

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

**Малиш Олександр Миколайович**

УДК 621.316.

**СИНТЕЗ ПРИСТРОЇВ ПРИСКОРЕНОЇ АВТОМАТИЧНОЇ  
СИНХРОНІЗАЦІЇ ПІДВИЩЕНОЇ ТОЧНОСТІ ДЛЯ АВТОНОМНИХ  
СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ**

Спеціальність 05.14.02 - електричні станції, мережі і системи

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2005

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Харківському університеті Повітряних Сил,  
Міністерство оборони України, м. Харків.

Науковий керівник: Заслужений діяч науки і техніки України,

доктор технічних наук, професор

**Кононов Борис Тимофійович,**

Харківський університет Повітряних Сил, м. Харків,  
професор кафедри електропостачання.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор

**Жуков Станіслав Федорович,**

Донецький національний технічний університет,

м. Донецьк,

професор кафедри електроприводу та автоматизації  
промислових установок;

кандидат технічних наук, доцент

**Романченко Валентина Іванівна ,**

Харківський національний технічний університет сільського  
господарства ім. Василенка, м. Харків,

доцент кафедри електропостачання сільського господарства;

Провідна установа: Національний університет “Львівська Політехніка”,

кафедра електричних систем і мереж,

Міністерство освіти і науки України, м. Львів.

Захист відбудеться "06" 10 2005 р. О 14 год. 30 хв. на засіданні спеціалізованої  
вченої ради К 64.050.06 у Національному технічному університеті “Харківський  
політехнічний інститут” за адресою: 61002 м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного  
університету “Харківський політехнічний інститут”.

Автореферат розісланий "14" 07 2005 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради

Вепрік Ю.М.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Однією з найбільш відповідальних операцій під час вмикання синхронного генератора на паралельну роботу є його синхронізація. Незважаючи на велику практичну значимість цієї операції, інформація про засоби її реалізації дуже обмежена й у багатьох випадках становить комерційну таємницю. Це стримує прогрес у даній галузі, утруднює прийняття правильних рішень при проектуванні та не сприяє виключенню помилок під час проведення включень генераторів на паралельну роботу. В теперішній час для вирішення завдання вибору пристрою синхронізації та забезпечення потрібної якості електричної енергії в цьому процесі, проводять дорогі натурні експерименти, які не завжди дозволяють правильно вирішити поставлене завдання. Особливу важливість питання розробки синхронізаторів набуває сьогодні, коли має місце тенденція до децентралізації електропостачання, пов'язана із широким впровадженням автономних електроустановок. Прискорення синхронізації є дієвим засобом усунення можливих аварійних ситуацій в автономній енергосистемі, в якій низька точність при включенні генераторів та помилкові дії персоналу або пристроїв автоматики під час здійснення цього процесу можуть тільки погіршити стан. Основним напрямком удосконалення пристроїв автоматики енергосистем є підвищення їх технічних характеристик і надійності, впровадження сучасної елементної бази, запобігання можливості виникнення аварійних режимів. Пристроєм синхронізації, які застосовуються в даний час, у більшості випадків властива низька точність відпрацювання моменту подачі команди на вмикання генератора. У зв'язку з цим у системі електропостачання можливі провали напруги й кидки струму, що викликають збої в роботі основного обладнання, та можуть призвести до непоправних втрат. Процес синхронізації затягується, що, у свою чергу, ускладнює локалізацію негативних наслідків аварійних режимів. Науково-технічне обґрунтування умов прискорення процесу синхронізації й підвищення точності під час проведення цієї операції є важливою задачею та має велике практичне значення. Дослідження, спрямовані на розробку пристроїв прискореної синхронізації, які здатні забезпечити високу точність виконання її, є вкрай актуальними.

**Зв'язок роботи з науковими програмами.** Дисертаційні дослідження проводилися в рамках науково-дослідних робіт Харківського військового університету по темах “Безпека” і “Керівництво ” (план НДР), а також госпдоговірної науково-дослідної роботи із Санкт - Петербурзьким машинобудівним заводом “ Звезда”. У роботах здобувач був виконавцем окремих розділів.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дослідження є обґрунтування можливості створення пристроїв прискореної автоматичної синхронізації підвищеної точності для автономних систем електропостачання.

Для досягнення зазначеної мети необхідно було вирішити наступні окремі завдання дослідження:

- вивчити стан питання й з'ясувати причини затягування процесу синхронізації та низької точності визначення моменту подачі команди на вмикання вимикача генератора;
- вибрати та обґрунтувати спосіб прискорення процесу синхронізації, розробити математичну модель, що описує динаміку об'єкта, знайти постійні часу й коефіцієнти підсилення в диференціальних рівняннях;
- обґрунтувати можливість використання методу дискретних керуючих впливів й одержати аналітичні співвідношення для визначення моментів керуючих впливів та їх амплітуд, що забезпечують оптимальне за умовою швидкодії підведення дизель-генератора до стану, за якого можлива синхронізація;
- вибрати спосіб формування команди на включення вимикача генератора, розробити методику проектування пристроїв автоматичної точної синхронізації;
- розробити структурну схему пристрою синхронізації, створити макет запропонованого пристрою, визначити умови випробувань і провести натурні дослідження процесу та пристрою синхронізації, перевірити працездатність запропонованих технічних рішень.

*Об'єкт дослідження* – процес створення пристрою прискореної автоматичної синхронізації підвищеної точності.

*Предмет дослідження* – умови забезпечення прискореної синхронізації й підвищення точності визначення моменту формування команди на вмикання генератору.

*Методи дослідження.* Для рішення завдань дослідження використовувалися методи математичного моделювання на основі фундаментальних, основних законів теоретичної електротехніки, методи математичного аналізу, диференціального й інтегрального числення, теорії оптимального управління й системного аналізу. Коректність прийнятих рішень підтверджувалась результатами експериментальних досліджень.

