ32 магнітного підсилювача МП створюють негативний зворотний зв'язок по струму виходу коректора, а також по напрузі ротора (випрямляч дроселя $VD1$ і опір $R1$), забезпечуючи стійку роботу системи. Ручне коригування напруги генератора (задання уставки напруги) виконується зміною величини опору R_y , включеного в первинне коло лінійного трансформатора $TV1$ вимірювального органа. Опір R_y дозволяє регулювати вихідну напругу в межах $\pm 5\%$ від номінальної.

Для підтримки сталості напруги генератора при зміні частоти в коло нелінійного елемента включений дросель частотної компенсації ДЧК.

За допомогою додаткового пристрою ДП досягається розподіл реактивних навантажень при паралельній роботі генераторів. До складу цього пристрою входять трансформатор струму TA , ділительний трансформатор $TV4$, опори $R7$ і $R8$.

При роздільній роботі генераторів струм вторинної обмотки трансформатора струму TA поділяється на дві рівні частини ($I_T/2$). При цьому магніторушійні сили, що створюються струмами $I_T/2$ в двох частинах первинної обмотки трансформатора $TV4$, рівні і спрямовані зустрічно та не здійснюють впливу на вихідну напругу генератора. Зміною співвідношення опорів $R7$ і $R8$ можна одержати статичну зовнішню характеристику генератора.

При паралельній роботі генераторів додаткові пристрої з'єднуються між собою зрівняльними проводами.

Якщо реактивна потужність рівномірно розподіляється між генераторами, то падіння напруги на опорах $R7$ і $R8$ рівні й у зрівняльних з'єднаннях струм відсутній. Порушення рівномірного розподілу реактивного навантаження між генераторами викликає нерівність падінь напруги на опорах $R7$ і $R8$ та протікання струму в зрівняльних з'єднаннях. При цьому порушиться також рівність магніторушійних сил у первинних обмотках ділительних трансформаторів. У їхніх вторинних обмотках з'явиться на-

пруга, що буде змінювати напругу на вході трансформатора лінійного кола. На вході лінійного елемента генератора з відносно великим реактивним навантаженням напруга збільшиться, а на вході лінійного елемента генератора з відносно малим реактивним навантаженням зменшиться. Вимірювальний орган коректора напруги сприйме цю зміну напруги і подасть сигнал на зменшення струму збудження генератора з більшим реактивним навантаженням і на збільшення струму збудження генератора з меншим реактивним навантаженням. Відбудеться вирівнювання реактивних потужностей, струм у зрівняльних з'єднаннях припиниться і наступить баланс магніторушійних сил у первинних обмотках ділильних трансформаторів. В зв'язку з тим, що трансформатор струму *TA* включений в одну фазу, а лінійний елемент у дві інші, вимірювальний орган реагує на зміну реактивного навантаження генератора.

У випадку автономної роботи генератора, якщо опір $R8$ менше опору $R7$, то при збільшенні навантаження напруга на генераторі зменшиться, тобто генератор буде працювати зі статизмом. Найбільший статизм (3%) може бути досягнутий при $R8 = 0$.

Схема фазового компаундування забезпечує точність підтримки напруги не вище $\pm 3\%$ ($\pm 1\%$ при включеному коректорі напруги).

3. Розрахунок системи фазового компаундування без коректора напруги

3.1. Теоретичне обґрунтування

Системи фазового компаундування з трьохобмотковими трансформаторами за принципом дії розрізняються досить незначно. Тому в даній роботі представлена методика розрахунку системи фазового компаундування (ФК) типу ЛЕТИ.

Система ФК типу ЛЕТИ показана на рис.3. Беручи до уваги, що ця система є симетричним трифазним колом, при її аналізі досить обмежитись однією фазою. Розрахункова схема заміщення даної системи зображена на рис.4. На схемі позначені: ОН – обмотка напруги з числом витків w_1 ; ОС – струмова обмотка з числом витків w_3 ; РО – робоча обмотка з числом витків w_2 .

Розмір пульсацій напруги на виході випрямляча при використанні трифазної мостової схеми не перевищує 4,2 % [2], тому можна знехтувати проявами індуктивності в колі навантаження і вважати, що робоча

обмотка навантажена на один активний опір. У розрахунковій схемі R_3 – опір навантаження з урахуванням втрат у випрямлячі, приведений до однієї фази робочої обмотки.

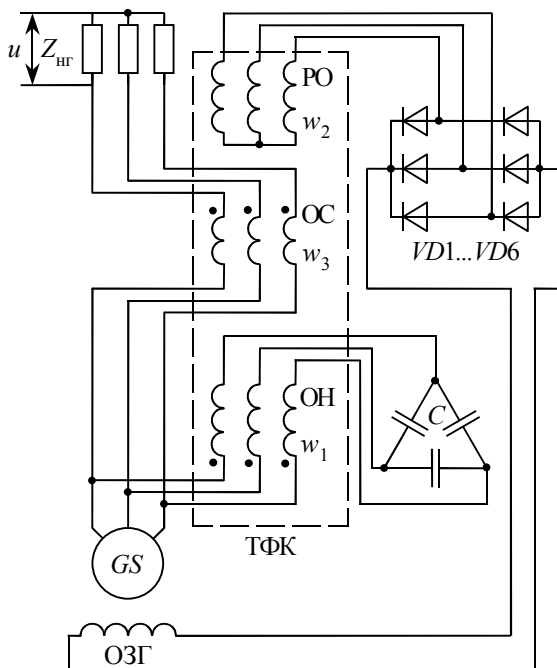


Рис. 3

Процеси, що протікають у трьохобмотковому трансформаторі, еквівалентна схема якого представлена на рис. 4, описуються наступною системою рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} w_1 i_1 + w_2 i_2 - w_3 i_3 &= w_1 i_{\mu}; \\ u_r &= r_1 i_1 + \frac{1}{C} \int_0^t i \, dt + L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt} - M_{13} \frac{di_3}{dt}; \\ 0 &= (r_2 + R_3) i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M_{21} \frac{di_1}{dt} - M_{23} \frac{di_3}{dt}; \\ u_r &= r_3 i_3 + L_3 \frac{di_3}{dt} - M_{31} \frac{di_1}{dt} - M_{32} \frac{di_2}{dt} + u, \end{aligned} \right\}$$

де i_μ – намагнічуючий струм трансформатора; L_1, L_2, L_3 – індуктивності обмоток трансформатора; $M_{12} = M_{21}, M_{13} = M_{31}, M_{23} = M_{32}$ – коефіцієнти взаємодуції відповідних обмоток; u – напруга на навантаженні генератора.

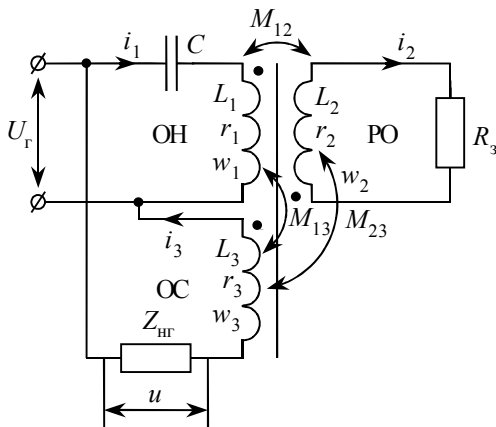


Рис. 4

Наведена система рівнянь не може бути використана для визначення параметрів системи ФК, тому що її індуктивності, коефіцієнти взаємодуції, а також активні опори є функціями багатьох перемінних і можуть бути знайдені після детальних конструкторських проробок трансформатора.

Зневажаючи потоками розсіювання й активними втратами у магнітопроводі, видозмінимо розрахункову схему, представивши коло намагнічуючого струму у вигляді ідеальної L_μ індуктивності. При цьому будемо вважати, що намагнічуючий струм протікає тільки в колі обмотки напруги. Перетворена схема зображена на рис.5.

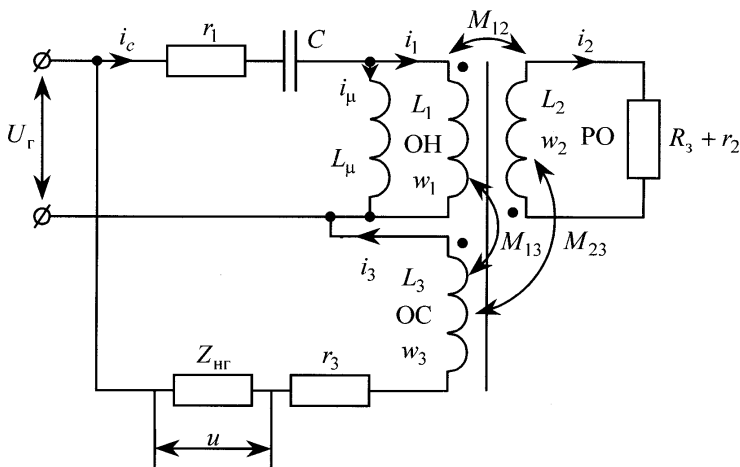


Рис. 5

Якщо e_2 – ЕРС фази робочої обмотки, то $e_1 = k_{12}e_2$ – ЕРС фази ОН і $e_3 = k_{32}e_2$ – ЕРС фази ОС, де $k_{12} = w_1/w_2$; $k_{32} = w_3/w_2$ – відповідні коефіцієнти трансформації. З урахуванням прийнятих припущень вихідна система рівнянь переписеться таким чином:

$$\left. \begin{aligned} w_1 i_1 + w_2 i_2 - w_3 i_3 &= 0; \\ e_2 &= (r_2 + R_3) i_2; \\ u_r &= \frac{1}{C} \int_0^t i_c dt - k_{12} e_2 + r_1 i_c; \\ u_a &= u + k_{32} e_2 + r_3 i_3; \\ L_\mu \frac{di_\mu}{dt} &= -k_{12} e_2; \quad i_c = i_1 + i_\mu. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Система рівнянь (1) є нелінійною. Це визначається нелінійністю вольтамперної характеристики кола збудження генератора, тобто залежністю опору R_3 від струму i_2 . Інші параметри системи (1) можна вважати постійними, тому що для забезпечення достатнього форсування струму збудження магнітопровід трансформатора повинний бути ненасиченим.

Внаслідок нелінійності R_3 напруги і струми в деяких режимах роботи ТФК при синусоїдальній напрузі на вході можуть бути несинусоїдальними. Тому строгий математичний аналіз отриманих рівнянь являє собою значні труднощі. Однак задача істотно спрощується при заміні несинусоїдальних періодичних величин еквівалентними синусоїдами, а реальних параметрів – еквівалентними. Це дає можливість представити отримані рівняння в символьній формі.

Рівняння системи (1) у символічній формі мають вигляд:

$$\left. \begin{aligned} w_1 \dot{I}_1 + w_2 \dot{I}_2 - w_3 \dot{I}_3 &= 0; \\ \dot{E}_2 &= (R_3 + r_2) \dot{I}_2; \\ \dot{U}_r &= (r_1 - jx_c) \dot{I}_c - k_{12} \dot{E}_2; \\ \dot{U}_r &= \dot{U} + k_{32} \dot{E}_2 + r_3 \dot{I}; \\ jx_\mu \dot{I}_\mu &= -k_{12} \dot{E}_2; \quad \dot{I}_c = \dot{I}_1 + \dot{I}_\mu. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Вирішуючи систему рівнянь (2) щодо струму $\dot{I}_2$ у функції напруги на навантаженні $\dot{U}$ і струму навантаження $\dot{I}$, одержуємо

$$\dot{I}_2 = \frac{-k_{12} \dot{U} + [k_{32}(r_1 - jx_c) - k_{12} r_3] \dot{I}}{r_1 - jx_c - ja k_{12}^2 \frac{r_1}{x_c} (R_3 + r_2) + k_{12} (k_{12} - a k_{12} + k_{32})(R_3 + r_2)},$$

де $a = x_c / x_\mu$.

