

621.313

21.06

У25

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОДИНАМІКИ

Д 26. 184.01

УГЛОВ Анатолій Вікторович

УДК 621.313.67

13221

У25

**УПРАВЛІННЯ ВМІКАННЯМ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА
НА ПАРАЛЕЛЬНУ РОБОТУ З ПОТУЖНОЮ МЕРЕЖЕЮ**

Спеціальність 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

X

Київ – 2006

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі експлуатації електричних станцій електротехнічного факультету Севастопольського національного університету ядерної енергії та промисловості Міністерства палива та енергетики України, м. Севастополь.

Науковий керівник

- доктор технічних наук, старший науковий співробітник Лісник Володимир Якимович, провідний науковий співробітник відділу електромеханічних систем Інституту електродинаміки НАН України.



Офіційні опоненти:

Доктор технічних наук, професор Кузьмін Віктор Володимирович, директор з наукової роботи ДП "Електроважмаш" Міністерства енергетики України, м. Харків;

Доктор технічних наук, доцент Жук Олександр Кирилович, доцент кафедри теоретичної електротехніки та електронних систем Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова, м. Миколаїв.

Провідна установа

- Національний гірничий університет МОН України (кафедра електропостачання), м. Дніпропетровськ.

Захист дисертації відбудеться "21" 06 2006 р. об 11⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.187.01 в Інституті електродинаміки НАН України за адресою: 03680, Київ-57, проспект Перемоги, 56, тел. 456-91-15.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Інституту електродинаміки НАН України.

Авт:

Вчєр
спєц

вєць



ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Вступ. Режим паралельної роботи синхронних генераторів (СГ) з енергетичною системою (ЕС) пов'язаний з необхідністю виконання процесу синхронізації СГ і ЕС при вмиканні генератора на паралельну роботу. Сучасні пристрої точної синхронізації з метою забезпечення умов збігу напруг СГ \underline{U}_g і ЕС \underline{U}_c по фазі при вмиканні СГ на паралельну роботу здійснюють синхронізацію з різницею частот СГ і ЕС і видають управляючу дію на вмикання привода вимикача СГ з випередженням моменту часу збігу по фазі векторів \underline{U}_g і \underline{U}_c на величину власного часу вмикання вимикача. Через складність процесу синхронізації в реальних умовах вмикання СГ на паралельну роботу практично завжди відбувається при деякому куті зсуву між векторами \underline{U}_g і \underline{U}_c , який позначається δ_0 і має назву кут вмикання. Навіть сучасні, достатньо досконалі автоматичні пристрої точної синхронізації не забезпечують рівність нулю кута δ_0 . З цієї причини СГ після вмикання на паралельну роботу піддається динамічним діям різного рівня. На ці дії, які визначені наявністю δ_0 , накладаються дії, пов'язані з різницею частот і амплітуд напруг СГ і ЕС.

Практика виконання процесу синхронізації показує, що через складність і відсутність наглядності реальних процесів синхронізації до недоліків в роботі існуючих автосинхронізаторів слід віднести можливість попадання в явище (стан) «зависання». При настанні такого явища інструкції вимагають або перервати процес синхронізації і повторити його спочатку, або впливати на регулятор частоти обертання (РЧО) СГ з метою збільшення (зміни) різниці частот СГ і ЕС.

Актуальність теми. Робота присвячена подальшому дослідженню процесів, що відбуваються в комплексі «генератор – потужна енергосистема» при вмиканні СГ на паралельну роботу з енергосистемою. В даний час пристрої синхронізації, реалізуючі спосіб точної синхронізації, припускають похибку по куту вмикання і наявність значної величини частоти биття, що приводить до виникнення перехідного процесу із значними діями на СГ після його вмикання на паралельну роботу, що скорочує термін його технічної експлуатації та строки планових міжремонтних періодів. Аналіз існуючого стану питання показав, що усунення даних недоліків потребує пошук нових методів роботи пристроїв управління вмиканням СГ на паралельну роботу з потужною ЕС на основі ретельного дослідження процесу синхронізації. Таким чином, стає актуальною наукова задача розробки нових методів і алгоритмів роботи пристроїв управління вмиканням СГ на паралельну роботу з потужною ЕС, реалізуючих спосіб точної синхронізації та забезпечуючих вмикання СГ з мінімальними динамічними діями на його елементи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Напрямок досліджень, одержані наукові і практичні результати відповідають програмам і планам

науково-технічних робіт, направлених на розвиток народного господарства України: Національній енергетичній програмі «Основні напрями розвитку енергетики України на період до 2010 року»; «Комплексній програмі по розробці організаційно-технічних заходів щодо продовження терміну експлуатації АЕС України на період 2003-2010 р.р.» (ПМ – Д.008.178-04), затвердженої розпорядженням Кабінету Міністрів України 29 квітня 2004 року, №-263-р «Про затвердження програми робіт по продовженню терміну експлуатації діючих енергоблоків атомних станцій». За даними програмами робота виконувалася у порядку особистої ініціативи. В процесі виконання роботи автором дисертації були виконані теоретичні дослідження перехідних процесів при синхронізації і вмиканні СГ на паралельну роботу з потужною ЕС і на основі одержаних результатів розроблено новий принцип реалізації способу точної синхронізації, який забезпечує вмикання з мінімальними динамічними діями на його елементи, що, у свою чергу, сприяє продовженню ресурсу технічної експлуатації і збільшенню термінів міжремонтних періодів одного з основних елементів електричної станції – синхронного генератора. Крім того, одержані наукові і практичні результати використовуються при виконанні НДР СНУЯЕтаП «Математичні методи і інформаційні технології дослідження робастності управління, контролю і захисту електричних об'єктів» № ДР 0105U001358, де здобувачем запропоновано використання нових принципів і алгоритмів роботи пристроїв, що реалізують спосіб точної синхронізації при вмиканні СГ на паралельну роботу з потужною мережею. Одержані результати також використані при виконанні науково-дослідної роботи «Ефект» «Дослідження шляхів підвищення надійності і живучості корабельних електроенергетичних систем» Наукового центру Військово-морських сил України, інв. № - 610 ДСК Науковий центр Військово-морських сил України, де здобувачем запропоновано новий принцип реалізації точної синхронізації з попереднім контролем початкового кута підсумовування напруг, що синхронізуються.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є подальший розвиток теорії перехідних процесів, що виникають в комплексі «генератор – потужна енергосистема» після вмикання генератора на паралельну роботу способом точної синхронізації та розробка нових методів і алгоритмів роботи пристроїв управління вмиканням СГ на паралельну роботу з потужною ЕС, знижуючих рівень динамічних дій на його елементи після вмикання на паралельну роботу.