**Наукова новизна результатів дослідження** полягає у тому, що:

- одержала подальший розвиток математична модель приводного двигуна, яка, на відміну від відомих моделей, враховує зміну рушійного моменту, обумовлену зміною тиску наддуву, пов'язаною зі зміною кількості повітря у

- впускному трубопроводі й кількості газу у впускному трубопроводі, в якій постійні часу й коефіцієнти підсилення визначені шляхом обробки експериментально знятих частотних і перехідних характеристик;
- вперше запропоновано метод дискретних керуючих впливів й отримані аналітичні співвідношення для керування динамічними системами, які описуються диференціальними рівняннями другого й третього порядків та відрізняються тим, що переключення вхідних впливів вибираються в моменти часу, коли помилка між дійсним і необхідним значенням фазової координати та її перша й друга похідні дорівнюють нулю;
  - набув подальшого розвитку метод проектування пристроїв синхронізації, відповідно до якого процес проектування представляється процесом переробки інформації, під час якого в інформаційній моделі системи здійснюється множина переходів від вихідного стану до кінцевого, а оператор переходів вибирається з множини функцій приналежності, що є суб'єктивною мірою виконання тієї або іншої альтернативної процедури.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає в тому, що на їх основі можливо здійснити проектування пристроїв автоматики, розробити пристрої синхронізації синхронних генераторів та регулятори частоти обертання дизель-генераторів. Впровадження запропонованих пристроїв дозволить уникнути шкідливих для джерел і споживачів наслідків збурень, що можуть бути викликані низькою точністю відпрацювання команди на включення вимикача генератора.

Результати дослідження впроваджені в ОКБ ХЕМЗ (м. Харків) у технічному проекті теми: “Розробка дослідного зразка енергомодуля для модернізованої радіолокаційної системи посадки РСП-6МЗ “Світязь-А” та у державному науково-виробничому підприємстві “Метенергомаш” (м. Харків) у розробках: Методика проектування пристроїв синхронізації в технічному проекті за темою: “Автономний енергоцентр на базі двигуна 11ГД 100 М”. Макет пристрою синхронізації на випробувальному стенді підприємства. Регулятор частоти обертання на двигуні 11ГД 100 М. Результати дослідження впроваджені Харківським військовим університетом у навчальному процесі в дисципліні “Автоматизація та релейний захист у системах електропостачання” під час проведення лекційних занять на тему №6 “Синхронізація в системах електропостачання” та під час проведення лабораторного заняття “Дослідження пристрою синхронізації”.

**Особистий внесок здобувача** полягає в наступному: запропоновані рівняння зв'язку для узагальненої системи координат між генераторами, які вмикаються на паралельну роботу; запропоновано у диференціальних рівняннях синхронного

генератора використовувати потокозчеплення замість струмів; запропоновано закон керування динамічною системою, знайдено моменти переключення й співвідношення для керуючих впливів; обґрунтовано вибір способу формування команди на вмикання вимикача генератора; запропоновано метод проектування пристроїв синхронізації.

### **Апробація результатів дисертації.**

Результати досліджень доповідалися на науково-технічній конференції молодих вчених Харківського військового університету (Харків, 2002р.); на II науково-технічній конференції молодих вчених Харківського військового університету (Харків, 2004р.), на I науково-технічній конференції Харківського університету Повітряних Сил, (Харків 2005г.) на науково-технічних семінарах кафедри електропостачання Харківського військового університету.

**Публікації.** За матеріалами дисертації опубліковано 7 статей у фахових виданнях ВАК України.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновку. Повний обсяг дисертації вміщує 165 сторінок, з них 22 ілюстрації по тексту, 31 – на 31 сторінці; 5 таблиць по тексту, 8 – на 8 сторінках, 115 найменувань використаних літературних джерел містяться на 12 сторінках, 3 додатки на 3 сторінках.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми досліджень, сформульовано мету і завдання дисертації, показано зв'язок роботи з науковими темами і програмами, наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, визначено особистий внесок автора в друкованих працях зі співавторами, наведено дані про апробацію, публікації та впровадження основних результатів роботи.

**У першому розділі** розглянуто основні характеристики автономних систем електропостачання. Наведені вимоги до автономних систем електропостачання, так, у складі системи зовнішнього електропостачання передбачається наявність не менш двох незалежних джерел енергії. Не менш двох джерел повинно бути й у складі резервної системи електропостачання. Природно, що для забезпечення електропостачання електроспоживачів категорії 1А повинна бути виключена можливість розриву синусоїди напруги живлення. Показано, що в системі внутрішнього електропостачання автономної системи необхідно мати установки гарантованого живлення.

У розділі наведено огляд літератури за темою досліджень, на підставі якого зроблений висновок про те, що незважаючи на значущість і фундаментальність робіт, які проведені у цьому напрямку, в них не розглядалися питання керування регулятором частоти приводного двигуна для прискореного підведення генератора до підсинхронного стану. Більшість робіт, як правило, носять описовий характер й у них немає матеріалів, з узагальненнями й рекомендаціями, на підставі яких було б можливо здійснити синтез пристрою синхронізації й запропонувати методику проектування таких пристроїв. Обґрунтовані напрямки досліджень.

У **другому розділі** наведені умови, за яких можлива синхронізація генераторів, які вмикаються на паралельну роботу, та показано, що для цього слід забезпечити відповідні значення таких параметрів синхронізації, як кут  $\delta$  напруг, які синхронізують, кутова частота ковзання  $\omega_s$  та нерівність амплітуд  $\Delta U$  напруг, які синхронізують.

Пристрій автоматичної точної синхронізації повинен забезпечувати формування команди на вмикання вимикача генератора за виконання умов:  $\delta \leq \delta_{\text{доп}}$ ;  $\omega_s \leq \omega_{s \text{ доп}}$ ;  $\Delta U \leq \Delta U_{\text{доп}}$ . У випадку, якщо  $\omega_s > \omega_{s \text{ доп}}$  й  $\Delta U > \Delta U_{\text{доп}}$ , пристрій синхронізації повинен забезпечити формування команд на вирівнювання кутових частот ковзання й вирівнювання амплітуд напруг, які потрібно синхронізувати. Для виконання перерахованих функцій до складу синхронізатора повинні входити блок контролю різниці напруг 1, блок контролю різниці частот 2, блок 3 контролю кута зсуву фаз між напругами, які потрібно синхронізувати, і логічний блок 4.