Введемо позначення:

$$\begin{aligned} r_1 - jx_c &= Z_1 = z_1 \varepsilon^{-j\varphi_1}; \quad \varphi_1 = \arctg \frac{x_c}{r_1}; \quad Z_{\text{сист}} = z_{\text{сист}} \varepsilon^{-j\delta'} = \\ &= Z_1 + k_{12} (k_{12} - a k_{12} + k_{32})(R_3 + r_2) - ja k_{12}^2 \frac{r_1}{x_c} (R_3 + r_2), \end{aligned}$$

$$\text{де } z_{\text{сист}} = \sqrt{[r_1 + k_{12} (k_{12} - a k_{12} + k_{32})(R_3 + r_2)]^2 + \left[a k_{12}^2 \frac{r_1}{x_c} (R_3 + r_2) + x_c \right]^2};$$

$$\delta' = \arctg \frac{a k_{12}^2 (r_1 / x_c)(R_3 + r_2) + x_c}{r_1 + k_{12} (k_{12} - a k_{12} + k_{32})(R_3 + r_2)}.$$

У цьому випадку вираз для струму $\dot{I}_2$ можна представити у виді

$$\begin{aligned} \dot{I}_2 &= -\frac{k_{12}}{Z_{\text{сист}}} \dot{U} + \frac{k_{32} Z_1}{Z_{\text{сист}}} \dot{I} - k_{12} \frac{r_3}{Z_{\text{сист}}} \dot{I} = \\ &= I_{2\text{xx}} \varepsilon^{j(\alpha_u + \delta' - 180^\circ)} + I'_{2\kappa} \varepsilon^{j(\alpha_u - \varphi - \varphi_1 + \delta')} + I''_{2\kappa} \varepsilon^{j(\alpha_u - \varphi + \delta' - 180^\circ)}. \end{aligned} \quad (3)$$

З формули (3) видно, що струм робочої обмотки є геометричною сумою трьох складових, одна з яких

$$\dot{I}_{2\text{xx}} = I_{2\text{xx}} \varepsilon^{j(\alpha_u + \delta' - 180^\circ)} = \frac{k_{12}}{Z_{\text{сист}}} U \varepsilon^{j(\alpha_u + \delta' - 180^\circ)}$$

пропорційна напрузі на навантаженні і визначає струм робочої обмотки в режимі холостого ходу генератора, а дві інших –

$$\begin{aligned} \dot{I}'_{2\kappa} &= I'_{2\kappa} \varepsilon^{j(\alpha_u - \varphi - \varphi_1 + \delta')} = \frac{k_{32} Z_1}{Z_{\text{сист}}} I \varepsilon^{j(\alpha_u - \varphi - \varphi_1 + \delta')}, \\ \dot{I}''_{2\kappa} &= I''_{2\kappa} \varepsilon^{j(\alpha_u - \varphi + \delta' - 180^\circ)} = \frac{k_{12} r_3}{Z_{\text{сист}}} I \varepsilon^{j(\alpha_u - \varphi + \delta' - 180^\circ)} \end{aligned}$$

– компаундуючі складові струму робочої обмотки ТФК, пропорційні струму навантаження генератора.

Отримані співвідношення можна поширити на всі системи АРЗ, що містять ТФК.

Зокрема, у системі АРЗ ЛЕТІ трансформатор виконується без зазору, отже, $x_\mu \gg x_c$. Тому, не припускаючись значної похибки, можна вважати $a = 0$. Тоді

$$i_2 = \frac{-k_{12}\dot{U} + k_{32}(r_1 - jx_c)\dot{I} - k_{12}r_3\dot{I}}{r_1 - jx_c + k_{12}(k_{12} + k_{32})(R_3 + r_2)},$$

$$\text{або } I_2 = I_{2xx}e^{j(\alpha_u + \delta' - 180^\circ)} + I'_{2\kappa}e^{j(\alpha_u - \varphi - \varphi_1 + \delta')} + I''_{2\kappa}e^{j(\alpha_u - \varphi + \delta' - 180^\circ)},$$

$$\text{де } I_{2xx} = \frac{k_{12}}{z_{\text{сист}}}U; \quad I'_{2\kappa} = \frac{k_{32}z_1}{z_{\text{сист}}}I; \quad I''_{2\kappa} = \frac{k_{12}r_3}{z_{\text{сист}}}I; \quad \varphi_1 = \arctg \frac{x_c}{r_1};$$

$$z_{\text{сист}} = \sqrt{[r_1 + k_{12}(k_{12} + k_{32})(R_3 + r_2)]^2 + x_c^2};$$

$$\delta' = \arctg \frac{x_c}{r_1 + k_{12}(k_{12} + k_{32})(R_3 + r_2)}.$$

Напруга на затисках генератора визначається по формулі

$$\dot{U}_\Gamma = \dot{U} + k_{32}(R_3 + r_2)\dot{I}_2 + r_3\dot{I}.$$

У пристроях АРЗ, що містять ТФК із повітряним зазором, $a = x_c/x_\mu \neq 0$. При малих значеннях струму I_2 опір кола збудження через наявність нелінійних опорів (у першу чергу таких, як перехід щітка – контактне кільце) може в кілька разів перевищувати величину, що відповідає нормальному режимові роботи системи. Ця обставина несприятливо позначається на протіканні процесу самозбудження, тому що з ростом R_3 збільшується $z_{\text{сист}}$. Якщо при цьому $z_{\text{сист}}$ перевищить деяку критичну величину, самозбудження генератора, як відомо, стає неможливим.

Для забезпечення самозбудження доцільно використовувати залежність $z_{\text{сист}}$ від a , підібравши останній параметр такої величини, щоб $z_{\text{сист}}$ із збільшенням опору R_3 або зовсім не змінювався, або збільшувався незначно, або щоб $z_{\text{сист}}$ був мінімальним. Для реалізації остан-

ньої умови досить знайти мінімум функції $z_{\text{сист}} = z_{\text{сист}}(a)$, вирішивши рівняння

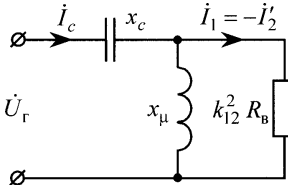
$$\frac{d z_{\text{сист}}(a)}{da} = 0. \quad (4)$$

З аналізу рівняння (4) випливає, що при

$$a_{\text{опт}} = \frac{(k_{12} + k_{32})x_c^2}{k_{12}(r_1^2 + x_c^2)}.$$

Умову повної інваріантості струму I_2 від опору R_3 можна одержати, якщо знехтувати активним опором обмотки напруги r_1 . У цьому випадку в режимі холостого ходу генератора схема заміщення ТФК може бути представлена у виді рис.6.

Якщо при цьому $x_c = x_\mu$, то одержуємо відому схему Бушера [4], в якій струм $-I'_2$ не залежить від опору навантаження $k_{12}^2 R_3$. Дійсно, для струму $-I'_2$ зі схеми рис.6 маємо



$$i_1 = -i'_2 = \frac{j x_\mu \dot{U}_\Gamma}{x_c x_\mu + j k_{12}^2 R_3 (x_\mu - x_c)};$$

Рис. 6

при $x_c = x_\mu$
$$i_1 = -i'_2 = \frac{\dot{U}_\Gamma}{-j x_c},$$

тобто струм у колі збудження не залежить від R_3 .

Таким чином, умовою інваріантості струму I_2 від опору R_3 буде $x_c = x_\mu$ або $a'_{\text{опт}} = x_c / x_\mu = 1$.

3.2. Розрахункові формули, що зв'язують основні параметри

З метою спрощення виводу розрахункових формул по визначенню параметрів надалі не будемо враховувати активний опір обмоток трансформатора через їхню малість, а також приймаємо $\dot{U}_\Gamma = \dot{U}$. Тоді рівняння для струму робочої обмотки трансформатора приймає вид

$$i_2 = \frac{-k_{12} \dot{U}_\Gamma - k_{32} j x_c \dot{I}}{k_{12}^2 (1-a) R_3 - j x_c} = I_{2\text{xx}} \epsilon^{j(\alpha_u + \delta' - 180^\circ)} + I_{2\text{к}} \epsilon^{j(\alpha_u + \delta' - \varphi - 90^\circ)}, \quad (5)$$

$$\text{де } I_{2\text{xx}} = \frac{k_{12}}{z_{\text{сист}}} U_{\text{г}}; \quad I_{2\text{к}} = \frac{k_{32} x_c}{z_{\text{сист}}} I; \quad z_{\text{сист}} = \sqrt{[k_{12}^2 (1-a) R_3]^2 + x_c^2};$$

$$\delta' = \arctg \frac{x_c}{k_{12}^2 R_3 (1-a)}.$$

У рівнянні (5) невідомими є

$$k_{12} = w_1/w_2; \quad k_{32} = w_3/w_2 \quad \text{і} \quad x_c.$$

Величини, необхідні для визначення $I_{2\text{xx}}$ і $I_{2\text{к}}$, можна одержати з каталожних даних для заданого типу генератора. (У каталогах на генератори звичайно даються $U_{\text{гн}}$, $I_{\text{н}}$, $I_{3\text{xx}}$, $I_{3\text{н}}$, де $U_{\text{гн}}$ – напруга, прикладена до фази обмотки напруги ТФК при номінальній напрузі генератора).

Компаундуючу складову струму збудження $I_{3\text{к}}$ можна знайти шляхом аналізу векторної діаграми разом із характеристикою холостого ходу або експериментально.

Струми $I_{2\text{xx}}$ і $I_{2\text{к}}$ робочої обмотки ТФК зв'язані з відповідними складовими струму обмотки збудження і виразами:

$$I_{2\text{xx}} = I_{3\text{xx}}/\xi_0 \quad I_{2\text{к}} = I_{3\text{к}}/\xi_0,$$

де ξ_0 – коефіцієнт випрямлення випрямляча по струму.

З рівняння (5) випливає, що система повинна забезпечувати:

1) у режимі холостого ходу

$$I_{2\text{xx}} = \frac{k_{12}}{\sqrt{[k_{12}^2 (1-a) R_3]^2 + x_c^2}} U_{\text{гн}}; \quad (6)$$

2) у режимі номінального навантаження

$$I_{2\text{к}} = \frac{k_{32} x_c}{\sqrt{[k_{12}^2 (1-a) R_3]^2 + x_c^2}} I_{\text{н}}. \quad (7)$$

Таким чином, одержуємо систему з двох рівнянь, в які входять три невідомих: k_{12} , k_{32} і x_c . Це може означати, що один із невідомих параметрів може бути взятий довільно. Але це не так, оскільки умови самозбудження генератора накладають певні обмеження на вибір параметрів.

Розділивши рівняння (6) на (7), одержуємо вираз, інваріантний до параметра, розмір якого визначається типом магнітопроводу ТФК:

$$\frac{k_{12}}{k_{32}} = \frac{x_c}{z_{6Г}} \frac{I_{2\text{хх}}}{I_{2к}}, \quad (8)$$

де $z_{6Г} = U_{ГН}/I_{Н}$.

Самозбудження генератора можливе за умов, якщо ординати вольтамперної характеристики кола збудження, приведеної до обмотки напруги ТФК, для струмів $0 \leq I_1 < I_{1\text{хх}}$ будуть менше ординат характеристики холостого ходу генератора, перерахованої у залежності від струму обмотки напруги ТФК (рис. 7).

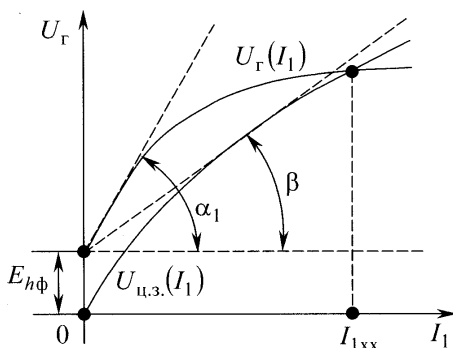


Рис. 7

Зневажаючи нелінійністю початкової ділянки характеристики холостого ходу генератора, а також з огляду на те, що перетинання характеристик, яке виключає самозбудження, можливе лише при

малих значеннях струму збудження, тобто в зоні прямолінійної ділянки характеристики холостого ходу, умову самозбудження можна виразити співвідношенням

$$\text{tg} \beta < \text{tg} \alpha_1, \quad (9)$$

де β – кут нахилу дотичної до вольт-амперної характеристики кола збудження, проведеної через точку з координатами $(0; E_{hф})$ ($E_{hф}$ – залишкова напруга генератора, приведена до фази обмотки напруги ТФК); α_1 – кут нахилу прямолінійної ділянки перерахованої характеристики холостого ходу генератора.