Для досягнення поставленої мети розв'язувалися наступні основні задачі:

- аналіз і оцінка принципів і алгоритмів роботи існуючих автосинхронізаторів в комплексі «генератор – потужна енергосистема», визначення вимог до автосинхронізаторів, які забезпечують мінімальну динамічну дію на перехідний процес синхронізації;

- розробка математичної моделі процесу синхронізації з урахуванням реальних значень параметрів синхронізації для розрахунку і аналізу поведінки функції напруги биття;
- розробка математичної моделі вмикання СГ на паралельну роботу з потужною мережею з метою оцінки впливу факторів синхронізації на динамічні дії в елементах генераторного агрегату і уточнення вимог до автосинхронізаторів нового типу;
- введення і обґрунтування узагальненого кількісного показника для оцінки якості перехідного процесу вмикання СГ на паралельну роботу залежно від факторів процесу синхронізації: кута вмикання і різниці частот, з метою визначення вимог до пристроїв управління вмиканням генератора на паралельну роботу;
- розробка і оптимізація принципу роботи автосинхронізатора, що забезпечує вмикання СГ на паралельну роботу з потужною ЕС способом точної синхронізації з мінімізацією динамічних дій на його елементи.

Об'єктом дослідження є процес вмикання СГ на паралельну роботу з потужною ЕС в комплексі «генератор – потужна енергосистема».

Предметом дослідження є методи і алгоритми управління процесом вмикання СГ на паралельну роботу з потужною ЕС способом точної синхронізації.

Методи дослідження. При вирішенні поставлених в дисертації задач використовувалися наступні методи дослідження:

- математичне моделювання процесу синхронізації СГ із застосуванням елементів теорії управління і автоматичного регулювання;
- математичний аналіз складних функцій та їх перетворення;
- фізичне моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

- вперше доведено, що функція напруги биття є просторовою функцією трьох аргументів: частоти биття, часу і початкового кута підсумовування напруг, а не просто подвоєною функцією синуса половиного значення кутової частоти биття, як вважалося раніше;
- запропоновано кількісний показник для оцінки якості вмикання СГ на паралельну роботу з потужною ЕС при порушенні як одного, так і декількох факторів синхронізації;
- вперше теоретично встановлено і запропоновано практично використовувати положення про те, що в умовах виникнення відомого явища «зависання синхронізації» можливе виконання всіх умов точного вмикання СГ на паралельну роботу, якщо попереднє підсумовування напруг СГ і ЕС почати у момент збігу їх по фазі;

- розроблено новий принцип реалізації способу точної синхронізації, забезпечуючий вмикання СГ на паралельну роботу з потужною ЕС без розрахунку кута (часу) випередження.

Обґрунтованість та вірогідність приведених в роботі положень і висновків підтверджена патентом України на спосіб синхронізації і автосинхронізатор, а також узгодженням теоретичних результатів з експериментальними даними на фізичній моделі електроенергетичної системи в лабораторії кафедри Експлуатації електричних станцій СНУЯЕтаП.

Практичне значення одержаних результатів полягає в наступному:

- одержані в роботі висновки, залежності і характеристики дозволили розробити новий принцип роботи пристроїв, які реалізують спосіб точної синхронізації з мінімумом динамічних дій на елементи генераторного агрегату;
- отримані в роботі вирази для ударних і сумарних моментів, що виникають при синхронізації, дозволяють більш достовірніше прогнозувати ресурс експлуатації потужного силового електрообладнання;
- у роботі запропонована методика розрахунку і прогнозування значень функції напруги биття залежно від факторів синхронізації, закону зміни частоти биття і початкового кута підсумовування напруг, що синхронізуються.

Результати дисертаційної роботи реалізовані в Науковому центрі Військово-морських Сил України в науково-дослідній роботі «Ефект» на тему «Дослідження шляхів підвищення надійності і живучості корабельних електроенергетичних систем», в Науково-виробничому об'єднанні «Імпульс-Мережа» для виготовлення пристроїв контролю початкового кута підсумовування напруг, що синхронізуються, а також, на кафедрі «Експлуатація електричних станцій» Севастопольського національного університету ядерної енергії та промисловості для студентів спеціальностей 7.090601 «Електричні станції» і 7.090603 «Електротехнічні системи електроспоживання» при вивченні дисциплін «Електричні машини» і «Електромагнітні перехідні процеси» і на кафедрі «Автоматизація електричних систем» для студентів спеціальності 7.090601 «Електричні станції» при вивченні дисципліни «Автоматизація електричної частини електричних станцій».

Використання результатів дисертації підтверджено відповідними документами.

Подальше практичне використання результатів дисертаційної роботи передбачається шляхом впровадження нового принципу роботи автосинхронізаторів, які реалізують спосіб точної автоматичної синхронізації, при розробці нових зразків автосинхронізаторів на Київському електроапаратному заводі і Чебоксарському електроапаратному заводі (Росія).

Особистий внесок здобувача. Наукові і практичні результати, викладені в дисертації, одержані здобувачем особисто. У наукових працях, опублікованих в спів-авторстві, особисто автору належить: [1] – математичний вираз для функції напруги биття в статичних режимах; [2] – дослідження поведінки функції напруги биття і отримання на його основі вимог до пристроїв, що реалізують спосіб точної синхронізації при вмиканні синхронного генератора на паралельну роботу з потужною мережею без динамічних дій; [4] – створення математичної моделі процесу синхронізації за різними умовами зміни частоти биття і кута вмикання; обґрунтування критерію оцінки якості вмикання синхронного генератора на паралельну роботу з потужною мережею при порушенні одного або декількох факторів синхронізації; [5] – теоретичне пояснення і експериментальне підтвердження явища «зависання» при здійсненні процесу синхронізації СГ на паралельну роботу з потужною мережею і пропозиція його практичного використання.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на Міжнародній конференції «Проблеми сучасної електротехніки» (м. Київ, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», 2004 р.); на міжнародних конференціях «Проблеми підвищення ефективності електромеханічних перетворювачів в електроенергетичних системах» (м. Севастополь, Севастопольський національний технічний університет, 2003-2004 р.); на наукових семінарах і конференціях професорсько-викладацького складу Севастопольського національного університету ядерної енергії та промисловості в 2000-2005 роках, на наукових семінарах Інституту електродинаміки Національної академії наук України в 2005 р.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 6 наукових праць, з яких чотири статті у фахових наукових виданнях, одна доповідь на Міжнародній науково-технічній конференції і один деклараційний патент на винахід.