Блок контролю різниці частот є обов'язковим елементом пристрою автоматичної синхронізації. Вихідний сигнал цього блоку у випадку перевищення кутовою частотою ковзання припустимого значення використовується для керування регулятором швидкості 6 приводного двигуна Д и забезпечує вирівнювання частот напруг, які потрібно синхронізувати. У випадку перевищення кутовою частотою ковзання припустимого значення необхідно за допомогою регулятора швидкості 6 приводного двигуна Д вирівнювати частоти напруг, які синхронізуються. У випадку, коли  $\omega_s \leq \omega_{s \text{ доп}}$ , сигнал з виходу блоку 2 подається на логічний блок 4 і використовується для формування команди на вмикання вимикача Q генератора G. Процедура вирівнювання частот є однією з найбільш відповідальних процедур, які виконуються у процесі синхронізації. У ході цієї операції генератор, який вмикають, якнайшвидше повинен бути підведений до підсинхронного стану, тобто такого стану, в якому синхронізація буде можлива і завершиться успішно.

У розділі показано, що підведення генератора, який вмикають, до підсинхронного стану, є завданням оптимальної за швидкістю зустрічі двох об'єктів, що рухаються. Для підведення генератора до підсинхронного стану необхідно

здійснити цілеспрямований вплив на його регулятор швидкості обертання. При цьому для визначення закону зміни фазової координати  $\dot{\delta} = \omega$  необхідно мати рівняння руху ротора дизель-генератора. Для отримання цього рівняння використані рівняння рівноваги моментів приводного двигуна та турбокомпресора, рівняння балансу кількості повітря в тракті впуску та балансу кількості газу у вихлопному колекторі, рівняння газового стану та рівняння політропного процесу, який має місце при стиску повітря в компресорі. Після переходу до системи відносних одиниць отримана наступна система рівнянь, яка відповідає математичній моделі роботи дизеля:

$$\begin{aligned} T_d \frac{d\bar{\omega}}{dt} + k_d \bar{\omega} &= k_h \bar{h} + k_p \bar{P}_h - k_N \bar{N}; \\ T_r \frac{d\bar{\omega}_r}{dt} + k_r \bar{\omega}_r &= \bar{P}_r + \theta_h \bar{h} - \theta_n \bar{P}_h; \\ T_b \frac{d\bar{P}_h}{dt} + k_b \bar{P}_h &= \bar{\omega}_r - k_\omega \bar{\omega}; \\ T_r \frac{d\bar{P}_r}{dt} + k_r \bar{P}_r &= \bar{\omega} + \theta_r \bar{P}_h - \left( T_h \frac{d\bar{h}}{dt} + k_{hr} \bar{h} \right), \end{aligned} \quad (1)$$

де  $\bar{\omega}$ ,  $\bar{\omega}_r$  – відносні значення кутових частот обертання валів двигуна та турбокомпресора;

$\bar{h}$  – відносне переміщення рейки паливного насосу;

$\bar{P}_h, \bar{P}_r$  – відносне значення тиску наддуву та тиску газів;

$k_d, k_h, k_p, k_N, k_r, k_b, k_\omega, k_{hr}$  – коефіцієнти самовирівнювання двигуна, підсилення по каналу керування, підсилення по наддуву, підсилення по каналу збурення, самовирівнювання турбокомпресора, самовирівнювання випускного трубопроводу, впливу зміни частоти обертання на витрати повітря, підсилення, що враховує вплив зміни положення рейки паливного насосу на витрати газу, самовирівнювання впускного колектора;

$\theta_h, \theta_n, \theta_r$  – коефіцієнти підсилення по: каналу паливоподачі, тиску наддуву, тиску газів;

$T_d, T_r, T_b, T_r, T_h$  – постійні часу двигуна, турбокомпресора, впускного колектора та випускного колектора по каналам газового тракту та паливоподачі.

Розглянуто рішення задачі визначення величини коефіцієнтів, що входять у рівняння динаміки, на прикладі V-подібного дизеля, що є приводом явнополюсного синхронного генератора. Для експериментального визначення постійного часу, коефіцієнтів самовирівнювання й підсилення, що входять у



систему (1), достатньо обмежитися третім порядком вихідної системи рівнянь. Для такого дизеля отримані передатні функції по каналу керування  $W_{\text{упр}}$  та по каналу збурення  $W_{\text{возм}}$ , які надані у виді (2):

$$\begin{aligned} W_{\text{упр}}(P) &= \frac{b_1 p + b_2}{p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3}; \\ W_{\text{возм}}(P) &= \frac{b'_1 p^2 + b'_2 p + b'_3}{p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3}. \end{aligned} \quad (2)$$

Значення коефіцієнтів  $a_n$ ,  $b_n$ ,  $b'_n$  знайдено в ході експериментальних досліджень дизель-генератора типу ДГАС-500 шляхом обробки його частотних характеристик, які були зняті в режимі неробочого ходу та під навантаженням, яке складало 25, 50, 75, та 100% від номінального.

У процесі досліджень штатний регулятор частоти обертання дизель-генератора був замінений на електрогідравлічний регулятор частоти ЕРЧ-1500, на вхід якого був підключений низькочастотний генератор періодичних коливань. Результати обробки експериментальних досліджень та значення дійсної  $U_d(\omega)$  та уявної  $V_d(\omega)$  частотної характеристики наведені у табл. 1.

Для отримання коефіцієнтів  $a_n$  та  $b_m$  використовувались наступні рівняння:

$$\begin{aligned} b_2 + U_{d(\omega)} \omega^2 a_1 - U_{d(\omega)} a_3 + V_{d(\omega)} \omega a_2 &= V_{d(\omega)} \omega^3; \\ a_1 b_1 - U_{d(\omega)} a_2 + V_{d(\omega)} \omega^2 a_1 - V_{d(\omega)} a_3 &= -U_{d(\omega)} \omega^3. \end{aligned} \quad (3)$$

Результати розв'язання системи рівнянь (3) подані в табл. (2).