Для визначення $\text{tg} \beta$ необхідно мати аналітичний вираз вольт-амперної характеристики кола збудження.

Відомо, що при самозбудженні генератор працює в режимі холостого ходу; тому його струм збудження, приведений до робочої обмотки ТФК,

$$I_2 = \frac{k_{12} U_{к.з.}}{\sqrt{k_{12}^4 [(1-a)R_3]^2 + x_c^2}}, \quad (10)$$

де $U_{\text{к.з.}}$ – напруга на вході кола збудження, включаючи трансформатор.

Опір R_3 залишається практично постійним в усіх режимах, за винятком режиму малих струмів ($I_2 \ll I_{2\text{xx}}$), коли його величина, у силу нелінійності кола збудження, істотно зростає.

Формулою (10) для побудови вольт-амперної характеристики кола збудження можна скористатися в тому випадку, якщо відома аналітична залежність R_3 від струму I_2 . Найбільш вдало таку залежність можна одержати, апроксимуючи нелінійну функцію $U_2 = f(I_2)$ квадратичною параболою:

$$U_2^2 = k I_2, \quad (11)$$

де U_2 – фазна напруга робочої обмотки трансформатора; k – коефіцієнт апроксимації квадратичною параболою характеристики кола збудження, приведеної до робочої обмотки ТФК.

Оскільки рівняння (11) повинне виконуватися в усьому діапазоні зміни струмів I_2 від 0 до $I_{2\text{xx}}$, можна записати

$$U_{2\text{xx}}^2 = k I_{2\text{xx}}, \text{ звідки } k = U_{2\text{xx}}^2 / I_{2\text{xx}}.$$

З іншого боку, розглядаючи R_3 як функцію k і I_2 , маємо:

$$U_2 = R_3(I_2, k) I_2. \quad (12)$$

Зводячи рівняння (12) у квадрат і, вирішуючи його разом із рівнянням (11), одержимо $k I_2 = R_3^2 I_2^2$, звідки

$$R_3 = \sqrt{k/I_2}. \quad (13)$$

Підставивши рівняння (13) у (10), після перетворення маємо

$$U_{\text{к.з.}}^2 = \frac{x_c^2}{k_{12}^2} I_2^2 + k k_{12}^2 (1-a)^2 I_2.$$

З огляду на те, що $I_2 = k_{12} I_1$, остаточно знаходимо

$$U_{\text{к.з.}}^2 = x_c^2 I_1^2 + k k_{12}^3 (1-a)^2 I_1. \quad (14)$$

У даному рівнянні $U_{\text{к.з.}}$ – напруга, прикладена до фази ОН ТФК, тобто $U_{\text{к.з.}} = U_\Gamma$.

Кутовий коефіцієнт дотичної, проведеної до характеристики кола збудження у координатних осях I_1 , U_r через точку з координатами $(0; E_{h\Phi})$ (рис.7), згідно [5] буде

$$k_k = \frac{x_c^2 E_{h\Phi}}{k(1-a)^2 k_{12}^3} + \frac{k(1-a)^2 k_{12}^3}{4 E_{h\Phi}} = \frac{m_u}{m_i} \operatorname{tg} \beta.$$

Маючи характеристику холостого ходу генератора, можна легко одержати праву частину рівняння (9). Дійсно, розглянемо характеристики на рис.8 і рис.9. На рис.8 зображена характеристика холостого ходу генератора, а на рис.9 – та ж характеристика, приведена до обмотки напруги ТФК.

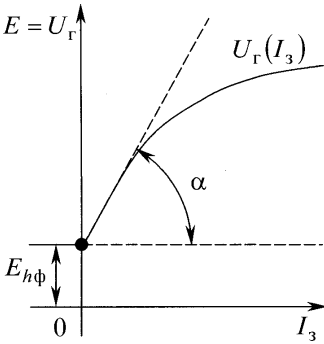


Рис. 8

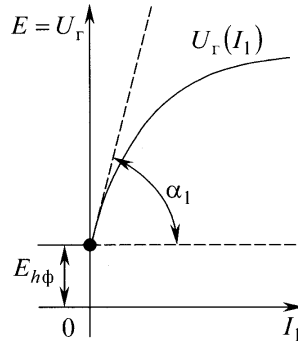


Рис. 9

Неважко переконатися в наступному:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{E}{m_u} \frac{m_i}{I_3} \quad \text{або} \quad \frac{E}{I_3} = \frac{m_u}{m_i} \operatorname{tg} \alpha; \quad (15)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{E}{m_u} \frac{m_i}{I_1} \quad \text{або} \quad \frac{E}{I_1} = \frac{m_u}{m_i} \operatorname{tg} \alpha_1.$$

Нам відомо, що $I_2 = I_3 / \xi_0$ або $I_3 = \xi_0 I_2$. У свою чергу, $I_2 = k_{12} I_1$, тобто

$$I_3 = \xi_0 k_{12} I_1 \quad (16)$$

Підставивши (16) у (15), легко переконатися, що

$$\frac{m_u}{m_i} \operatorname{tg} \alpha_1 = k_{12} \xi_0 \frac{m_u}{m_i} \operatorname{tg} \alpha.$$

Позначимо $x_\Gamma = \operatorname{tg} \alpha \, m_u / m_i$, тоді $\operatorname{tg} \alpha_1 \, m_u / m_i = k_{12} \xi_0 x_\Gamma$ й умова самозбудження генератора (9) перепишеться у виді

$$\xi_0 k_{12} x_\Gamma \geq \frac{x_c^2 E_{h\phi}}{k k_{12}^3 (1-a)^2} + \frac{k k_{12}^3 (1-a)^2}{4 E_{h\phi}}. \quad (17)$$

Вирішуючи нерівність (17) відносно x_c , одержуємо

$$x_c \leq \frac{k k_{12}^3 (1-a)^2}{E_{h\phi}} \sqrt{\frac{\xi_0 x_\Gamma E_{h\phi}}{k k_{12}^2 (1-a)^2} - \frac{1}{4}}. \quad (18)$$

Нерівність (18) разом із рівняннями (6) і (8) дозволяє записати систему з взаємно незалежних двох рівнянь і однієї нерівності, що містять три шуканих параметри:

$$\left. \begin{aligned} \frac{k_{12}}{k_{32}} &= \frac{x_c}{z_{6\Gamma}} \frac{I_{2xx}}{I_{2\kappa}}; \\ x_c^2 &= \frac{k_{12}^2 U_{\Gamma\Gamma}^2}{I_{2xx}^2} - k_{12}^4 (1-a)^2 R_3^2; \\ x_c &\leq \frac{k k_{12}^3 (1-a)^2}{E_{h\phi}} \sqrt{\frac{\xi_0 x_\Gamma E_{h\phi}}{k k_{12}^2 (1-a)^2} - \frac{1}{4}}. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

Спільне рішення другого рівняння з нерівністю системи (19) дозволяє визначити діапазон можливих значень коефіцієнта k_{12}^2 :

$$\begin{aligned} \frac{2 E_{h\phi}}{k (1-a)^2} \left[\left(\xi_0 x_\Gamma + \frac{E_{h\phi}}{I_{2xx}} \right) - \sqrt{\left(\xi_0 x_\Gamma + \frac{E_{h\phi}}{I_{2xx}} \right)^2 - \left(\frac{U_{\Gamma\Gamma}}{I_{2xx}} \right)^2} \right] &\leq k_{12}^2 \leq \\ &\leq \frac{2 E_{h\phi}}{k (1-a)^2} \left[\left(\xi_0 x_\Gamma + \frac{E_{h\phi}}{I_{2xx}} \right) + \sqrt{\left(\xi_0 x_\Gamma + \frac{E_{h\phi}}{I_{2xx}} \right)^2 - \left(\frac{U_{\Gamma\Gamma}}{I_{2xx}} \right)^2} \right]. \end{aligned} \quad (20)$$

При виводі (20) було враховано, що $R_3^2 = k/I_{2xx}$.

Вибираючи коефіцієнт трансформації k_{12} з умови (20), необхідно враховувати, що характеристика кола збудження має асимптоту, рівняння якої може бути представлене як

$$U_{к.з.} = x_c I_1 + \frac{k k_{12}^3 (1-a)^2}{2 x_c}.$$

Дотична до характеристики кола збудження (14) через точку з координатами $(0; E_{h\phi})$ може бути проведена тільки у випадку, якщо

$$E_{h\phi} \leq \frac{k k_{12}^3 (1-a)^2}{2 x_c}. \quad (21)$$

З умови існування дотичної (21) для коефіцієнта k_{12} , з огляду на те, що нас цікавлять тільки його позитивні значення, одержуємо

$$k_{12}^2 \geq \frac{2 E_{h\phi}^2}{k (1-a)^2 I_{2xx}} \left[-1 + \sqrt{1 + \left(\frac{U_{гн}}{E_{h\phi}} \right)^2} \right].$$

Визначення коефіцієнта трансформації k_{12} з виразу (20) має сенс тільки в тому випадку, якщо справедлива нерівність

$$\begin{aligned} \frac{2 E_{h\phi}}{k (1-a)^2} \left[\left(\xi_0 x_\Gamma + \frac{E_{h\phi}}{I_{2xx}} \right) + \sqrt{\left(\xi_0 x_\Gamma + \frac{E_{h\phi}}{I_{2xx}} \right)^2 - \left(\frac{U_{гн}}{I_{2xx}} \right)^2} \right] \geq \\ \geq \frac{2 E_{h\phi}^2}{k (1-a)^2 I_{2xx}} \left[-1 + \sqrt{1 + \left(\frac{U_{гн}}{E_{h\phi}} \right)^2} \right]. \end{aligned} \quad (22)$$

Легко переконатися, що нерівність (22) завжди виконується.

Підсумовуючи все сказане, умова для вибору коефіцієнта трансформації k_{12} записуємо у виді

$$\frac{2 E_{h\phi}}{k(1-a)^2} \left[\left(\xi_0 x_{\Gamma} + \frac{E_{h\phi}}{I_{2xx}} \right) + \sqrt{\left(\xi_0 x_{\Gamma} + \frac{E_{h\phi}}{I_{2xx}} \right)^2 - \left(\frac{U_{\Gamma H}}{I_{2xx}} \right)^2} \right] \geq k_{12}^2 \geq$$

$$\frac{2 E_{h\phi}}{k(1-a)^2} \left[\left(\xi_0 x_{\Gamma} + \frac{E_{h\phi}}{I_{2xx}} \right) - \sqrt{\left(\xi_0 x_{\Gamma} + \frac{E_{h\phi}}{I_{2xx}} \right)^2 - \left(\frac{U_{\Gamma H}}{I_{2xx}} \right)^2} \right]; (a) \quad (23)$$

$$\geq \frac{2 E_{h\phi}^2}{k(1-a)^2 I_{2xx}} \left[-1 + \sqrt{1 + \left(\frac{U_{\Gamma H}}{E_{h\phi}} \right)^2} \right]. \quad (б)$$

Нижня межа k_{12}^2 повинна задовольняти виразам (а) і (б).

По величині k_{12}^2 , знайденої з нерівності (23), використовуючи перше і друге рівняння системи (19), визначаємо коефіцієнт трансформації k_{32} і реактивність x_c .

З метою зменшення габаритів системи АРЗ бажано, щоб реактивність x_c була можливо більшою. Тоді ємність конденсаторів буде мінімально можливою.