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаної літератури і додатків. Загальний обсяг роботи становить 174 сторінки, у тому числі 111 сторінок основного тексту, 66 рисунків, 24 таблиці, список використаних джерел з 99 найменувань та 6 додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність і доцільність роботи, сформульовано мету та задачі наукового дослідження, наведено дані про зв'язок роботи з науковими програмами, викладено наукову новизну, практичне значення і реалізація результатів дисертаційних досліджень, наведено дані про їх апробацію, публікацію та впровадження.

У першому розділі виконано огляд літератури і аналіз процесу вмикання СГ на паралельну роботу з ЕС існуючими методами. Розглянуто алгоритми функціонування автосинхронізаторів, застосованих в даний час. Виконаний аналіз дозволяє стверджувати, що методи і алгоритми функціонування існуючих автосинхронізаторів, не забезпечують в повній мірі умов точної синхронізації, а вмикання СГ на паралельну роботу з потужною мережею відбуваються при наявності частоти биття f_s , відмінної від нуля. При наближенні f_s до нульового значення, тобто при наявності явища "зависання", вмикання СГ відбуваються при синфазній непаралельній роботі СГ і ЕС (при $\omega_s = 0$ і $u_s \neq 0$).

З цих причин вмикання СГ на паралельну роботу існуючими автосинхронізаторами здійснюється з кінцевою нерівністю куткових частот обертання $\omega_s \neq \omega_c$, що, також, як і наявність деякого кута вмикання δ_s , приводять до появи перехідного процесу після вмикання вимикача СГ і до динамічних дій в агрегаті.

В результаті зроблено висновок, що вказаний основний недолік існуючих моделей автосинхронізаторів, що реалізують спосіб точної синхронізації, приводить до появи електромагнітних і електромеханічних перехідних процесів після вмикання СГ на паралельну роботу, що викликають динамічні дії в елементах генераторних агрегатів, і, природно, знижують ресурс їх роботи.

Додатково показано, що в технічній літературі до теперішнього часу, не дивлячись на значну кількість публікацій по теорії вмикання СГ на паралельну роботу, недостатньо повно досліджені перехідні процеси, що виникають в СГ при цьому. Таке положення можна пояснити тим, що вказані дослідження виконані на основі аналітичних рівнянь, що не враховують багатьох факторів, і містять суттєві спрощення фізичних процесів, що протікають в СГ. У літературі не зустрічаються дослідження впливу різниці частот на показники якості перехідного процесу вмикання СГ на паралельну роботу з потужною мережею, відсутні порівняльні кількісні оцінки впливу двох факторів синхронізації: кута вмикання і різниці частот на динамічні дії в елементах генераторного агрегату.

У другому розділі виконано дослідження перехідних процесів неявнополосного СГ при порушенні як одного, так і декількох факторів синхронізації при його вмиканні на паралельну роботу з потужною енергосистемою методом прямого розв'язання системи диференційних рівнянь. Сформульовані основні вимоги до процесу синхронізації і пристроїв його реалізації щодо виконання умов вмикання СГ на паралельну роботу з мінімальними динамічними діями.

При складанні математичної моделі режиму прийняті рівняння СГ у формі Парка – Горева, рівняння потужної мережі і рівняння зв'язку при умовах:

$$U_c = \text{const}, f_c = \text{const}, U_d = U_c \cdot \sin \theta, U_q = U_c \cdot \cos \theta, x_{cs} = 0 \quad (1)$$

Для зручності аналізу перехідних процесів режиму вмикання СГ на паралельну роботу початкові рівняння перетворені до змішаної форми запису в потокощеплених обмотки збудження та демпферних контурів, а для обмотки статора – в струмах по осях d і q . Окрім цього, кутова частота обертання ω винесена з під знаку диференціювання, завдяки чому інтегрування системи диференціальних рівнянь відбувається у реальному часі. Остаточна математична модель режиму вмикання СГ на паралельну роботу з ЕС у відносних одиницях (кут θ – в радіанах) має вигляд (2).

$$\left. \begin{aligned} 1. \quad p\Psi_{rd} &= \frac{1}{T_{rd} \cdot D_3} \cdot (-\Psi_{rd} + q_2 \cdot \Psi_f - D_4 \cdot i_d); \\ 2. \quad p\Psi_{rq} &= (\mu_q \cdot x_q \cdot i_q - \Psi_{rq}) \cdot \frac{1}{T_{rq}}; \\ 3. \quad p i_d &= [\omega \cdot u_d - \frac{D_5}{T_f} \cdot u_f + D_8 \cdot \Psi_f - D_9 \cdot \Psi_{rd} + (D_{10} + R \cdot \omega) \cdot i_d - \\ &\quad - \omega \cdot v \cdot k_9 \cdot i_q - \omega \cdot v \cdot \Psi_{rq}] \cdot \frac{1}{D_6}; \\ 4. \quad p i_q &= [\frac{1}{T_{rq}} \cdot \Psi_{rq} - \omega \cdot U_q - (R \cdot \omega + \mu_q \cdot x_q \cdot \frac{1}{T_{rq}}) \cdot i_q + \\ &\quad + D_5 \cdot \Psi_f + D_6 \cdot i_d - D_7 \cdot \Psi_{rq}] \omega \cdot v \cdot \frac{1}{k_9}; \\ 5. \quad p\Psi_f &= \frac{1}{T_f} \cdot (u_f - F_1 \cdot \Psi_f - F_2 \cdot i_d + F_3 \cdot \Psi_{rd}); \\ 6. \quad p v &= (M_{пд} - M_M) \cdot \frac{1}{T_J}; \\ 7. \quad p\theta &= (1 - v) \cdot \omega, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

де $D_3 \dots D_{10}$, $F_1 \dots F_3$ і k_9 – постійні коефіцієнти параметрів СГ, одержані при перетвореннях; решта позначень – загальноприйнята.

У зв'язку з тим, що використовані в даний час вирази для розрахунків значень ударних струму і синхронізуючого моменту СГ не враховують складові від різниці частот обертання СГ і ЕС, в роботі запропоновано узагальнений критерій оцінки показників якості вмикання СГ на паралельну роботу з ЕС.

Запропонований критерій є інтегралом від модуля електромагнітного моменту СГ за часом перехідного процесу

$$DV = \int_0^{t_{nn}} |M_E| \cdot dt, \quad (3)$$

що дозволило розрахувати і оцінити показники якості вмикання СГ на паралельну роботу залежно від факторів синхронізації, як при окремому, так і при їх сумісній дії.