Визначення коефіцієнтів  $b'_n$  передатної функції по каналу збурення було виконано шляхом обробки перехідних характеристик, які були зняті при скиданні навантаження, відповідно 25, 50 та 100% від номінального. Для цього були використані залежність між постійними інтегрування  $S$ , коефіцієнтами  $b'_n$  та коренями  $\lambda$  передатної функції  $W_{\text{возм}}(p)$ , тобто залежність виду:

$$S_i = \frac{b'_1 \lambda_i^2 + b'_2 \lambda_i + b'_3}{\lambda_i (\lambda_i - \lambda_1) (\lambda_i - \lambda_2) (\lambda_i - \lambda_3)}. \quad (4)$$

Таблиця 1

Результати експериментального визначення дійсної та уявної частотних характеристик дизель-генератора ДГАС-500 по каналу регулювання частоти обертання.

Режим навантаження	$f = \frac{\omega}{2\pi}$ [Гц]	$-\gamma_d(\omega)$ [град]	$A_d(\omega)$ [о.е.]	$U_d(\omega) = A_d(\omega)\cos\gamma_d$ [о.е.]	$V_d(\omega) = A_d(\omega)\sin\gamma_d$ [о.е.]
Холостий хід	1	124	0,2665	-0,2490	-0,22000
	2	151	0,0850	-0,0743	-0,04120
	3	163	0,0389	-0,0372	-0,01140
	4	168	0,0217	-0,0212	-0,00450
	6	174	0,0095	-0,0094	-0,00099
	8	176	0,0052	-0,0052	-0,00036
25%	1	121	0,2445	-0,1241	-0,21070
	2	148	0,0816	-0,0692	-0,04320
	3	160	0,0370	-0,0356	-0,01300
	4	167	0,0213	-0,0208	-0,00480
	6	172	0,0093	-0,0092	-0,00130
	8	175	0,0052	-0,0052	-0,00045
50%	1	114	0,2106	-0,0857	-0,19240
	2	142	0,0776	-0,0611	-0,04780
	3	156	0,0372	-0,0341	-0,01480
	4	164	0,2100	-0,0202	-0,00590
	6	171	0,0092	-0,0091	-0,00140
	8	174	0,0051	-0,0051	-0,00053
100%	1	111	0,1914	-0,06860	-0,1787
	2	139	0,0739	-0,05580	-0,0485
	3	154	0,0361	-0,03240	-0,0158
	4	162	0,0205	-0,01950	-0,0063
	6	169	0,0090	-0,00880	-0,0017
	8	172	0,0050	-0,00495	-0,0007

Таблиця 2

Значення коефіцієнтів передатної функції  $W_{упр}(p)$

Режим навантаження	Коефіцієнт передатної функції				
	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$b_1$	$b_2$
Холостий хід	26.9244	164.5771	166.182	12.8791	307.3034
25% $P_{ном.}$	26.7352	175.5865	172.424	12.7082	289.8139
50% $P_{ном.}$	26.403	202.4459	180.1853	12.4481	270.8348
100% $P_{ном.}$	26.2138	213.4553	186.4273	12.2772	253.3454

Постійні інтегрування  $S_i$  за наявності лише дійсних коренів визначались наступним шляхом:

$$\eta(t) = S_1 e^{-\lambda_1 t} + S_2 e^{-\lambda_2 t} + S_3 e^{-\lambda_3 t}. \quad (5)$$

У випадку одного дійсного кореня та комплексно-спряжених полюсів використовувалось рівняння:

$$\eta(t) = S_1 e^{-\lambda_1 t} + e^{-\alpha t} (S_2 \cos \mu t + S_3 \sin \mu t), \quad (6)$$

де  $\eta(t)$  координата кривої перехідного процесу, яка змінюється у часі;  
 $\alpha, \mu$  – дійсна та уявна частини кореня.

Результати обробки перехідних характеристик подані в табл. 3

Таблиця 3

Значення коефіцієнтів чисельника передатної функції  $W_{д\text{возм}}(p)$

Режим навантаження	Коефіцієнт передатної функції		
	$-b'_1$	$-b'_2$	$-b'_3$
25% $P_{\text{ном.}}$	25.5481	44.6538	47.626
50% $P_{\text{ном.}}$	39.2941	213.4725	202.624
100% $P_{\text{ном.}}$	25.5481	147.848	142.243

Для розв'язання задачі про зустріч двох рухомих об'єктів, фазові координати  $\delta_A$  та  $\omega_A$  першого з них (працюючого генератора) визначаються з рівняння:

$$\delta_A = \delta_0 + \omega_A t. \quad (7)$$

Фазові координати  $\delta_B$  та  $\omega_B$  генератора, що вмикатимуть (об'єкта В), визначаються рівняннями (1), які подані у вигляді:

$$\frac{d^n \omega_B}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} \omega_B}{dt^{n-1}} + \dots + a_{n-1} \frac{d \omega_B}{dt} + \omega_B = b_1 \frac{d^m \eta}{dt^m} + \dots + b_m \eta, \quad (8)$$

де  $m < n$ .

На керування  $\eta$  накладено обмеження виду  $0 \leq \eta \leq \eta_{\text{max}}$ .

Для об'єднання рівнянь (7) та (8) введена координата  $X$ , яка визначається як  $X = \omega_B - \omega_A$ . Початкові умови задачі підведення генератора що вмикається, до підсинхронного стану за мінімальний час  $T$  мають вигляд:

$$x(0) = -\omega_A - \omega_{\text{ном}}; \quad x'(0) = x''(0) = \dots = x^n(0) = 0. \quad (9)$$

Кінцеві умови розв'язуваної задачі подані таким чином:

$$x(T) = \omega_{\text{спозр}}; \quad x'(T) = x''(T) = \dots = x^n(T) = 0, \quad (10)$$

де  $\omega_{\text{спозр}}$  – розрахункова частота ковзання, яка визначається з умови забезпечення потрібних показників якості електричної енергії та динамічної стійкості в процесі синхронізації.