Реактивність x_c буде максимальною при

$$k_{12}^2 \Big|_{x_c = x_{c \max}} = \frac{1}{2} \frac{1}{(1-a)^2} \frac{U_{\Gamma H}^2}{U_{2xx}^2} = \frac{1}{2} \frac{1}{k(1-a)^2} \frac{U_{\Gamma H}^2}{I_{2xx}^2}. \quad (24)$$

3.3. Розрахунок системи фазового компаундування виходячи зі сталих режимів синхронного генератора

Вихідні дані

Номинальна потужність генератора	– $P_{\text{н}}$
Номинальна лінійна напруга генератора	– $U_{\text{лн}}$
Номинальний струм статора	– $I_{\text{н}}$
Номинальне значення коефіцієнта потужності	– $\cos \varphi = 0.8$
Номинальна частота	– $f_{\text{н}}$
Спосіб з'єднання обмоток	– $\bar{Y}/\Delta$
Опір кола збудження, включаючи	

перехідні контакти, при струмі збудження

$I_3 \geq I_{3xx}$ і температури $t^\circ = 80^\circ \text{C}$

— r_f

Струм збудження генератора в режимі

холостого ходу

— I_{3xx}

Струм збудження генератора в режимі

номінального навантаження

— $I_{3н}$

Струм збудження генератора в режимі

номінального індуктивного навантаження $\cos \varphi = 0.2$ — I_{3i}

Порядок розрахунку

1. При визначенні компаундувочої складової струму збудження $I_{3к}$ виходимо з формули для струму робочої обмотки ТФК

$$\dot{I}_2 = I_{2xx} \epsilon^{j(\alpha_u + \delta' - 180^\circ)} + I_{2к} \epsilon^{j(\alpha_u + \delta' - \varphi - 90^\circ)}.$$

Задаючись довільно аргументом струму I_{2xx} , запишемо

$$\dot{I}_2 = I_{2xx} \epsilon^{j\alpha_{12xx}} + I_{2к} \epsilon^{j(\alpha_{12xx} - \varphi + 90^\circ)}. \quad (25)$$

Помножимо усі компоненти рівняння (25) на ξ_0 та одержимо

$$\dot{I}_3 = I_{3xx} \epsilon^{j\alpha_{12xx}} + I_{3к} \epsilon^{j(\alpha_{12xx} - \varphi + 90^\circ)}.$$

Останньому рівнянню відповідає векторна діаграма на рис. 10. По теоремі косинусів можна записати:

$$I_3^2 = I_{3xx}^2 + I_{3к}^2 - 2 I_{3к} I_{3xx} \cos(90^\circ + \varphi)$$

або

$$I_3^2 = I_{3xx}^2 + I_{3к}^2 + 2 I_{3к} I_{3xx} \sin \varphi,$$

звідки

$$I_{3к} = -I_{3xx} \sin \varphi + \sqrt{I_3^2 - I_{3xx}^2 \cos^2 \varphi}.$$

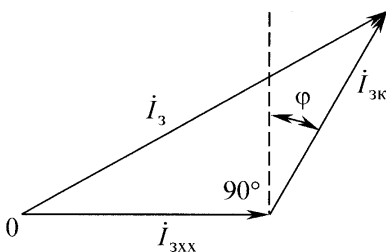


Рис. 10

Для номінального режиму ($\cos \varphi = 0.8$; $\cos \varphi = 0.6$)

$$I_{3кн} = -0.6 I_{3xx} + \sqrt{I_{3н}^2 - 0.64 I_{3xx}^2}.$$

Для режиму номінального індуктивного навантаження ($\cos \varphi = 0.2$; $\sin \varphi = 0.98$)

$$I_{3кі} = -0.98 I_{3xx} + \sqrt{I_{3і}^2 - 0.04 I_{3xx}^2}.$$

Компаундуюча складова струму збудження

$$I_{зк} = (I_{зкн} + I_{зкі})/2.$$

2. Залишкова ЕРС на фазу генератора знаходиться в межах

$$E_{h\phi} = (2...6)\% U_{н\phi}.$$

Для генератора з номінальною лінійною напругою в 400 В при з'єднанні обмотки напруги ТФК у "зірку" ЕРС

$$E_{h\phi} = 5...6 \text{ В}.$$

3. По визначенню опір

$$x_r = tg\alpha m_u / m_i.$$

де α – кут нахилу дотичної до характеристики холостого ходу генератора.

Щоб знайти x_r , досить провести дотичну до характеристики холостого ходу (див. Додаток А), побудованої в координатах струм збудження генератора (А) – фазна напруга холостого ходу генератора (В), узяти довільну точку на дотичній і знайти відношення

$$x_r = U_{0\phi} / I_3.$$

4. Розраховуємо випрямляч і визначаємо параметри кола збудження, приведені до фази робочої обмотки ТФК. Схему випрямляча вибираємо в залежності від числа фаз і схеми з'єднання обмоток ТФК.

Найчастіше трансформатори фазового компаундування мають трифазне виконання. З погляду зменшення пульсацій струму збудження перевагу варто віддати трифазній мостовій схемі (рис.11). У цьому випадку:

$$\frac{U_3}{U_2} = \frac{U_{3.ср}}{U_2} = 2,34; \quad \frac{U_{3\max}}{U_2} = \frac{U_{обр\max}}{U_2} = 2,44; \quad \frac{I_2}{I_3} = 0,817; \quad \beta = 0,057,$$

де U_3 – діюче значення випрямленої напруги; $U_{3.ср}$ – середнє значення випрямленої напруги; $U_{3\max}$ – амплітудне значення випрямленої напруги; β – коефіцієнт пульсацій, що дорівнює відношенню амплітуди першої гармоніки змінної складової до середнього значення випрямленої напруги; $U_{обр\max}$ – амплітуда зворотної напруги на один діод; I_3 – середнє значення випрямленого струму, що протікає через навантаження; U_2 –

діюче значення фазної напруги робочої обмотки ТФК; I_2 – діюче значення фазного струму робочої обмотки ТФК.

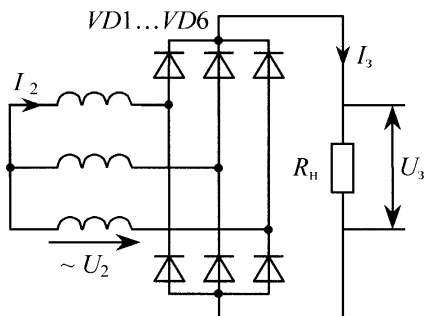


Рис. 11

Для цієї схеми потужність робочої обмотки ТФК:

$$P_2 = 3U_2 I_2 = 3 \frac{U_{3, \text{ср}}}{2,34} 0,817 I_3 = \\ = 1,05 U_{3, \text{ср}} I_3 = 1,05 U_3 I_3.$$

Напівпровідникові вентиля випрямляча вибираються виходячи з максимального робочого струму випрямляча і максимальної зворотної напруги. У якості максимального робочого струму випрямляча приймається струм збудження генератора в режимі номінального індуктивного навантаження I_{3i} .

У результаті розрахунку випрямляча необхідно визначити ξ_0 , $I_{2\text{хх}}$, $U_{2\text{хх}}$ і k :

- а) коефіцієнт випрямлення по струму випрямляча

$$\xi_0 = I_3 / I_2 = \frac{1}{I_2 / I_3};$$

- б) струм у фазі робочої обмотки ТФК у режимі холостого ходу генератора

$$I_{2\text{хх}} = I_{3\text{хх}} / \xi_0;$$

- в) напруга на фазу робочої обмотки ТФК у режимі холостого ходу генератора

$$U_{2\text{хх}} = \frac{U_{3\text{хх}}}{\lambda} = \frac{I_{3\text{хх}} r_f}{\lambda},$$

де $\lambda = U_3 / U_2$ – коефіцієнт випрямлення по напрузі випрямляча;

- г) коефіцієнт апроксимації квадратичною параболою характеристики кола збудження, приведеної до робочої обмотки ТФК,

$$k = U_{2\text{хх}}^2 / I_{2\text{хх}}.$$

5. Коефіцієнт трансформації k_{12} . Він знаходиться відповідно з умовою (23). За результатами розрахунку нерівності (23) вибираємо величини

ну k_{12} . При її виборі, якщо представляється можливим, бажано керуватися умовою (24). У цьому випадку ємність батареї конденсаторів буде мінімальною.

Для трьохобмоткового ТФК без повітряних зазорів і магнітних шунтів $\alpha = 0$.

6. Площа перетину стрижня магнітопроводу ТФК визначаємо по формулі

$$S_{\text{ст}} = c \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{P_1 \alpha}{f j B_m}}, \text{ м}^2,$$

$$P_1 = 3 \frac{U_{2\text{н}} I_{2\text{н}}}{\eta_{\text{тр}}} = \frac{1,05 I_{3\text{н}} U_{3\text{н}}}{\eta_{\text{тр}}}, \text{ ВА},$$

де c – постійний коефіцієнт, що залежить від конструкції магнітопроводу трансформатора і форми котушок (для трифазного трансформатора, що має три стрижні і циліндричні обмотки, $c = 0,42$); $\alpha = G_{\text{ст}}/G_{\text{Cu}}$ – відношення ваги магнітопроводу трансформатора до ваги міді обмоток (при $\alpha = 2$ вартість трансформатора мінімальна); f – частота ($f = 50$ Гц); B_m – амплітуда магнітної індукції, Тл (для ТФК приймають $B_m = (0,6 \dots 0,8)$ Тл); P_1 – потужність на вході трансформатора, ВА; $\eta_{\text{тр}}$ – ККД трансформатора ($\eta_{\text{тр}} = 0,9 \dots 0,95$); j – щільність струму в проводах обмоток, А/мм² (для ТФК приймають $j = (3 \dots 4)$ А/мм²).

За результатами розрахунку вибирається $S_{\text{ст}}$.

7. Число витків робочої обмотки ТФК знаходимо по формулі

$$w_{2\text{расч}} = \frac{U_{2\text{н}}}{4,44 f B_m S_{\text{ст}}};$$

приймаємо w_2 , округляючи $w_{2\text{расч}}$ до цілого числа.

8. Число витків обмотки напруги ТФК знаходимо по формулі

$$w_{1\text{расч}} = k_{12} w_2;$$

вибираємо w_1 шляхом округлення $w_{1\text{расч}}$ до цілого числа.

9. Реактивність x_c на фазу ТФК визначаємо із системи рівнянь (6) з урахуванням, що $R_3^2 = k/I_{2\text{хх}}$;

$$x_c = \sqrt{\frac{k_{12}^2 U_{\text{гн}}^2}{I_{2\text{хх}}^2} - \frac{k_{12}^4 k (1 - \alpha)^2}{I_{2\text{хх}}}}.$$

10. Коефіцієнт трансформації k_{32} :

$$k_{32} = \frac{k_{12} z_{гб} I_{2к}}{x_c I_{2xx}}, \quad \text{де } z_{гб} = U_{гн} / I_{н}; \quad I_{2к} = I_{3к} / \xi_0.$$

11. Число витків струмової обмотки ТФК визначаємо по формулі

$$w_{3\text{расч}} = k_{32} w_2;$$

вибираємо w_3 шляхом округлення $w_{3\text{расч}}$ до цілого числа.

12. Максимально можливий струм обмотки напруги (діюче значення)

$$I_{1\text{max}} = \frac{U_{гн} + k_{12} k_{32} (1-a) \frac{U_{2xx}}{I_{2xx}} I_{н}}{\sqrt{\left[k_{12}^2 (1-a) \frac{U_{2xx}}{I_{2xx}} \right]^2 + x_c^2}}.$$

Перетин обмотки стрижня ТФК

$$q_1 = I_{1\text{max}} / j.$$

Максимально можливий струм (діюче значення) та перетин робочої обмотки ТФК:

$$I_{2\text{max}} = I_{2н} = I_{3н} / \xi_0; \quad q_2 = I_{2\text{max}} / j.$$

Максимально можливий струм (діюче значення) та перетин обмотки струму:

$$I_{3\text{max}} = I_{н}; \quad q_3 = I_{3\text{max}} / j.$$

13. І, нарешті, визначаємо параметри батареї конденсаторів.