За допомогою одержаної математичної моделі (2) розраховано перехідні процеси вмикання неявнополюсних СГ потужністю від 6 до 1000 *MВт* на паралельну роботу з ЕС залежно від основних факторів процесу синхронізації - кута вмикання δ_0 і частоти биття f_s . Складено таблиці і побудовано графіки для параметрів режимів вмикання СГ на паралельну роботу з ЕС залежно від факторів процесу синхронізації.

Зразок розрахунку перехідних процесів при куті вмикання, рівному 0,2 *рад*, частоті биття 0,4 *Гц* показано на рис. 1.

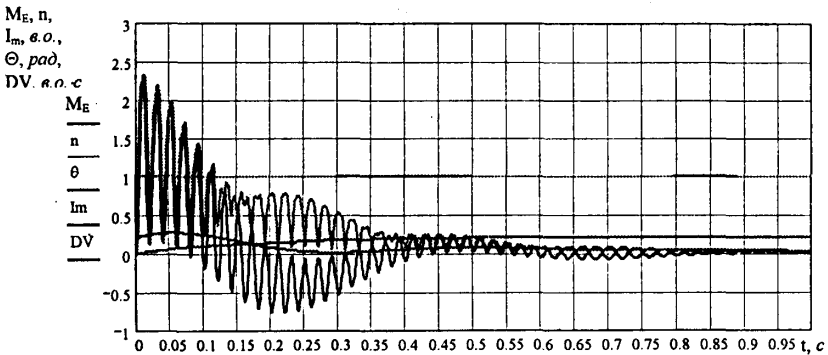


Рис. 1. Перехідний процес вмикання СГ Т-6-2УЗ на паралельну роботу при частоті биття 0,4 *Гц* і куті вмикання 0,2 *рад*

Використання запропонованого узагальненого критерію DV дозволило розрахувати і оцінити динамічні дії в елементах генераторного агрегату, і запропонувати його як показник зниження ресурсу експлуатації агрегату при вмиканні СГ на паралельну роботу, залежно від параметрів синхронізації, як при окремій, так і при сумісній дії.

Аналіз аналогічних розрахунків для досліджених в роботі ряду СГ дозволив запропонувати формулу для визначення сумарної динамічної дії в елементах генераторного агрегату при одночасній дії факторів синхронізації у вигляді:

$$DV_{\Sigma} = \sqrt{DV_f^2 + DV_{\delta}^2}, \quad (4)$$

де DV_f – динамічна дія від частоти биття; DV_{δ} – від кута вмикання.

Квадратична форма запису виразу (4) свідчить про незалежність один від одного інтегральних динамічних дій від частоти биття і кута вмикання.

Проведені дослідження дозволили зробити висновок про те, що із зростанням потужності СГ в діапазоні 500...800 *MВт* динамічна дія від кута вмикання обмежується по величині в наслідок зростання індуктивного опору статора. Динамічна дія пов'язана з частотою биття різко зростає через збільшення постійної часу агрегату і при потужності СГ, починаючи з 950 *MВт*, стає головним фактором якості вмикання СГ на паралельну роботу.

Проведені дослідження дозволили сформулювати основні вимоги до процесу синхронізації і пристроїв його реалізації за умов вмикання СГ на паралельну роботу з мінімальними динамічними діями. При точній синхронізації фактори синхронізації – кут вмикання і частота биття повинні знаходитися в межах:

$$0^\circ \leq \delta_a \leq 2^\circ \quad \text{і} \quad 0 \leq f_s \leq \pm 0,01 \text{ Гц} \quad (5)$$

При цьому значення ударного електромагнітного моменту не перевищуватиме 0,1 від номінального електромагнітного моменту, а сумарна інтегральна динамічна дія – не більш 0,02 *в.о.с.*

У третьому розділі виконано дослідження функції напруги биття з метою визначення можливості розрахунку і прогнозування її значень в реальних умовах зміни аргументів для подальшого використання при розробці нових принципів реалізації способу точної синхронізації, які дозволяють виконати умову (5). Перетворення рівняння для різниці напруг СГ і ЕС за умови рівності значення напруги СГ U_s і напруги ЕС U_c дає наступний вираз для функції напруги биття, що складається з трьох співмножників

$$u_s = 2 \cdot U_a \cdot \cos\left(\omega_{cp} \cdot t - \frac{\varphi_0}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\omega_s \cdot t}{2} + \frac{\varphi_0}{2}\right), \quad (6)$$

або в записі через частоту биття у відносних одиницях

$$u_s = 2 \cdot \cos\left(\omega_{cp} \cdot t - \frac{\varphi_0}{2}\right) \cdot \sin\left(\pi \cdot f_s \cdot t + \frac{\varphi_0}{2}\right). \quad (7)$$

Подальший аналіз функції напруги биття виконано за умови забезпечення нульового значення початкового кута підсумовування напруг ($\varphi_0 = 0^\circ$) і без урахування другого співмножника формули (7) за виразом

$$u_s = 2 \cdot \sin(\pi \cdot f_s \cdot t). \quad (8)$$

Методом математичного моделювання процесу синхронізації на підставі формули (8) в реальних діапазонах зміни частоти биття і часу побудовано графік просторових областей існування функції напруги биття, зображений на рис. 2.

Математична форма або область існування функції напруги биття складається з симетричних із зрушенням на 2π щодо площини $U_s = 0$ t_i синусоїдальних поверхонь, кожна з яких змінюється по гіперболічному закону в площині f_{si}, t_i і є симетричною щодо площини $f_s = 0, t_i$.

Очевидно, що в реальних умовах синхронізації функція напруги биття у вигляді різниці миттєвих значень напруг, що синхронізуються, визначатиметься математично твором співмножників за виразом (7), а фізично знаходитиметься в площині петрину синусоїдальних поверхонь, зображених на рис. 2, площиною f_{si}, t_i .