Характер закону керування визначається розміщенням нулів та коренів. Усе розмаїття можливих варіантів такого розміщення являє собою лінійну комбінацію двох випадків, у першому з яких передатна функція має простий нуль та пару комплексних спряжених коренів, а в другому випадку передатна функція має

простий нуль, простий корінь та пару комплексно-спряжених коренів. У першому випадку передатна функція для розглядуваної задачі має вигляд:

$$W(p) = \frac{b_1 p + b_2}{p^2 + a_1 p + a_2} = \frac{b_1 p + b_2}{p^2 + 2\rho\omega_n + \omega_n^2}, \quad (11)$$

де  $\omega_n = \sqrt{a_2}$  - власна частота недемпфованих коливань;

$\rho = \frac{a_1}{2\sqrt{a_2}}$  - коефіцієнт демпфірування;

$\omega_0 = \omega_n \sqrt{1 - \rho^2}$  - власна частота демпфірованих коливань.

Реакція системи  $x(t)$  на кидок з амплітудою  $h_{\text{ном}}$  для першого випадку має вигляд:

$$x(t) = h_{\text{ном}} \left[ 1 - \frac{\omega_n}{\omega_0} e^{-\rho\omega_n t} \sin(\omega_0 t + \alpha) \right], \quad (12)$$

де  $\alpha = \arctg \frac{\omega_0}{\rho\omega_n}$ .

Помилка  $e'(t)$ , яка дорівнює різниці  $h - h(t)$  визначається з виразу:

$$e'(t) = h_{\text{ном}} \frac{\omega_n}{\omega_0} e^{-\rho\omega_n t} \sin(\omega_0 t + \alpha). \quad (13)$$

Швидкість зміни помилки  $e'(t)$  приймає нульові значення в моменти часу  $t$ , які визначаються з співвідношення:

$$t = \frac{\pi n}{\omega_0}, \text{ де } n=1,2,3,\dots \quad (14)$$

Зрозуміло, що, якщо хоча б в один з моментів часу помилку системи вдалось би зробити рівною нулю, то перехідний процес закінчився б та зміни фазової координати не було б. Вихід системи фізично не може змінитися миттєво, але на швидкість зміни входу, тобто на швидкість зміни управління обмеження не накладаються. Знайдено закон управління:

$$h = h_0 + (h_1 - h_0) \left( t - \frac{\pi}{\omega_0} \right), \quad (15)$$

де  $h_1$  – кінцеве положення рейки паливного насосу;

$h_0 = \frac{h_1}{1 + M(h)}$  – початкове положення рейки паливного насосу;

$M(h) = h e^{-\frac{\pi\rho}{\sqrt{1-\rho^2}}}$  - надлишкове регулювання. Для реалізації закону (15) необхідно

з початкового керування  $h_0$  в момент часу  $t = \frac{\pi n}{\omega_0}$  переключатись на керування  $h_1$ .

Для випадку, коли передатна функція має простий нуль, простий корінь та пару комплексно-спряжених коренів, показано, що перевід системи в кінцевий стан за мінімальний час буде досягнуто, якщо помилка системи, та її перша та другі похідні будуть дорівнювати нулю, де:

$$\begin{aligned} e(t) &= h_0 \cdot B [K e^{-p_1 t} + e^{-p_0 t} \sin(\omega_0 t + \Theta - \varphi + \alpha)] \\ \dot{e}(t) &= -h_0 \cdot B [P_1 K e^{-p_1 t} + \omega_n e^{-p_0 t} \sin(\omega_0 t + \Theta - \varphi)] \\ \ddot{e}(t) &= h_0 \cdot B [P_1^2 K e^{-p_1 t} + \omega_n e^{-p_0 t} \sin(\omega_0 t + \Theta - \varphi - \alpha)] \end{aligned} \quad (16)$$

$$\text{де } \alpha = \arctg \frac{\omega_0}{\rho \cdot \omega_n}; \quad \Theta = \arctg \frac{\omega_0}{Z - \rho \cdot \omega_n}; \quad \varphi = \arctg \frac{\omega_0}{P_1 - \rho \cdot \omega_n};$$

$$B = \frac{\sqrt{\omega_0^2 + (Z - \rho \cdot \omega_n)^2}}{Z} \cdot \frac{P_1}{\sqrt{\omega_0^2 + (P_1 - \rho \cdot \omega_n)^2}} \cdot \frac{\omega_n}{\omega_0}; \quad K = \frac{\frac{\omega_n^2 (Z - P_1)}{Z (\omega_n^2 + (P_1 - \rho \cdot \omega_n)^2)}}{\frac{\sqrt{\omega_0^2 + (Z - \rho \cdot \omega_n)^2}}{Z} \cdot \frac{P_1}{\sqrt{\omega_0^2 + (P_1 - \rho \cdot \omega_n)^2}} \cdot \frac{\omega_n}{\omega_0}}$$

$P_1, Z, \omega_n, \omega_0, \rho$  – знаходяться відповідно для значень  $a_n$  и  $b_m$ , які є коефіцієнтами рівняння (8).

Знайдено закон управління:

$$h = h_0 + (h_1 - h_0)(t - t_0) - (h_2 - h_0)(t_1 - t_0). \quad (17)$$

Перемикання треба виконати в моменти часу  $t_0 = \frac{\pi}{\omega_0}$  та  $t_1 = \frac{2\pi}{\omega_0}$ .