При з'єднанні конденсаторів у "зірку" ємність на фазу та максимально можлива напруга на конденсаторах:

$$C_Y = \frac{10^6}{\omega x_c} \text{ мкф}; \quad U_{c\text{max} Y} = x_c I_{1\text{max}} \sqrt{2} \text{ В.}$$

При з'єднанні конденсаторів у "трикутник" ємність на фазу та максимально можлива напруга на конденсаторах

$$C_{\Delta} = \frac{10^6}{3 \omega x_c} \text{ мкф}; \quad U_{c\text{max} \Delta} = \sqrt{6} x_c I_{1\text{max}} \text{ В.}$$

4. Математичне описання синхронного генератора і статичного навантаження

Як правило, розрахунки і моделювання електромеханічних процесів у суднових електроенергетичних системах (СЕЕС) здійснюються по рівняннях Парка-Горєва, записаних у відносних одиницях (в.о.). Запис рівнянь елементів СЕЕС залежить від обраної системи координат, напрямків осей і системи відносних одиниць. Відповідно до рекомендацій, викладених в [1], рівняння генератора в осях d, q і відносних одиницях можуть бути записані в наступній формі:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt}(e_{af} - x_d i_d + e_{rd}) + (x_q i_q + e_{rq})\omega - r_a i_d &= U_d = U \sin(\Theta); \\ -\frac{d}{dt}(x_q i_q + e_{rq}) + (e_{af} - x_d i_d + e_{rd})\omega - r_a i_q &= U_q = U \cos(\Theta); \\ T_{d0} \frac{d}{dt} \left(e_{af} - \frac{x_{ad}^2}{x_f} i_d + \frac{x_{ad}}{x_f} e_{rd} \right) + e_{af} &= U_f; \\ T_{rd} \frac{d}{dt} \left(e_{rd} - \frac{x_{ad}^2}{x_{rd}} i_d + \frac{x_{ad}}{x_{rd}} e_{af} \right) + e_{rd} &= 0; \\ T_{rq} \frac{d}{dt} \left(e_{rq} + \frac{x_{aq}^2}{x_{rq}} i_q \right) + e_{rq} &= 0; \\ T_j \frac{d\omega}{dt} + [(e_{af} - x_d i_d + e_{rd})i_q + (x_q i_q + e_{rq})i_d] &= M_m; \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{x_{ad}^2}{x_f} &= x_d - x'_d; \quad \frac{x_{ad}}{x_f} = \frac{x_d - x'_d}{x_{ad}}; \quad \frac{x_{aq}^2}{x_{rq}} = x_q - x''_q; \\ \frac{x_{ad}}{x_{rd}} &= \frac{x_{ad}(x'_d - x''_d)}{x_{ad}(x'_d - x''_d) + (x''_d - x_s)(x'_d - x_s)}; \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

де e_x, U_x, i_x – ЕРС, напруги і струми відповідних обмоток (d – статорна обмотка по подовжній осі, q – статорна обмотка по поперечній осі, f – обмотка збудження, rd – заспокійлива обмотка по подовжній осі, rq – заспокійлива обмотка по поперечній осі); x_d, x_q – синхронні індуктивні

опори по подовжній і поперечній осі; x_{ad}, x_{aq} – індуктивні опори реакції якоря по подовжній і поперечній осі; x_s – індуктивний опір розсіювання статорної обмотки ($x_s = x_d - x_{ad} = x_q - x_{aq}$); r_a – активний опір обмотки статора; x_f – повний індуктивний опір обмотки збудження; x_{rd}, x_{rq} – повні індуктивні опори заспокійливих контурів по подовжній і поперечній осях; x'_{d}, x''_{d} – перехідне і надперехідний індуктивні опори по подовжній осі; x'_{q}, x''_{q} – надперехідний опір по поперечній осі; T_{d0} – стала часу кола збудження при розімкненому колі статора; T_{1d}, T_{1q} – стала часу заспокійливих контурів по подовжній і поперечній осям; T_j – інерційна стала генераторного агрегату; M_m – механічний момент; Θ – кут навантаження.

Напруга збудження визначається системою збудження і відповідно до [1] у випадку використання трансформатора фазового компаундування з коректором напруги може бути представлено наступним рівнянням у відносних одиницях:

$$U_f = \sqrt{(k_1 U_d - k_2 i_q)^2 + (k_1 U_q + k_2 i_d)^2} - k_3^2 e_{af}^2 + k_u (U_{\text{зад}} - U), \quad (28)$$

$$\text{де } k_1 = \frac{\beta_u}{\sqrt{2}} k_{12} \frac{U_6}{U_{f6}}; \quad k_2 = \frac{\beta_u}{\sqrt{2}} k_{32} \frac{x_c}{z_6} \frac{U_6}{U_{f6}}; \quad k_3 = \frac{\beta_u}{\beta_i} \frac{x_c}{r_f};$$

$\beta_u = U_{3.\text{cp}}/U_2$ і $\beta_i = I_3/I_2$ – параметри випрямляча; k_{12}, k_{32} – коефіцієнти трансформації трансформатора фазового компаундування; x_c – компаундуючий опір, Ом; r_f – активний опір обмотки збудження, Ом; z_6, U_6, U_{f6} – базисні опір якоря, напруга якоря і напруга збудження відповідно; k_u – еквівалентний коефіцієнт підсилення кола коректора; $U_{\text{зад}}$ і U – задане і реальне значення напруги якоря генератора.

Механічний момент на валу генератора формується приводним двигуном і автоматичним регулятором частоти. У спрощеному вигляді залежність механічного моменту від частоти обертання можна представити в наступній формі [1]:

$$M_m = k_\omega (\omega_{\text{xx}} - \omega), \quad (29)$$

де k_ω – коефіцієнт пропорційності; ω_{xx} – частота обертання на холостому ході, в.о.; ω – реальна частота обертання ротора, в.о. У випадку статизма регулювальної характеристики приводного двигуна 4%, коефіцієнт пропорційності $k_\omega = 20$ в.о.

Рівняння статичного активно-індуктивного навантаження:

$$\left. \begin{aligned} U_d &= r_n i_d + x_n \frac{d}{dt} i_d - x_n i_q \omega; \\ U_q &= r_n i_q + x_n \frac{d}{dt} i_q + x_n i_d \omega, \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

де x_n і r_n – індуктивний і активний опори навантаження.

5. Методика аналізу статичної стійкості автономної електроенергетичної системи

Відповідно до [3] під статичною стійкістю розуміють здатність системи самостійно відновлювати вихідний режим роботи при малому короткочасному збурюванні. Тому забезпечення статичної стійкості роботи синхронних генераторів – одна з найважливіших практичних задач, адже тільки при її рішенні стають фізично можливими основні режими СЕЕС із заданими характеристиками по якості електроенергії.

З іншого боку, параметри систем автоматичного регулювання збудження відносяться до числа головних факторів, що визначають стійкість роботи синхронних машин. У зв'язку з цим процес рішення задачі статичної стійкості нерозривно пов'язаний з визначенням найбільш оптимального закону регулювання збудження, зокрема коефіцієнтів підсилення штучних зворотних зв'язків у каналі регулювання.

Загальним методом рішення задач статичної стійкості електроенергетичних систем є метод першого наближення (перший метод) Ляпунова, що полягає в наступному. Нехай розглянута система описується нелінійними диференціальними рівняннями, що не містять явно часу t

$$\frac{dy_k}{dt} = Y_k(y_1, y_2, \dots, y_n), \quad \text{где } k=1, 2, \dots, n, \quad (31)$$

y_k узагальнені координати системи, тобто перемінні, що описують її стан. Сталий стан системи перед початком нового режиму описується рішенням рівнянь

$$Y_k(y_1, y_2, \dots, y_n) = 0,$$

звідки можна знайти початкові координати системи ($y_1 = y_{1н}, \dots, y_n = y_{nн}$), відносно яких розглядаються коливання.

Введемо в розгляд відхилення x_k координат від сталого значення y_{kn} . Їхня підстановка в рівняння (31) призводить до системи рівнянь:

$$\frac{d x_k}{d t} = X_k(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (32)$$

де $x_k = y_k - y_{kn}$; $X_k(x_1, x_2, \dots, x_n) = Y_k(x_1 + y_{1n}, x_2 + y_{2n}, \dots, x_n + y_{nn})$.

Якщо функції $X_k(x_1, x_2, \dots, x_n)$ допускають розкладання в ступінчеві ряди Тейлора, що сходяться в околиці заданих координат, то рівняння (32) після розкладання приймають вид

$$\frac{d x_k}{d t} = b_{k1} x_1 + b_{k2} x_2 + \dots + b_{kn} x_n + R_k(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

де $R_k(x_1, x_2, \dots, x_n)$ – функція, що складається з членів вище першого порядку в цьому розкладанні. При досить малому відхиленні, зневажаючи R_k , одержуємо лінеаризовані рівняння (33), що називають рівняннями першого наближення, яким відповідає характеристичне рівняння (34):

$$\frac{d x_k}{d t} = b_{k1} x_1 + b_{k2} x_2 + \dots + b_{kn} x_n; \quad (33)$$

$$a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + a_2 p^{n-2} + \dots + a_{n-1} p + a_n = 0. \quad (34)$$

Для дослідження статичної стійкості системи методом першого наближення принципово важливі наступні теореми Ляпунова:

– якщо всі корені характеристичного рівняння системи першого наближення мають негативні дійсні частини, то незбурений рух стійкий і притому асимптотично, які б не були члени вищих порядків у диференціальних рівняннях збуреного руху;

– якщо серед коренів характеристичного рівняння системи першого наближення мається хоча б один з позитивною дійсною частиною, то незбурений рух не стійкий при будь-якому виборі членів порядку вище першого в диференціальних рівняннях руху.

Таким чином, аналіз статичної стійкості електроенергетичної системи зводиться до лінеаризації нелінійних диференціальних рівнянь, запису характеристичного рівняння й аналізу коренів останнього.