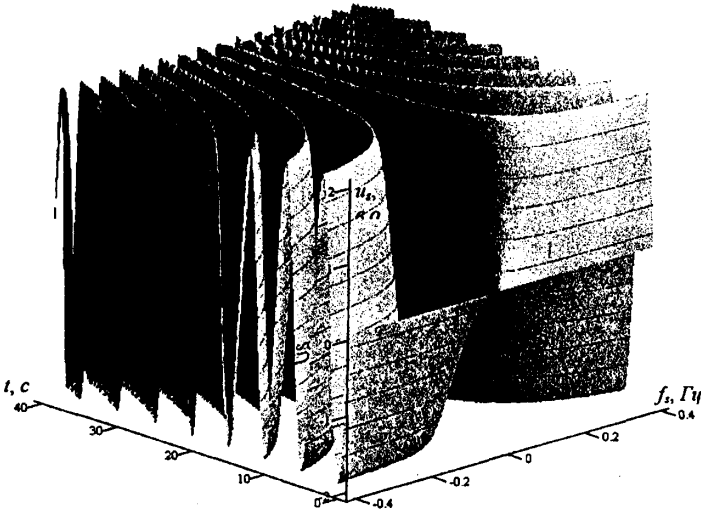


Рис. 2. Просторові області існування функції напруги биття при зміні частоти биття від мінус 0,4 до + 0,4 Гц в інтервалі часу 0=40 с

Нижче на рис. 3 наведено, одержані методом математичного моделювання, графік зміни частоти биття за законом лінійної рівноприскореної зміни частоти биття і відповідний йому графік функції напруги биття. Як видно з приведених рисунків, поведінка функції напруги биття є складною і визначається законом зміни частоти биття f_s в часі.

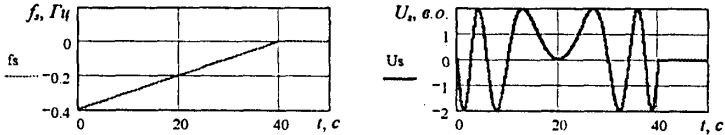


Рис. 3. Графіки зміни частоти биття і огинаючої функції напруги биття при лінійній рівноприскореній зміні частоти биття і $\varphi_0 = 0^\circ$

Введення в розгляд початкового кута підсумовування напруг, що синхронізуються, дозволило одержати математичні вирази для функції напруги биття в статичі і зробити висновок про те, що тільки при нульовому значенні початкового кута підсумовування і рівності нулю частоти биття функція напруги биття не має періодичної складової і завжди дорівнює нулю. Результати дослідження залежності функції напруги биття від початкового кута підсумовування напруг, що синхронізуються, представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

Функція напруги биття u_s в залежності від початкового кута підсумовування напруг φ_0 і при частоті биття $f_s = 0$

φ_0	Напруга биття, u_s	u_s при $f_s = 0$
0°	$2 \cdot U_a \cdot \sin(\pi \cdot f_s \cdot t) \cdot \cos(\omega_{cp} \cdot t)$	0
90°	$U_a \cdot [\sin(\pi \cdot f_s \cdot t) + \cos(\pi \cdot f_s \cdot t)] \cdot [\cos(\omega_{cp} \cdot t) + \sin(\omega_{cp} \cdot t)]$	$\sqrt{2} \cdot U_a \cdot \cos\left(\omega_{cp} \cdot t - \frac{\pi}{4}\right)$
180°	$2 \cdot U_a \cdot \cos(\pi \cdot f_s \cdot t) \cdot \sin(\omega_{cp} \cdot t)$	$2 \cdot U_a \cdot \sin(\omega_{cp} \cdot t)$
270°	$U_a \cdot [\sin(\pi \cdot f_s \cdot t) + \cos(\pi \cdot f_s \cdot t)] \cdot [\sin(\omega_{cp} \cdot t) + \cos(\omega_{cp} \cdot t)]$	$\sqrt{2} \cdot U_a \cdot \sin\left(\omega_{cp} \cdot t - \frac{\pi}{4}\right)$

Таким чином, на основі виконаного дослідження встановлено, що функція напруги биття є не просто подвоєною функцією синуса половинного значення кутової частоти биття, як вважалося раніше, а є складною просторовою функцією трьох аргументів: кутової частоти биття, часу і початкового кута підсумовування напруг, що синхронізуються. Фізично функція напруги биття є різницею миттєвих значень напруг, що синхронізуються, а математично – обмеженою по амплітуді синусоїдальними гіперболічними поверхнями в площині перетину цих поверхонь площиною, що описує закон зміни частоти биття в часі. Визначити і спрогнозувати значення функції напруги биття виявляється можливим, якщо відомі закон зміни частоти биття в часі і початковий кут підсумовування напруг, що синхронізуються. Розрахунок і

прогнозування значень функції напруги биття на просторовому графіку при рівноприскореній зміні частоти биття показано на рис. 4, а на рис. 5 – при експоненціальній.

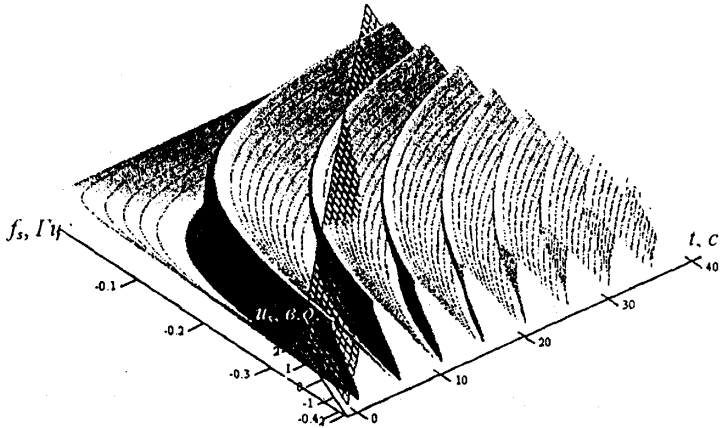


Рис. 4. Визначення значень функції напруги биття на просторовому графіку при рівноприскореній зміні частоти биття від мінус 0,4 до 0 Гц за час 40 с і початковому куті підсумовування напруг, що синхронізуються $\varphi_0 = 0 \text{ рад}$ (варіант рис. 3)

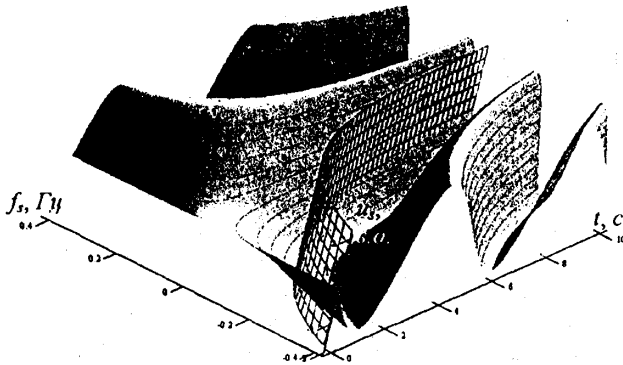


Рис. 5. Визначення значень функції напруги биття на просторовому графіку при експоненціальній зміні частоти биття від мінус 0,4 до 0 Гц за час 10 с і початковому куті підсумовування напруг, що синхронізуються $\varphi_0 = 0 \text{ рад}$