Значення  $h_0$  та  $h_1$  визначаються таким чином:

$$h_0 = \frac{h_1}{1 - \frac{e^{-2\pi p_1/\omega_0} - e^{-2\pi \rho \omega_n/\omega_0}}{e^{-\pi p_1/\omega_0} - e^{-\pi \rho \omega_n/\omega_0}}}; \quad h_1 = \frac{h_2}{1 - \frac{e^{-2\pi p_1/\omega_0} - e^{-2\pi \rho \omega_n/\omega_0}}{e^{-\pi p_1/\omega_0} - e^{-\pi \rho \omega_n/\omega_0}} - \frac{e^{-2\pi p_1/\omega_0} - e^{-2\pi \rho \omega_n/\omega_0}}{e^{-\pi p_1/\omega_0} - e^{-\pi \rho \omega_n/\omega_0}}}. \quad (18)$$

Для зміни подачі палива відповідно до знайденого співвідношення запропоновано доробити відому кінематичну схему регулятора частоти обертання, запровадивши в його склад електромагніт.

Регулятор містить підпружинений відцентровий датчик частоти обертання 1, виконавчий сервомотор 2 з поршнем 3 і золотником 4, механізм попереднього настроювання регулятора 5, орган зміни паливоподачі 6, електромагніт 7, пружинний демпфер 8, якір електромагніта 9, регульовальну голку 10, обмотку електромагніта 11, задатчик кутової частоти обертання 12, керований сигналами 13. У процесі роботи, керування органом паливоподачі 6 дизель-генератора

здійснюється виконавчим сервомотором, золотник 4 якого забезпечує перестановку поршня 3 при зміні умов рівноваги між рушійною силою відцентрового датчика частоти обертання й силами опору пружини. Введений до складу регулятора електромагніт, струм в обмотках якого змінюється задатчиком 12, дозволяє забезпечити зміну положення органа паливоподачі, оскільки сила, яка створюється в електромагніті, змінює умови рівноваги золотника. Пружинний демпфер перешкоджає виникненню коливального руху золотника, причому величина демпфуючої сили, а виходить, і стійкості процесу регулювання визначається як положенням регулювальної голки, так і величиною жорсткості пружинного демпфера. В розділі також запропоновано варіант системи керування у випадку використання електронного регулятора частоти обертання.

У **третьому розділі** розроблено метод проектування пристроїв автоматичної точної синхронізації, вибрано варіант формування команди на включення генератора способом точної синхронізації, обґрунтована структурна схема синхронізатора, розроблено макет пристрою синхронізації, та методика його настройки.

Показано, що першим етапом запропонованого методу проектування синхронізатора є етап вводу початкових даних та визначення мети, до якої слід прагнути. В подальшому приймаються рішення щодо способу синхронізації, способу вимірювання кута між напругами, які синхронізуються, способу вимірювання кутової частоти ковзання й способу формування команди на включення вимикача генератора. Після рішення цих задач складається структурна схема синхронізатора й формулюються часткові підзадачі, які пов'язані з отриманням імпульсних послідовностей зі зсувом по фазі синхронізованих напруг, затримкою імпульсних послідовностей, їх переносом, фіксацією моменту збігу фаз, контролем частоти ковзання й вибором моменту подачі команди на включення вимикача генератора. Під час розв'язання цих підзадач аналізуються альтернативні варіанти.

При цьому інформаційна модель процесу проектування може бути відображена у вигляді графа, вершини якого являють собою знання про створювану систему на даному етапі проекту. Дуги графа інтерпретуються як способи обробки знань. Набір альтернатив являє собою набір матриць.

$$\mu = \|\mu_n(t_i, t_k)\|, \quad (19)$$

де  $\mu(t_i, t_k)$  – функція приналежності, що розуміється як суб'єктивна міра виконання проектної процедури  $n(t_i, t_k)$ .

Індекси рядків відповідають індексам вхідних вершин графа  $t_i$ , а індекси стовпців - вихідним вершинам графа  $t_k$ . Рух по представленому графі здійснюється залежно від поставлених умов. При виборі способу формування команди на включення генератора способом точної синхронізації показано, перевагу слід віддати синхронізаторам, у яких команда на включення вимикача генератора подається з постійним часом випередження.

Проведено порівняння кінцево-різницевого, часового, імпульсного, дискретного способів отримання постійного часу випередження та методів зсуву по фазі однієї або обох синхронізованих напруг. Загальним для розглянутих способів є необхідність вимірювання та порівняння двох інтервалів часу (довжини відрізків), в зв'язку з чим можливо пропустити момент подачі команди на включення генератора. Це затягує процес синхронізації, що особливо небезпечно при малих кутових частотах ковзання.

У роботі показано, що виходячи з вимог точності та швидкодії, перевагу слід надати способу формування команди, який заснований на зсуві по фазі кожної із напруг які синхронізуються в бік відставання на кут, пропорційний ковзанню цієї напруги по відношенню до частоти, загальної для обох генераторів і більшої кожної з них.

У процесі розробки структурної схеми синхронізатора доведено, що практична реалізація такого способу отримання постійного часу випередження можлива у випадку використання в якості фазозсуваючого пристрою динамічних ланок першого порядку загального типу. Для зсуву по фазі напруг використані системи імпульсного фазового автопідстроювання частоти, що працюють у режимі утримання.

При цьому, оскільки система зсуває в бік відставання на більший кут напругу більшої частоти, у той час коли на більший кут повинна зсуватись напруга меншої частоти, для зсуву по фазі напруг  $U_1$  та  $U_2$  необхідно використовувати не кути  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$ , які отримані в системах фазової автопідстройки частоти, а їх доповнення до  $360^\circ$ .

Структурна схема синхронізатора, що реалізує запропонований спосіб отримання постійного часу випередження з використанням пристроїв імпульсного фазового автопідстроювання частоти.

Синхронізатор має два канали, кожний з яких містить пристрій імпульсного фазового автопідстроювання частоти та комутатор операцій (КО) із пристроєм переносу (ПП) для переходу від кутів  $\beta_1$  и  $\beta_2$  до кутів  $\alpha_1$  та  $\alpha_2$ . Пристрій імпульсного фазового автопідстроювання частоти кожного каналу складається з формувача імпульсів (ДФІ), керованого генератора імпульсів (УГІ) та імпульсного фазового детектора (ІФД).