6. Розрахунок статичної стійкості роботи синхронного генератора на потужну мережу

При роботі генератора на мережу безкінечної потужності амплітуда і частота напруги якоря є величинами постійними:

$$U = \text{const}; \quad f = \text{const} \quad \delta U = 0.$$

Рівняння генератора (26) без урахування демпферних обмоток, перехідних процесів в обмотці статора й активного опору якоря можна записати в наступній формі:

$$\left. \begin{aligned} x_q i_q \omega &= U_d = U \sin(\Theta); \\ \omega (e_{af} - x_d i_d) &= U_q = U \cos(\Theta); \\ T_{d0} \frac{d}{dt} [e_{af} - i_d (x_d - x'_d)] + e_{af} &= U_f; \\ T_j \frac{d}{dt} \omega + [(e_{af} - x_d i_d) i_q + x_q i_q i_d] &= M_m = k_\omega (\omega_{xx} - \omega). \end{aligned} \right\}$$

Також справедливе наступне рівняння:

$$\frac{d}{dt} \Theta = \omega - 1.$$

Напруга збудження при фазовому компаундуванні без урахування коректора напруги (28):

$$U_f = \sqrt{(k_1 U_d - k_2 i_q)^2 + (k_1 U_q + k_2 i_d)^2 - k_3^2 e_{af}^2}.$$

Лінеаризуємо за правилами варіаційного обчислення рівняння системи і представим їх в операторній формі:

$$\left. \begin{aligned} x_q i_{qH} \delta\omega + x_q \omega_H \delta i_q &= U_H \cos(\Theta_H) \delta\Theta; \\ (e_{afH} - x_d i_{dH}) \delta\omega + \omega_H \delta e_{af} - x_d \omega_H \delta i_d &= -U \sin(\Theta_H) \delta\Theta; \\ (T_{d0} p + 1) \delta e_{af} - T_{d0} (x_d - x'_d) p \delta i_d &= \delta U_f; \\ (T_j p + k_\omega) \delta\omega + (e_{afH} - i_{dH} (x_d - x_q)) \delta i_q + (x_q - x_d) i_{qH} \delta i_d + i_{qH} \delta e_{af} &= 0; \\ \delta\omega &= p \delta\Theta; \\ \delta U_f &= -k_\Theta \delta\Theta - k_q \delta i_q + k_d \delta i_d - k_3^2 \delta e_{af}, \end{aligned} \right\} (35)$$

$$\text{де } k_\Theta = k_1 k_2 [i_{dH} U_H \sin(\Theta_H) + i_{qH} U_H \cos(\Theta_H)] / U_{fH};$$

$$k_q = (k_1 U_{dH} - k_2 i_{qH}) k_2 / U_{fH}; \quad k_d = (k_1 U_{qH} + k_2 i_{dH}) k_2 / U_{fH};$$

$$U_{fH} = e_{afH} = \sqrt{\frac{(k_1 U_d - k_2 i_q)^2 + (k_1 U_q + k_2 i_d)^2}{1 + k_3^2}}.$$

Отриману систему можна представити у виді добутку матриці коефіцієнтів на вектор варіацій параметрів:

$$\begin{bmatrix} 0 & x_q \omega_H & -U_{qH} & U_{dH}/\omega_H & 0 \\ -x_d \omega_H & 0 & U_{dH} & U_{qH}/\omega_H & \omega_H \\ -T_{d0}(x_d - x'_d)p - k_d & k_q & k_\Theta & 0 & T_{d0}p + (1 + k_3^2) \\ 0 & 0 & p & -1 & 0 \\ (x_q - x_d)i_{qH} & e_{afH} - i_{dH}(x_d - x_q) & 0 & T_j p + k_\omega & i_{qH} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta i_d \\ \delta i_q \\ \delta \Theta \\ \delta \omega \\ \delta e_{af} \end{bmatrix} = 0.$$

Розв'яжемо систему (35) відносно варіації одного з параметрів (наприклад, варіації кута навантаження $\delta\Theta$) або знайдемо визначник матриці коефіцієнтів. У результаті одержимо наступне характеристичне рівняння:

$$a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3 = 0, \quad (36)$$

де

$$a_0 = T_j T_{d0} x'_d x_q \omega_H^2;$$

$$\begin{aligned} a_1 = & T_{d0} x'_d x_q \omega_H^2 k_\omega + \frac{U_{dH} U_{qH}}{\omega_H} T_{d0} (x_q - 2x'_d) + \\ & + x_q T_j \omega_H^2 (x_d (1 + k_3^2) - k_d) - T_{d0} x'_d x_q U_{dH} i_{dH}; \end{aligned}$$

$$a_2 = [T_{d0} x'_d \omega_n U_{qn} + k_d U_{dH} - x_d U_{dH} (1 + k_3^2)] [(U_{qn}/\omega_n) + i_{dH} x_q] + \\ + T_{d0} U_{dH}^2 (x_q - x'_d) + k_\omega x_q \omega_n^2 (-k_d + x_d (1 + k_3^2)) + \\ + \frac{U_{qn} U_{dH}}{\omega_n} [k_d + (1 + k_3^2)(x_q - x_d)] + k_q \frac{U_{dH}^2}{\omega_i};$$

$$a_3 = x_d U_{qn}^2 (1 + k_3^2) + \omega_n i_{dH} U_{qn} (x_d x_q (1 + k_3^2) + k_d (x_d - x_q)) + \\ + U_{dH}^2 [k_d + (1 + k_3^2)(x_q - x_d)] - U_{dH} (x_q \omega_n k_\Theta + k_q U_{qn}) - k_d e_{afH} U_{qn} \omega_n.$$

При виводі коефіцієнтів характеристичного рівняння були враховані наступні співвідношення:

$$U_{qn} = U_n \cos(\Theta_n) = \omega_n (e_{afH} - i_{dH} x_d); \quad U_{dH} = U_n \sin(\Theta_n) = \omega_n i_{qn} x_q.$$

Визначивши коефіцієнти рівняння, можна оцінити стійкість системи за допомогою одного з існуючих критеріїв стійкості (наприклад, алгебраїчного критерію Гурвіца) або знайти ступінь стійкості системи h , як найбільшу дійсну частину коренів рівняння. В останньому випадку орієнтовно можна визначити і час перехідного процесу:

$$t_{п.п} \approx \frac{3}{|h|} \text{ синхр.с.} \quad \text{або} \quad t_{п.п} \approx \frac{3}{|h| \omega_6} \text{ с.}$$

Порядок розрахунку:

1. У якості вихідного приймаємо режим номінального навантаження з параметрами (у в.о.):

$$U_n = 1 \text{ в.о.}; \quad i_n = 1 \text{ в.о.}; \quad \cos(\varphi_n) = 0,8; \quad \sin(\varphi_n) = 0,6;$$

$$\omega_n = 1 \text{ в.о.}; \quad \varphi_n = 36,87 \text{ град.}; \quad k_\omega = 20 \text{ в.о.}; \quad r_a = 0,$$

де φ_n – кут між векторами напруги і струму якоря.

2. Визначимо параметри вихідного сталого режиму в наступному порядку:

– ЕРС за поперечною реактивністю

$$e_{qn} = \sqrt{(U_n \cos(\varphi_n) + r_a i_n)^2 + (U_n \sin(\varphi_n) + x_q i_n)^2};$$

– кут між ЕРС і струмом

$$\psi_{\text{н}} = \arctg \left(\frac{U_{\text{н}} \sin(\varphi_{\text{н}}) + x_q i_{\text{н}}}{U_{\text{н}} \cos(\varphi_{\text{н}}) + r_a i_{\text{н}}} \right);$$

– кут між напругою і ЕРС

$$\Theta_{\text{н}} = \psi_{\text{н}} - \varphi_{\text{н}};$$

– подовжня і поперечна складові струму якоря

$$i_{d\text{н}} = i_{\text{н}} \sin(\psi_{\text{н}}); i_{q\text{н}} = i_{\text{н}} \cos(\psi_{\text{н}});$$

– ЕРС генератора

$$e_{af\text{н}} = e_{q\text{н}} + (x_d - x_q) i_{d\text{н}}.$$

3. Визначимо базисні величини генератора:

$$U_{\text{б}} = \sqrt{2} U_{\text{ф}}; I_{\text{б}} = \sqrt{2} I_{\text{ф}} \quad z_{\text{б}} = U_{\text{б}} / I_{\text{б}};$$

$$P_{\text{б}} = (3/2) U_{\text{б}} I_{\text{б}} = S_{\text{ном}}; I_{\text{фб}} = I_{\text{зхх}};$$

$$U_{\text{фб}} = r_f I_{\text{фб}}; \omega_{\text{б}} = 2 \pi f_{\text{н}},$$

де $U_{\text{ф}}$ і $I_{\text{ф}}$ – фазні напруга і струм статорної обмотки; $f_{\text{н}}$ – частота мережі, Гц.

4. Знаходимо сталі часу генератора в синхронних секундах або радіанах:

$$\text{– обмотки збудження } T_{d0}(\text{рад}) = \omega_{\text{б}} T_{d0}(\text{с});$$

$$\text{– інерційна } T_{j\text{ген}} = \frac{\omega_{\text{б}}^3 G D^2}{4 p P_{\text{б}}}, \text{ рад.},$$

де p – число пар полюсів.

З урахуванням махових мас дизеля для дизель-генераторного агрегату приймаємо $T_j \cong 2 T_{j\text{ген}}$.

5. Розраховуємо коефіцієнти $k_1, k_2, k_d, k_q, k_{\Theta}$ і k_3 (див. формули 28 і 35), а також визначаємо напругу збудження у вихідному сталому режимі:

$$U_{f\text{н}} = \sqrt{\frac{(k_1 U_d - k_2 i_q)^2 + (k_1 U_q + k_2 i_d)^2}{1 + k_3^2}}.$$

Якщо отримане значення $U_{fн}$ мало відрізняється від раніше розрахованого значення $e_{afн}$, то параметри трансформатора фазового компаундування обрані правильно.

6. Визначаємо коефіцієнти характеристичного рівняння (36), знаходимо його корені (Додаток Б), оцінюємо статичну стійкість розглянутої системи і приблизно визначаємо час перехідних процесів.

7. Аналіз стійкості роботи на активно-індуктивне навантаження синхронного генератора, що регулюється за принципом фазового компаундування

1. Визначення коефіцієнтів підсилення.

Закон регулювання збудження запишемо у виді:

$$U_f = k_u'' U_r + k_i I.$$

Тут U_f , U_r і I – відповідно напруга на обмотці збудження, напруга і струм навантаження генератора у в.о.

ЕРС у фазі робочої обмотки ТФК:

$$\dot{E}_2 = \frac{-k_{12} R_3 \dot{U}_r - j x_c R_3 k_{32} \dot{I}}{R_3 k_{12}^2 (1-a) - j x_c}$$

або

$$\dot{E}_2 = \frac{-k_{12} \dot{U}_r - j x_c k_{32} \dot{I}}{k_{12}^2 (1-a) - j (x_c / R_3)}.$$

У цьому виразі $\dot{U}_r$ і $\dot{I}$ – комплекси діючих значень напруги і струму фази якоря синхронного генератора. Позначивши комплекс $k_{12}^2 (1-a) - j (x_c / R_3) = z_{\text{сист}} e^{-j\delta}$, запишемо $\dot{E}_2$ у в.о.

Базисна напруга кола статора генератора $U_6 = z_6 I_6$.

Таким чином, маємо:

$$\dot{E}_{2*} = \left(-\frac{k_{12}}{z_{\text{сист}} e^{-j\delta}} \right) \frac{\dot{U}_r}{U_6} + \left(-j \frac{x_c k_{32}}{z_{\text{сист}} e^{-j\delta}} \right) \frac{\dot{I}}{z_6 I_6}.$$

В зв'язку з тим, що на обмотку напруги подається випрямлена напруга, маємо

$$U_{f*} = \frac{\lambda |\dot{E}_2|}{U_{f\phi}} \text{ або } U_{f*} = \frac{\lambda U_{\phi}}{\sqrt{2} U_{f\phi}} E_{2*}.$$

В останній формулі поява $\sqrt{2}$ обумовлюється тим, що у якості базисних величин напруги і струму прийняті амплітудні значення фазних величин.

Позначимо $k'_u = k_{12}/z_{\text{сист}}$ і $k'_i = (x_c k_{32})/(z_{\text{сист}} z_{\phi})$.

Це дозволяє побудувати вектор $\dot{E}_2$ у відповідності з наступною формулою (рис. 12):

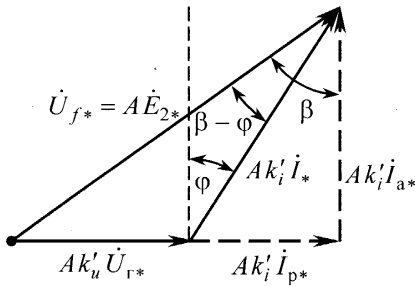


Рис. 12

$$\dot{E}_{2*} = k'_u U_{Г*} e^{j\alpha_{xx}} + k'_i I_{*} e^{j(\alpha_{xx} + 90^\circ - \varphi)}.$$

Помноживши усі компоненти вектора $\dot{E}_{2*}$ на коефіцієнт $A = \lambda U_{\phi}/(\sqrt{2} U_{f\phi})$, одержимо певний умовний вектор $\dot{U}_{f*}$, модуль якого дорівнює напрузі на обмотці збудження в в.о., U_{f*} . Отже, можна записати

$$U_{f*}^2 = (Ak'_u U_{Г*} + Ak'_i I_{р*})^2 + (Ak'_i I_{а*})^2.$$

Останній вираз дозволяє досить просто знайти варіацію напруги збудження:

$$\delta(U_{f*}^2) = \delta(k''_u U_{Г*} + k_i I_{р*})^2 + \delta(k_i I_{а*})^2;$$

$$2U_{f\phi} \delta U_{f*} = 2(k''_u U_{Г\phi} + k_i I_{р\phi}) \delta(k''_u U_{Г*} + k_i I_{р*}) + 2k_i I_{а\phi} \delta(k_i I_{а*});$$

$$\delta U_{f*} = \frac{(k''_u U_{Г\phi} + k_i I_{р\phi})}{U_{f\phi}} k''_u \delta U_{Г*} + \frac{(k''_u U_{Г\phi} + k_i I_{р\phi})}{U_{f\phi}} k_i \delta I_{р*} + \frac{k_i^2 I_{а\phi}}{U_{f\phi}} \delta I_{а*};$$

Тут і далі $k''_u = A k'_u$ і $k_i = A k'_i$ – коефіцієнти підсилення системи фа-

зового компаундування відповідно по напрузі генератора і по струму його навантаження.