У четвертому розділі на підставі одержаних результатів аналізу функції напруги биття проаналізована точність розрахунку кута випередження найдосконалішими автосинхронізаторами АС-М і СПРИНТ. У роботі показано, що умови включення СГ на паралельну роботу згаданими автосинхронізаторами виконуються з недостатньою точністю тому, що зміна огинаючої напруги биття і, отже, розрахунок кута випередження для рівноприскореного руху частоти биття відбувається не по співвідношеннях, які використовуються в алгоритмі

$$\delta_{on} = \omega_{s0} t_{on} + a_s \frac{t_{on}^2}{2} \quad \text{і} \quad \delta = 2\pi - \delta_{on}, \quad (9)$$

а по взаємному розташуванню синусоїдальних поверхонь і площини, що описує закон зміни частоти биття в часі (див. рис. 4, 5).

На основі виконаних досліджень запропоновано і розроблено новий принцип реалізації точної синхронізації, відмінний тим, що завдяки інерційності ротора і наявності кінцевого часу перебування СГ в режимі «зависання», синхронізація здійснюється без розрахунку необхідного кута (часу) випередження. Якщо попереднє підсумовування почати в момент збігу напруг по фазі, то включення СГ на паралельну роботу можливо виконати по контролю нульового значення напруги биття і, отже, з мінімальними динамічними діями в елементах генераторного агрегату. Алгоритм роботи автосинхронізатора згідно запропонованого методу синхронізації показано на рис. 6.

Процес синхронізації СГ з потужною ЕС виконується автосинхронізатором наступним чином. Після включення автосинхронізатор здійснює підгонку частоти СГ до частоти ЕС і контроль кута між напругами СГ і ЕС. При зменшенні частоти биття до значення близько 0,2 Гц автосинхронізатор включає блок контролю підсумовування напруг, що синхронізуються, і у момент збігу їх по фазі ($\varphi_0 = 0^\circ$) починає їх підсумовування. У результаті подальша дія АРО турбоагрегату приводить до попадання генератора в режим «зависання» з точним виконанням умов вмикання СГ на паралельну роботу з ЕС. При одночасному виконанні двох умов: $U_s \leq 0,01$ в.о. (кут вмикання δ_s не перевищує 2°), і $f_s \leq 0,01$ Гц (період частоти биття не менше 100 с), автосинхронізатор формує сигнал на вмикання вимикача і завершення роботи. Процес автоматичної синхронізації контролюється оператором по інформаційно-діагностичному табло. Відмітною особливістю запропонованого алгоритму роботи автосинхронізатора є вмикання СГ на паралельну роботу з потужною ЕС з мінімальними динамічними діями і без обчислення, як часу, так і кута випередження вмикання комутаційного апарату, за допомогою якого здійснюється синхронізація.

Приведено результати експериментальних досліджень, виконаних на фізичній моделі електроенергетичної системи кафедри «Експлуатація електричних станцій»

СНУЯЕтаП по вмиканню СГ (малої потужності $P_2 = 2,5 \text{ кВт}$) на паралельну роботу з потужною енергосистемою ($S_{КТП} = 1000 \text{ кВ} \cdot \text{А}$).

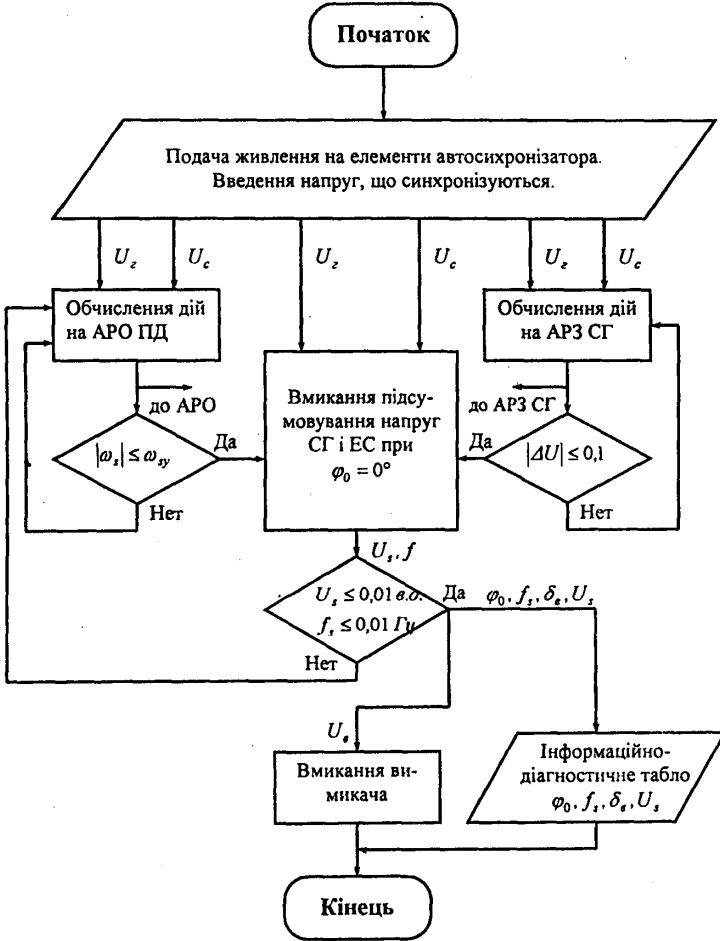


Рис. 6. Алгоритм роботи запропонованого автосинхронізатора

На осцилограмах, приведених в дисертаційній роботі, записані напруги мережі і СГ, напруга биття при різних варіантах зміни частоти биття за часом синхронізації, а також стан вимикача. Результати експериментальних досліджень вмикання СГ на паралельну роботу способом точної синхронізації по новому принципу його реалі-

зації показали ефективність, надійність і швидкодію запропонованого автосинхронізатора і підтвердили основні теоретичні результати, одержані в роботі.