Функції фіксації постійного часу випередження в момент збігу фаз зсунутих напруг контролю величини ковзання й видачу команди в коло керування вимикачем виконує вихідний вузол синхронізатора, що містить допоміжний імпульсний фазовий детектор (ВІФД), пристрій контролю додатного ковзання (УКДС), пристрій контролю від'ємного ковзання, логічну схему “або” та тиристорний ключ (КТ).

У процесі виконання досліджень перевірялась можливість реалізації запропонованих рішень. Для цього було розроблено макетний зразок пристрою синхронізації. Синхронізатор може бути використаний навіть для інерційних вимикачів із часом випередження, більшим 0,2с. Синхронізатор розраховувався з умови, за якою величина кута випередження може досягати  $720^\circ$ , тобто з умови, що максимальна частота ковзання  $f_{\text{max}}=4\text{Гц}$ . Синхронізатор запропоновано для роботи в системах електропостачання з частотою 50 Гц.

При цьому можливий діапазон зміни частот напруг які синхронізуються, дорівнює 48 - 52 Гц. Вхідні трансформатори синхронізатора виконані на напругу, яка дорівнює 230 В. Припустимий діапазон зміни напруги знаходиться в межах  $(0,8 - 1,2) U_{\text{ном}}$ .

Тривалість процесу синхронізації, яка визначається як час з моменту подачі живлення та вхідних сигналів на синхронізатор до моменту подачі команди на включення вимикача генератора, становить не більше 4-х періодів биття.

**У четвертому розділі** здійснено вибір силової частини обладнання стенду для випробування пристроїв синхронізації, вимірювального обладнання, а також виконано аналіз результатів натурних досліджень макета синхронізатора.

Під час розробки силової частини стенда був використаний лише один електромеханічний пристрій, який імітує генератор що, включають, оскільки в якості іншої синхронізуючої напруги можливо використати напругу зовнішньої мережі.

Тому в роботі для вимірювання частоти ковзання були використані два цифрових частотоміри, а для вимірювання кута використовувався формувач імпульсної послідовності напруг, які синхронізуються. У момент подачі команди синхронізатором частотоміри вимірювали миттєві значення не самих частот  $f_r$  й  $f_c$ , а величини їм зворотних періодів  $T_r$  й  $T_c$ , а частота  $f_s$  визначалася в такий спосіб:

$$f_s = f_c - f_r = \frac{T_r - T_c}{T_r T_c}. \quad (21)$$

Натурні випробування макета пристрою автоматичної точної синхронізації свідчать як на користь обґрунтованості обраних рішень по стенду для випробувань синхронізаторів, так і на користь запропонованого методу проектування пристроїв синхронізації.



Результати натурних досліджень підтверджують працездатність синхронізатора в обраному діапазоні частот ковзання від 0,1 Гц до 1,7 Гц (від 0,2% до 3,4%  $f_{ном}$ ).

## ВИСНОВКИ

В результаті виконаних досліджень у дисертації вирішена науково-практична задача обґрунтування умов прискорення процесу синхронізації й підвищення її точності для автономних систем електропостачання.

1. У відомій літературі з досліджуваної науково-практична задачі недостатньо матеріалів, за допомогою яких можливо здійснити синтез пристроїв синхронізації. Відсутні методики проектування таких пристроїв. Не опрацьовані питання, пов'язані з розв'язанням завдань керування приводним двигуном для скорочення часу його підведення до стану, за якого можлива синхронізація.
2. Встановлено порядок диференціального рівняння, що описує об'єкт регулювання, а відповідні постійні часу й коефіцієнти підсилення в цьому диференціальному рівнянні знайдені за результатами обробки його експериментальних частотних і перехідних характеристик.
3. Підведення генератора, який включають, у підсинхронний стан здійснено цілеспрямованим впливом на його регулятор частоти обертання. Для цього змінена конструкція регулятора та введено в його склад електромагніт.
4. Процес проектування синхронізатора представлено як процес накопичення знань про проектовану систему. Інформаційна модель процесу проектування відображена у вигляді графа, вершини якого являють собою знання про створювану систему на даному етапі проекту. Дуги графа інтерпретуються як способи обробки знань.
5. Розроблений пристрій синхронізації використовується для вимикачів з  $t_{вкл}=0,5с$  та  $f_{сдоп}=4Гц$ . При цьому припустиме відхилення за часом включення  $|\Delta t_{вкл}| \leq 0,04с$ .
6. Результати проведеного аналізу дозволили обґрунтувати вимоги до стенда випробувань синхронізаторів, запропонувати пристрої для вимірювання кута включення й часу випередження.
7. Натурні дослідження підтверджують достовірність отриманих у роботі наукових результатів. Результати натурних досліджень підтверджують працездатність синхронізатора в обраному діапазоні частот ковзання від 0,1 Гц до 1,7 Гц (від 0,2% до 3,4%  $f_{ном}$ ).
8. Теоретична значимість виконаних досліджень і отриманих наукових результатів полягає у подальшому розвитку систем керування, автоматики та захисту стосовно удосконалення наявного обладнання електроенергетичних

об'єктів та створення нових систем автоматики.

9. Практична значимість виконаних досліджень полягає в тому, що на їх основі можливо здійснювати проектування пристроїв автоматики, а впровадження розробленого пристрою дозволить уникнути шкідливих для автономних систем електропостачання наслідків збурень, які мають місце в разі затягування процесу синхронізації та низької точності відпрацювання команди на включення вимикача генератора.
10. Результати роботи використані в ОКБ ХЕМЗ (м. Харків) та у державному науково-виробничому підприємстві “Метенергомаш” (м. Харків); в навчальному процесі кафедри „Електропостачання” Харківського військового університету.