З рис. 12 випливає, що

$$\sin(\beta) = \frac{(k_u'' U_{\Gamma H} + k_i I_{\Gamma H})}{U_{fH}}; \cos(\beta) = \frac{k_i I_{aH}}{U_{fH}}.$$

У режимі автономної роботи генератора на задане навантаження ні кут Θ , ні $\cos(\varphi_H)$ практично не залежать від коливань швидкості обертання. Тому можна прийняти

$$\delta I_{p*} = \sin(\varphi_H) \delta I_*; \delta I_{a*} = \cos(\varphi_H) \delta I_*.$$

Це дозволяє записати формулу для δU_{f*} в наступному виді:

$$\begin{aligned} \delta U_{f*} &= k_u'' \sin(\beta) \delta U_{\Gamma*} + (\sin(\beta) \sin(\varphi_H) + \cos(\beta) \cos(\varphi_H)) k_i \delta I_*; \\ \delta U_{f*} &= k_u'' \sin(\beta) \delta U_{\Gamma*} + k_i \cos(\beta - \varphi_H) \delta I_*. \end{aligned} \quad (37)$$

Якщо розглядати $k_u'' \sin(\beta)$ і $k_i \cos(\beta - \varphi_H)$ як деякі результуючі коефіцієнти підсилення, то можна зробити висновок, що в системі фазового компаундування коефіцієнти підсилення по напрузі і струму залежать від величини і характеру навантаження.

2. Рівняння синхронного генератора як об'єкта регулювання.

Рівняння електричної рівноваги при роботі на навантаження $Z_H = r_H + j x_H$ можна в в.о. записати у виді

$$T'_{dH} \frac{dU(t)}{dt} + U(t) = \omega(t) k U_f(t), \quad (38)$$

де $U(t)$ – напруга в в.о. на виході генератора; $U_f(t)$ – напруга в в.о. на обмотці збудження; $\omega(t)$ – кутова частота обертання ротора в в.о. Усі перемінні – функції часу. При запису рівняння (38) використані відомі співвідношення

$$U = k E_d = k E_{af}; U = k' E'_d;$$

$$U = k E_d = k E_{af}; U = k' E'_d; k' = \frac{z_H \sqrt{r_{aH}^2 + x_{qH}^2}}{r_{aH}^2 + x'_{dH} x_{qH}}; T'_{dH} = \frac{k}{k'} T_{d0};$$

$$r_{aH} = r_a + r_H; x_{dH} = x_d + x_H, x_{qH} = x_q + x_H; x'_{dH} = x'_d + x_H.$$

У цих рівняннях всі опори беруться або в Омах, або в в.о. Час і сталі часу ($T'_{дн}$, T_{d0}) беруться в радіанах. Перепишемо рівняння (38) в операторній формі й у варіаціях і розв'яжемо його щодо варіації $\delta U(p)$:

$$(T'_{дн} p + 1) \delta U(p) = k (\omega_{\text{н}} \delta U_f(p) + U_{f\text{н}} \delta \omega(p));$$

$$\delta U(p) = \frac{k \omega_{\text{н}}}{(T'_{дн} p + 1)} \delta U_f(p) + \frac{k U_{f\text{н}}}{(T'_{дн} p + 1)} \delta \omega(p). \quad (39)$$

3. Рівняння динамічної рівноваги.

Відповідно до принципу Даламбера, алгебраїчна сума моментів, включаючи динамічний, у будь-якому режимі генераторного агрегату дорівнює нулеві:

$$m_j + m_{\text{ем}} + m_{\text{мех}} = 0.$$

Це ж рівняння в в.о. з урахуванням знаків моменту і відомого факту, що в в.о. $m_* = P_*/\omega_* = P_*$ (тобто моменти у відносних одиницях дорівнюють потужностям), приводиться до виду

$$T_j \frac{d\omega}{dt} + P_{\text{ем}} = P_{\text{мех}}.$$

Запишемо останнє рівняння в операторній формі й у варіаціях, приймаючи до уваги наступне: $P_{\text{мех}} = P_{\text{мех н}} = \text{const}$; $\delta P_{\text{мех}} = 0$;

$$P_{\text{ем}} = (E_{af} U / x) \sin(\Theta), \quad U = k E_{af}, \quad P_{\text{ем}} = k E_{af}^2 \sin(\Theta) / x = U^2 \sin(\Theta) / (k x):$$

$$\delta P_{\text{ем}} = \delta \left(\frac{U^2 \sin(\Theta)}{x k} \right) = \frac{2 U_{\text{н}} \sin(\Theta)}{x k} \delta U = 2 \frac{P_{\text{н}}}{U_{\text{н}}} \delta U.$$

Таким чином, маємо:

$$T_j p \delta \omega + 2 \frac{P_{\text{н}}}{U_{\text{н}}} \delta U = 0. \quad (40)$$

При автономній роботі синхронного генератора на навантаження кут Θ між векторами $\dot{U}$ і $\dot{E}_{af}$ визначається винятково величиною і характером навантаження і практично не залежить ні від δU , ні від $\delta \omega$.

4. Критерій стійкості.

У малих відхиленнях робота генератора на статичне навантаження описується рівняннями (37), (39) і (40). Запишемо їх у матричній формі,

враховуючи, що $\delta i = \delta U / z_{\text{H}} = \delta U / \sqrt{r_{\text{H}}^2 + x_{\text{H}}^2}$:

$$\begin{bmatrix} T'_{d\text{H}} p + 1 & -k \omega_{\text{H}} & -k U_{f\text{H}} \\ -\left(k''_u \sin(\beta) + \frac{k_i}{z_{\text{H}}} \cos(\beta - \varphi_i) \right) & 1 & 0 \\ 2 P_{\text{H}} / U_{\text{H}} & 0 & T_j p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta U \\ \delta U_f \\ \delta \omega \end{bmatrix} = 0.$$

Визначник матриці коефіцієнтів прирівняний нулеві є характеристичним рівнянням системи

$$T_j T'_{d\text{H}} p^2 + \left[1 - k \omega_{\text{H}} \left(k''_u \sin(\beta) + \frac{k_i}{z_{\text{H}}} \cos(\beta - \varphi_{\text{H}}) \right) \right] T_j p + 2 \frac{U_{f\text{H}}}{U_{\text{H}}} k P_{\text{H}} = 0;$$

або

$$b_0 p^2 + b_1 p + b_2 = 0.$$

Для того, щоб корені характеристичного рівняння мали негативні дійсні частини, необхідно, щоб $b_0 > 0$, $b_1 > 0$ і $b_2 > 0$. Таким чином, критерієм стійкості роботи синхронного генератора на навантаження із системою автоматичного регулювання збудження (АРЗ) на основі фазового компаундування без коректора напруги буде умова:

$$k \omega_{\text{H}} \left(k''_u \sin(\beta) + \frac{k_i}{z_{\text{H}}} \cos(\beta - \varphi_{\text{H}}) \right) < 1. \quad (41)$$

В АРЗ існуючих синхронних генераторів система фазового компаундування обов'язково доповнюється коректором напруги з метою збільшення точності регулювання і підвищення стійкості. У цьому випадку напруга на обмотці збудження у відхиленнях:

$$\delta U_f = \left(k''_u \sin(\beta) + \frac{k_i}{z_{\text{H}}} \cos(\beta - \varphi_{\text{H}}) - k_u \right) \delta U_{\Gamma},$$

а критерій стійкості

$$k \omega_n \left(k_u'' \sin(\beta) + \frac{k_i}{z_n} \cos(\beta - \varphi_n) - k_u \right) < 1. \quad (42)$$

де k_u – еквівалентний коефіцієнт підсилення кола коректора.

5. Визначення розрахункових параметрів

Зробимо це на прикладі синхронного генератора МСК1250-1500.

Його параметри: $S_{\text{ном}} = 1250$ кВА; $P_{\text{ном}} = 1000$ кВт; $U_{\text{ном}} = 400$ В; $I_{\text{ном}} = 1810$ А; $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,8$; $I_{3xx} = 82$ А; $I_{3\text{ном}} = 214$ А; обмотка збудження: $r_f = 0,182$ Ом; $U_{3\text{ном}} = 39$ В; $t = 120$ °С; $GD^2 = 300$ кг·м²; якорна обмотка: $r_a = 0,0133$ в.о.; $x_d = 2,053$ в.о.; $x_q = 1$ в.о.; $x'_d = 0,213$ в.о.; $T_{d0} = 3,5$ с.; дані, отримані в результаті розрахунку системи фазового компонування генератора: $k_{12} = 9$; $k_{32} = 0,075$; $x_c = 30,05$ Ом; $U_{2xx} = 6,385$ В; $I_{2xx} = 67$ А; $R_3 = 0,0953$ Ом; $\lambda = 2,34$.

В якості вихідного сталого режиму розглянемо номінальний. Розрахунок робимо у відносних одиницях. У цьому випадку:

$U_n = 1$ в.о.; $i_n = 1$ в.о.; $\cos(\varphi_n) = 0,8$; $\omega_n = 1$ в.о.; $\varphi_n = 36,87$ град.

У таблиці приведені розрахункові параметри в залежності від $S_{\text{нав}}$ в в.о.

$S_{\text{нав}}$	z_n	r_n	x_n	r_{an}	x_{dn}	x_{qn}	x'_{dn}	k	k'	k/k'
0	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	1	1	1
0,25	4,0	3,2	2,4	3,213	4,453	3,4	2,613	0,735	0,974	0,754
0,5	2,0	1,6	1,2	1,613	3,253	2,2	1,413	0,559	0,955	0,585
0,75	1,33	1,07	0,8	1,08	2,853	1,8	1,013	0,444	0,936	0,474
1	1,0	0,8	0,6	0,813	2,653	1,6	0,813	0,3658	0,915	0,4
1,25	0,8	0,64	0,48	0,653	2,533	1,48	0,693	0,31	0,891	0,348

Базисні величини: $U_{\bar{6}} = U_{\text{ном}} \sqrt{2}/\sqrt{3} = 400 \cdot \sqrt{2}/\sqrt{3} = 326,7$ В;

$I_{\bar{6}} = I_{\text{ном}} \sqrt{2} = 1810 \cdot \sqrt{2} = 2560$ А; $z_{\bar{6}} = U_{\bar{6}}/I_{\bar{6}} = 0,1276$ Ом;

$I_{f\bar{6}} = I_{3xx} = 82$ А; $U_{f\bar{6}} = R_3 I_{f\bar{6}} = 0,182 \cdot 82 = 14,92$ В.