У додатках наведені: програма і варіант розрахунку перехідного процесу вмикання СГ на паралельну роботу з ЕС; програма і варіант розрахунку напруги биття для рівноприскореного руху ротора СГ; програма і варіант розрахунку напруги биття для руху ротора СГ по експоненціальному закону; програма і варіант розрахунку напруги биття на просторовому графіку для експоненціального руху ротора СГ; програма і варіант розрахунку напруги биття на просторовому графіку для рівноприскореного руху ротора СГ; документи, що підтверджують практичне використання результатів, одержаних в дисертаційній роботі.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі по новому вирішена наукова задача управління вмиканням СГ на паралельну роботу з потужною мережею. Одержані в дисертації результати в сукупності складають істотний внесок в подальший розвиток теорії управління вмиканням СГ на паралельну роботу і дозволили запропонувати, розробити і оптимізувати новий принцип реалізації способу точної синхронізації, який забезпечує вмикання СГ на паралельну роботу з потужною ЕС з мінімальними динамічними діями на його елементи.

1. В результаті проведеного аналізу показано, що існуючі в даний час пристрої управління вмиканням СГ на паралельну роботу з потужною ЕС не забезпечують повною мірою виконання умов точної синхронізації, оскільки здійснюють вмикання генератора за наявності динамічних дій як на його елементи, так і на первинний двигун, що, у свою чергу, скорочує терміни міжремонтних періодів і технічної експлуатації генераторного агрегату.
2. Встановлено, що функція напруги биття є просторовою функцією трьох аргументів: кутової частоти биття, часу і початкового кута підсумовування напруг, що синхронізуються, а не просто подвоєною функцією синуса половинного значення кутової частоти биття, як вважалося раніше, що не давало повної картини зміни значень функції в реальних умовах синхронізації.
3. Для визначення вимог до пристроїв, які реалізують спосіб точної синхронізації, і кількісної оцінки впливу факторів синхронізації на якість вмикання СГ на паралельну роботу з електричною системою запропоновано узагальнений показник у вигляді інтегральної динамічної дії і на його основі проаналізовано вплив факторів синхронізації на якість перехідного процесу залежно від потужності генераторного агрегату як при окремій, так і при сумісній їх дії.

4. Запропоновано здійснювати вмикання синхронного генератора на паралельну роботу з потужною мережею способом точної синхронізації при появі відомого явища «зависання» без розрахунку кута (часу) випередження при умові, що попереднє підсумовування напруг, що синхронізуються, починається у момент збігу їх по фазі.
5. Запропоновано, розроблено, досліджено і оптимізовано новий принцип роботи пристрою синхронізації, який реалізує спосіб точної синхронізації і забезпечує синхронізацію при настанні явища «зависання» і вмикання СГ на паралельну роботу з потужною ЕС з мінімальними динамічними діями, як на його елементи, так і на елементи первинного двигуна.
6. Результати виконаних в дисертаційній роботі досліджень реалізовано в Науковому центрі ВМС України в НДР по дослідженню шляхів підвищення надійності і живучості корабельних ЕЕС; в НВО «Імпульс-Мережа» при виготовленні пристроїв контролю початкового кута підсумовування напруг, що синхронізуються; а також в СНУЯЕтаП в навчальному процесі для студентів зі спеціальностей 7.090601 «Електричні станції» та 7.090603 «Електротехнічні системи електроспоживання».
7. Подальше практичне використання результатів дисертаційної роботи передбачається шляхом впровадження нового принципу роботи автосинхронізаторів, що реалізують спосіб точної автоматичної синхронізації, при розробці нових зразків автосинхронізаторів на Київському електроапаратному заводі і Чебоксарському електроапаратному заводі (Росія).
8. Обґрунтованість та вірогідність приведених в роботі положень і висновків підтверджена узгодженням теоретичних результатів з експериментальними даними.

ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Углов А.В., Шощкий А.Н. Математический анализ формулы для напряжения биения синхронизируемых генераторов // Сб. научн. тр. Севастопольского национального института ядерной энергии и промышленности. – 2003. – Вып. 8. – С. 98 – 103.
2. Углов А.В., Шощкий А.Н. К вопросу о синхронизации синхронных генераторов электрических станций //Технічна електродинаміка. Темат. вип. “Проблеми сучасної електротехніки”.– 2004. – Ч. 2. – С. 43 – 48.
3. Углов А.В. Синхронизация и включение синхронных генераторов на параллельную работу // Сб. научн. тр. Украинского государственного морского технического университета. – 2005. – Вып. 1. – С. 129 – 136.

4. Углов А.В., Лесник В.А. Анализ переходных процессов при включении синхронного генератора на параллельную работу с энергосистемой // Сб. научн. тр. Севастопольского национального института ядерной энергии и промышленности. – 2004. – Вып. 13. – С. 273 – 281.
5. Декларацийний патент на винахід 70496А Україна, МКИ Н 03 L 5.02. Спосіб синхронізації синхронних генераторів і автосинхронізатор: Пат. 70496А Україна, МКИ Н 03 L 5.02 / Углов А.В. Заявл. 11.11.2003; опубл. 15.10.2004. Бюл. № 10. – 3с.
6. Никитин О.П., Шоцкий А.Н., Углов А.В. Анализ процесса синхронизации синхронных генераторов // Материалы международной научно-технической конференции «Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах». – Севастополь: Севастопольский национальный технический университет. – 2004. – С. 59 – 61.

АНОТАЦІЇ

Углов А.В. Управління вмиканням синхронного генератора на паралельну роботу з потужною мережею. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 “Електротехнічні комплекси та системи”. – Інститут електродинаміки НАН України, Київ, 2006.

Дисертація присвячена дослідженню процесу вмикання синхронного генератора на паралельну роботу з потужною мережею, а також розробці нових методів і алгоритмів управління процесом його вмикання, забезпечуючих мінімізацію динамічних дій на елементи генераторного агрегату при вмиканні на паралельну роботу з потужною мережею.

Запропоновано узагальнений кількісний показник оцінки якості перехідного процесу при вмиканні синхронного генератора на паралельну роботу і на його основі визначені вимоги до пристроїв, що реалізують спосіб точної синхронізації по куту вмикання і частоті биття. Вперше встановлено, що функція напруги биття є складнішою просторовою функцією трьох аргументів: кутової частоти биття, часу і початкового кута підсумовування напруг генератора і мережі, що дозволило практично використовувати відоме явище «зависання». На підставі одержаних результатів запропоновано нові методи та алгоритми роботи пристроїв точної синхронізації, забезпечуючі вмикання генератора при настанні явища «зависання» без обчислення кута (часу) випередження, точне виконання основних умов вмикання генератора на паралельну роботу. Обґрунтованість та вірогідність приведених в роботі положень і



висновків підтверджується узгодженням теоретичних результатів з експериментальними даними.

Ключові слова: автосинхронізатор, напруга биття, синхронний генератор, кут вмикання, частота биття..

Углов А.В. Управление включением синхронного генератора на параллельную работу с мощной сетью. – Рукопись.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы». – Институт электродинамики НАН Украины, Киев, 2006.

Диссертация посвящена исследованию процессов, происходящих в системе «синхронный генератор – мощная энергосистема» при включении генератора на параллельную работу с энергосистемой. В настоящее время устройства синхронизации, реализующие способ точной синхронизации, допускают ошибку по углу включения и наличие значительной величины частоты скольжения, что приводит к возникновению переходного процесса со значительными воздействиями на элементы конструкции генераторного агрегата после его включения. Таким образом, становится актуальной задача разработки новых методов и алгоритмов управления включением генератора на параллельную работу, обеспечивающих минимизацию динамических воздействий на него после включения.

Полученные в работе выводы, зависимости и характеристики позволили разработать и оптимизировать новый принцип работы устройства синхронизации, реализующий способ точной синхронизации и обеспечивающий синхронизацию при наступлении явления «зависание» без вычисления угла (времени) опережения и включение генератора с выполнением условий точной синхронизации в полной мере.

Для получения вышеуказанных результатов было выполнено исследование переходных процессов неявнополюсного синхронного генератора при включении его на параллельную работу с мощной сетью с нарушением одного или нескольких условий точной синхронизации путём решения системы дифференциальных уравнений, описывающих исследуемый режим. В качестве исходных уравнений при составлении математической модели режима приняты уравнения синхронного генератора в форме Парка – Горева, а также уравнения мощной сети и уравнения связи. Для удобства анализа переходных процессов исходные уравнения преобразованы для статорной обмотки – в токах по осям d и q , а угловая частота вращения вынесена из под знака дифференцирования, благодаря чему интегрирование системы дифференциальных уравнений производится в реальном времени. С целью определения допустимых значений факторов синхронизации, а именно, частоты скольжения и угла включения с помощью полученной математической модели рассчитаны

переходные процессы включения анализируемых неявнополюсных генераторов мощностью от 6 до 1000 МВт.

Предложен обобщённый показатель для оценки качества включения синхронного генератора в виде интегрального динамического воздействия, представляющего собой интеграл от модуля электромагнитного момента за время переходного процесса. Использование обобщённого показателя позволило рассчитать и оценить динамические воздействия в элементах генераторного агрегата, как при отдельном, так и при совместном воздействии факторов синхронизации: частоты скольжения и угла включения. Установлено, что при росте мощности синхронного генератора в диапазоне 500...800 МВт динамическое воздействие от угла включения ограничивается по величине, а динамическое воздействие от разности частот вращения резко возрастает и при мощности генератора, начиная с 950 МВт и выше, становится главным фактором качества переходного процесса включения синхронного генератора на параллельную работу с мощной сетью. Выполненные в работе исследования позволили сделать вывод о том, что включение синхронного генератора на параллельную работу с мощной электрической системой способом точной синхронизации с допустимыми динамическими воздействиями может быть обеспечено при угле включения не превышающем 2° и частоте скольжения не более 0,01 Гц. При этом значение ударного электромагнитного момента не будет превышать 0,1 о.е. от номинального электромагнитного момента, а суммарное интегральное динамическое воздействие – не более 0,02 о.е. с.

Впервые установлено, что функция напряжения биений является более сложной пространственной функцией трёх аргументов: угловой частоты биений, времени и начального угла суммирования напряжений генератора и сети, а не просто удвоенной функцией синуса половинного значения угловой частоты биений, как считалось ранее, что позволило практически использовать известное явление «зависание». Предложен, разработан, исследован и оптимизирован новый принцип работы устройства точной автоматической синхронизации, обеспечивающий включение синхронного генератора при наступлении явления «зависание» без определения угла (времени) опережения, точное выполнение основных условий включения генератора на параллельную работу и, следовательно, включение его с минимальными динамическими воздействиями на его элементы. Экспериментальными исследованиями подтверждена работоспособность разработанного принципа реализации способом точной синхронизации в условиях реальной синхронизации генератора с мощной сетью.

Результаты выполненных в диссертационной работе исследований реализованы в Научном центре ВМС Украины в НИР по исследованию путей повышения надёж-

ности и живучести корабельных ЭЭС, в НПО “Импульс-Сеть” для изготовления устройств контроля начального угла суммирования синхронизируемых напряжений, а также в СНУЯЭиП в учебном процессе для студентов по специальностям 7.090601 “Электрические станции” и 7.090603 “Электротехнические системы электропотребления”.

Обоснованность и достоверность приведённых в работе положений и выводов подтверждается согласованием теоретических результатов с экспериментальными данными.

Ключевые слова: автосинхронизатор, напряжение биений, синхронный генератор, угол включения, частота биений.

Uglov A.V. Control of synchronous generator switching on for parallel operation with a powerful network. – Manuscript.

The dissertation for a candidate degree of technical sciences of specialty 05.09.03 “Electrotechnical complexes and systems”. – Institute of Electrodynamics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2006.

The dissertation is devoted to further investigation of as well as development of new methods and algorithms of the generator switching on process control that ensure minimization of dynamic influences on generator unit elements during switching on for parallel operation with a powerful network. Generalized quality index for quality assessment of transient process during generator switching on for parallel work is proposed. Based on it the requirements for devices that realize the method of precise synchronization on switching on angle and sliding frequency. It is determined for the first time that beating voltage is more complicated spatial function of three arguments: angle beating frequency, time, and initial angle of voltage summation for generator and network. That allowed using practically the known hand-up phenomenon. Based on the results achieved new methods and algorithms for precise synchronization devices operation are proposed. Those methods ensure to switch on generator if hand-up phenomenon occurs without advance angle (time) calculation and precise execution of main conditions for generator switching on for parallel work.

Validity and reliability of provisions and conclusions shown in the work is confirmed by concordance of theoretical results and experimental data.

Keywords: auto synchronizer, beating voltage, synchronous generator, switching on angle, sliding frequency.

Підписано до друку 11.05.06 р. Формат 60х90/16
Папір офсетний. Формат видання 145х215 мм.
Умовн.-друк. аркуш. 0,89. Об.-вид. аркуш. 0,73.
Тираж 100 прим. Замова. 93.

Поліграф. дільн. Інституту електродинаміки НАН України
03680, Київ-57, проспект Перемоги, 56