Коефіцієнти: $A = \frac{\lambda U_{\bar{6}}}{\sqrt{2} U_{f\bar{6}}} = \frac{2,34 \cdot 326,7}{\sqrt{2} \cdot 14,92} = 36,22$;

$$z_{\text{сист}} = \sqrt{k_{12}^4 + (x_c/R_3)^2} = \sqrt{9^4 + (30,05/0,0953)^2} = 325,56 \text{ в.о.}; k'_u =$$

$$= \frac{k_{12}}{z_{\text{сист}}} = \frac{9}{325,56} = 0,02764; k'_i = \frac{x_c k_{32}}{z_{\text{б}} z_{\text{сист}}} = \frac{30,05 \cdot 0,075}{0,1276 \cdot 325,56} = 0,05425;$$

$$k''_u = A k'_u = 36,22 \cdot 0,02764 = 1,001 \text{ в.о.}; k_i = A k'_i = 36,22 \cdot 0,05425 = 1,965 \text{ в.о.}$$

З трикутника на рис. 12 для досліджуваного (номінального) режиму знаходимо кут β (при цьому $U_{\text{гн}} = 1 \text{ в.о.}; I_{\text{ан}} = 0,8 \text{ в.о.}; I_{\text{рн}} = 0,6 \text{ в.о.}$):

$$\beta = \arctg \left[\frac{(k''_u U_{\text{гн}} + k_i I_{\text{рн}})}{k_i I_{\text{ан}}} \right] = \arctg \left[\frac{1,001 \cdot 1 + 0,6 \cdot 1,965}{0,8 \cdot 1,965} \right] = 54,20^\circ;$$

$$\sin(\beta) = 0,811; \cos(\beta - \varphi_n) = \cos(54,20^\circ - 36,87^\circ) = 0,9546.$$

З табл. 1 для $S_{\text{нагр}} = 1 \text{ в.о.}$ знаходимо $k = 0,3658$.

Критерій стійкості:

– без урахування коректора напруги (нерівність (41))

$$0,3658 \cdot 1 \cdot (1,001 \cdot 0,8111 + (1,965/1) \cdot 0,9546) < 1;$$

$$0,9831 < 1;$$

– з урахуванням коректора напруги (нерівність (42))

$$0,3658 \cdot 1 \cdot (1,001 \cdot 0,8111 + (1,965/1) \cdot 0,9546 - 10) < 1;$$

$$-2,6748 < 1.$$

Як бачимо з отриманих нерівностей, синхронний генератор з автоматичним регулятором збудження без коректора напруги в номінальному режимі працює поблизу границі стійкості, а введення додаткового негативного зворотного зв'язку по відхиленню напруги не тільки збільшує точність підтримки напруги, але і сприяє значному збільшенню запасу стійкості.



ЛІТЕРАТУРА

1. *Веретенников Л.П.* Исследование процессов в судовых электро-энергетических системах. Теория и методы. – Л.: Судостроение, 1975. – 376 с.

2. *Колонтаєвський Ю.П., Сосков А.Г.* Промислова електроніка та мікросхемотехніка: теорія і практикум. – К.: Каравела, 2003. – 368 с.

3. *Коваленко Л.П.* Автоматическое регулирование возбуждения и устойчивость судовых синхронных генераторов – Л.: Судостроение, 1976. – 272 с.

4. *Милях А.Н., Волков И.В., Кубышкин Б.Е.* Индуктивно-емкостные преобразователи источников напряжения в источники тока. – К.: Наукова думка, 1964. – 304 с.

5. *Яковлев Г.С.* Судовые электроэнергетические системы. – Л.: Судостроение, 1987. – 262 с.



Таблиця параметрів синхронних генераторів серії МСК ($n_s = 1500$ об/хв, $f = 50$ Гц, $\cos \varphi = 0,8$).

Генератор	U	P	I	r_a	I_{xxx}	$I_{3н}$	$U_{фн}$	GD^2	x_s	x_d	x_q	x'_d	x''_d	x''_q	T_{d0}	T''_d	k_u
	B	Bт	A	В.О.	A	B	B	кг·м ²	В.О.								с
1	2	3	4	5	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
МСК-500-1500	400	400	722	0,014	64	159	28	60	0,078	2,11	1,03	0,178	0,132	0,158	2,6	0,010	10
МСК-625-1500	400	500	902	0,015	73	190	30	110	0,098	2,18	1,10	0,228	0,167	0,198	3,6	0,013	10
МСК-750-1500	400	600	1084	0,013	68	179	32	135	0,086	2,31	1,13	0,236	0,15	0,163	3,8	0,014	10
МСК-940-1500	400	750	1360	0,013	69	174	36	155	0,091	2,11	1,05	0,231	0,158	0,18	4,0	0,014	10
МСК-1250-1500	400	1000	1810	0,011	82	214	39	300	0,093	2,05	1,00	0,213	0,15	0,168	3,5	0,015	10
МСК-1560-1500	400	1250	2260	0,009	86	213	44	325	0,069	2,04	0,98	0,194	0,127	0,142	4,1	0,019	10
МСК-1875-1500	400	1500	2710	0,008	88	207	49	345	0,059	1,98	0,95	0,176	0,11	0,125	4,2	0,015	10
МСК-82-4	400	30	54,2	0,049	7,9	26	38	2,8	0,108	2,23	1,11	0,258	0,173	0,316	1,28	0,003	20
МСК-83-4	400	50	91	0,033	8,8	26	52	4,6	0,081	2,08	1,03	0,21	0,143	0,171	1,57	0,003	20
МСК91-4	400	75	135	0,035	9,0	25	80	8,5	0,089	2,15	0,95	0,24	0,185	0,246	1,46	0,008	20
МСК-92-4	400	100	181	0,03	9,0	27	106	11,3	0,078	2,16	0,96	0,2	0,176	0,217	0,64	0,014	20
МСК-102-4	400	150	270	0,03	54	152	22	24	0,074	1,99	1,05	0,19	0,124	0,136	1,6	0,008	20
МСК-103-4	400	200	361	0,026	57	160	26	30	0,055	1,92	0,98	0,23	0,176	0,176	1,96	0,007	20
МСК-113-4	400	300	542	0,019	59	207	25	56	0,052	1,6	0,83	0,2	0,122	0,141	2,43	0,006	20
МСК-114-4	400	400	722	0,04	58	182	25	65	0,045	1,6	0,86	0,2	0,10	0,117	1,8	0,006	20
МСК-625-1500	230	500	1550	0,015	73	190	30	110	0,098	2,18	1,10	0,228	0,167	0,198	3,6	0,013	10
МСК-500-1500	230	400	1250	0,014	64	159	28	60	0,078	2,11	1,03	0,178	0,132	0,158	2,6	0,010	10
МСК-82-4	230	30	93	0,049	7,9	26	38	2,8	0,108	2,23	1,11	0,258	0,173	0,316	1,28	0,003	20
МСК-83-4	230	50	154	0,033	8,8	26	52	4,6	0,081	2,08	1,03	0,21	0,143	0,171	1,57	0,003	20

1	2	3	4	5	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
МСК-91-4	230	75	235	0,035	9,0	25	80	8,5	0,089	2,15	0,95	0,24	0,185	0,246	1,46	0,008	20
МСК-92-4	230	100	314	0,03	9,0	27	106	11,3	0,078	2,16	0,96	0,2	0,176	0,217	0,64	0,014	20
МСК-102-4	230	150	467	0,03	54	152	22	24	0,074	1,99	1,05	0,19	0,124	0,136	1,6	0,008	20

- Примітка. 1. Активний опір якоря дано у відносних одиницях при 75 °С.
2. Обмотки якоря в генераторах на 400 В з'єднані зіркою ($U_{\text{лн}} = \sqrt{3} U_{\text{фн}}$; $I_{\text{лн}} = I_{\text{фн}}$).
3. Обмотки якоря в генераторах на 230 В з'єднані по схемі трикутник ($U_{\text{лн}} = U_{\text{фн}}$; $I_{\text{лн}} = \sqrt{3} I_{\text{фн}}$).
4. Активний опір обмотки збудження при $t_1 = 120$ °С знаходимо по формулі: $r_f = U_{\text{фн}} / I_{\text{фн}}$. Активний опір при температурі t_2 можна визначити по формулі:

$$r_{f2} = r_f \frac{1 + \alpha(t_2 - t_0)}{1 + \alpha(t_1 - t_0)},$$

- де $\alpha = 4,26 \cdot 10^{-3}$ 1/град. – температурний коефіцієнт опору міді; $t_0 = 20$ °С.
6. Струм збудження генератора в режимі номінального індуктивного навантаження ($\cos(\varphi) = 0,2$) приблизно можна взяти на 15% більше номінального струму збудження: $I_{\text{зн}} = 1,15 I_{\text{зн}}$.
5. Індуктивні опори реакції якоря по подовжній і поперечній осям: $x_{ad} = x_d - x_s$; $x_{aq} = x_q - x_s$.
7. Стандартна характеристика холостого хода у відносних одиницях

$I_s / I_{\text{экс}}$	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,00	3,5
$U / U_{\text{фн}}$	0,58	1,0	1,21	1,33	1,4	1,46	1,51

Визначення коренів кубічного рівняння
Кубічне рівняння з дійсними коефіцієнтами:

$$a_0 x^3 + a_1 x^2 + a_2 x + a_3 = 0,$$

де a_0, a_1, a_2, a_3 — деякі дійсні числа.

Кубічне рівняння заміною $x = (y - a_1/(3a_0))$ приводиться до неповного кубічного рівняння відносно y :

$$y^3 + d y + q = 0,$$

$$\text{де } d = -\frac{1}{3} \left(\frac{a_1}{a_0} \right)^2 + \frac{a_2}{a_0}; \quad q = 2 \left(\frac{a_1}{3 a_0} \right)^3 - \frac{a_1 a_2}{3 a_0^2} + \frac{a_3}{a_0}.$$

Корені y_1, y_2, y_3 неповного кубічного рівняння обчислюються по формулі Кардано:

$$y_1 = A + B; \quad y_{2,3} = -\frac{A+B}{2} \pm i \frac{A-B}{2} \sqrt{3}$$

$$\text{де } A = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}}; \quad B = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}}; \quad Q = \left(\frac{d}{3} \right)^3 + \left(\frac{q}{2} \right)^2.$$

Знаючи y , можна визначити корені вихідного кубічного рівняння:

$$x = y - \frac{a_1}{3 a_0}.$$

ЗМІСТ

1. Загальні відомості по системах автоматичного регулювання напруги суднових синхронних генераторів	3
2. Система автоматичного регулювання збудження синхронних генераторів типу МСК	4
3. Розрахунок системи фазового компаундування без коректора напруги	8
3.1. Теоретичне обґрунтування	8
3.2. Розрахункові формули, що зв'язують основні параметри	14
3.3. Розрахунок системи фазового компаундування виходячи зі сталих режимів синхронного генератора	21
4. Математичне описання синхронного генератора і статичного навантаження	27
5. Методика аналізу статичної стійкості автономної електроенергетичної системи	29
6. Розрахунок статичної стійкості роботи синхронного генератора на потужну мережу	31
7. Аналіз стійкості роботи на активно-індуктивне навантаження синхронного генератора, що регулюється за принципом фазового компаундування	35
ЛІТЕРАТУРА	42
Додаток А	43
Додаток Б	45

Навчальне видання

ПОДИМАКА Валерій Іванович
НОВОГРЕЦЬКИЙ Сергій Миколайович

**ПРОЕКТУВАННЯ АВТОМАТИЧНОГО
РЕГУЛЯТОРА ЗБУДЖЕННЯ СУДНОВОГО
СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА**

Методичні вказівки

(українською мовою)

Комп'ютерна верстка *В.Г. Мазанко*
Коректор *М.О. Паненко*

Свідectво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру видавців,
виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції
ДК № 2506 від 25.05.2006 р.

Підписано до друку 18.07.07. Папір офсетний. Формат 60×84/16.
Друк офсетний. Гарнітура "Таймс". Ум. друк. арк. 2,7. Обл.-вид. арк. 2,9.
Тираж 100 прим. Вид. № 14. Зам. № 183. Ціна договірна

Видавець і виготівник Національний університет кораблебудування,
54002, м. Миколаїв, вул. Скороходова, 5

ДЛЯ ПОДАТОК

This image shows a single sheet of white paper with horizontal ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are no margins, text, or other markings on the paper.