### **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Кононов Б.Т., Кусакин Ю.А., Малыш А.Н. Математическая модель процесса синхронизации в системе электроснабжения с совмещенными электрическими машинами.// Збірник наукових праць. Системи обробки інформації. НАНУ. вип. 1(17). – 2002. –С.219-224.  
*Здобувач обґрунтовує* необхідність переходу до об'єднаної системи координат.
2. Кононов Б.Т., Малыш А.Н. Обеспечение качества электрической энергии в процессе синхронизации.// Системи обробки інформації. Збірник наукових праць. ХВУ. –2002. – вип.4(20) –С.166-173.  
*Здобувач обґрунтовує* засоби забезпечення якості електричної енергії в процесі синхронізації.
3. Кононов Б.Т., Малыш А.Н. Новые способы получения постоянного времени опережения в устройствах точной синхронизации.// Системи обробки інформації. Збірник наукових праць. ХВУ. –2003. –вип.1 –С.174-182.  
*Здобувач виконав* аналіз існуючих та запропонував нові способи отримання постійного часу випередження.
4. Кононов Б.Т., Старостенко М.Б. Малыш А.Н. Синхронизатор с постоянным временем опережения.// Системи обробки інформації. Збірник наукових праць. ХВУ. –2003. –вип.2 – с.3-14.  
*Здобувачем запропонована* структурна схема пристрою синхронізації з використанням системи фазової автопідстройки частоти.
5. Кусакин Ю.А., Малыш А.Н. Проектирование устройств синхронизации.// Моделювання та інформаційні технології. Збірник наукових праць. Національна академія наук України. Інститут проблем моделювання в енергетиці. –2003. –К.: вип.22. –С.94-99.  
*Здобувач обґрунтував* методику проектування пристроїв самосинхронізації.
6. Малыш А.Н. Математическая модель дизель-генератора с турбонаддувом.// Системи обробки інформації. Збірник наукових праць. –Х.: ХВУ. -2004. –вип.1 –С.219-224.
7. Малыш А.Н. Пути совершенствования натуральных испытаний синхронизаторов.// Системи обробки інформації. Збірник наукових праць. –Х.: ХВУ. -2004. –вип.3 –С.124-133.

## АНОТАЦІЇ

**Малиш О.М. Синтез пристроїв прискореної автоматичної синхронізації підвищеної точності для автономних систем електропостачання.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.02 - Електричні станції, мережі і системи. Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, 2005.

Дисертація присвячена обґрунтуванню можливості створення пристроїв прискореної автоматичної синхронізації підвищеної точності. Прискорення синхронізації є діючим способом усунення можливих аварійних ситуацій в автономних енергосистемах, в яких низька точність при включенні генераторів та помилкові дії персоналу або пристроїв автоматики при здійсненні цього процесу можуть тільки погіршити стан.

Розроблена математична модель дизеля, яка описує динаміку дизеля з газотурбінним наддувом, являє собою ланку четвертого порядку. Постійні часу, коефіцієнти самовирівнювання й підсилення, що входять у рівняння динаміки дизель-генератора для різних режимів роботи й різних типів двигунів, визначені експериментально на прикладі V-подібного дизеля, що є приводом явнополюсного синхронного генератора.

Обґрунтована можливість використання методу дискретних керуючих впливів й одержані аналітичні співвідношення для визначення моментів керуючих впливів та їхніх амплітуд, що забезпечують оптимальне за умовою швидкодії приведення дизель-генератора до стану, при якому можлива синхронізація. Відповідне технічне рішення полягає в тому, що під час пуску дизель-генератора рейка паливного насоса повинна бути встановлена в положення, з якого до розрахункового моменту часу забезпечується вихід агрегату на номінальну частоту обертання, а в розрахунковий момент часу рейка паливного насоса повинна бути переведена на номінальну подачу палива. Розглянутий алгоритм реалізується за допомогою програмного пристрою, що впливає на керуючий золотник регулятора частоти обертання.

Макетний зразок пристрою синхронізації розраховувався з умови, за якою величина кута випередження може досягати  $720^\circ$ , тобто з умови, що максимальна частота ковзання дорівнює 4 Гц. Синхронізатор запропонований для роботи в системах електропостачання з частотою 50 Гц. При цьому можливий діапазон зміни частот напруг, що синхронізуються, дорівнює 48 - 52 Гц, а припустиме відхилення за часом включення не перевищує 0,04 с. Вхідні трансформатори синхронізатора виконані на напругу, яка дорівнює 230 В. Припустимий діапазон зміни напруги знаходиться в межах (0,8 - 1,2) від номінальної.

Натурні випробування макета пристрою автоматичної точної синхронізації свідчать на користь обґрунтованості обраних рішень як по стенду для випробувань синхронізаторів, так і для запропонованого методу проектування пристроїв синхронізації. Результати натурних досліджень підтверджують працездатність синхронізатора в обраному діапазоні частот ковзання від 0,1 Гц до 1,7 Гц (від 0,2% до 3,4% номінальної частоти).

У результаті виконаних досліджень у дисертації вирішена науково-практична задача обґрунтування технічних умов прискорення процесу синхронізації й підвищення точності під час проведення цієї операції.

**Ключові слова:** системи керування, моделювання систем автоматики та захисту, електроенергетичні об'єкти.

**Мальш А.Н. Синтез устройств ускоренной автоматической синхронизации повышенной точности для автономных систем электроснабжения.** – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 - Электрические станции, сети и системы. Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", Харьков, 2005.

Диссертация посвящена обоснованию возможности создания устройств ускоренной автоматической синхронизации повышенной точности. Синхронизация является одной из наиболее ответственных операций при включении синхронного генератора на параллельную работу. Ускорение синхронизации является действенным способом устранения возможных аварийных ситуаций в автономных энергосистемах, в которых низкая точность при включении генераторов и ошибочные действия персонала или устройств автоматики при осуществлении этого процесса могут только ухудшить состояние. Поэтому возникла необходимость реализации процесса ускоренной синхронизации и повышения точности определения момента формирования команды синхронизатором для исключения провалов напряжения и бросков тока в переходном процессе, вызванном включением генераторов на параллельную работу.

Разработанная математическая модель дизеля, описывающая динамику дизеля с газотурбинным наддувом, представляет собой звено четвертого порядка. Постоянные времени, коэффициенты самовыравнивания и усиления, входящие в уравнение динамики дизель-генератора для разных режимов работы и разных типов двигателей, определены экспериментально на примере V-образного дизеля, являющегося приводом явнополюсного синхронного генератора.

В диссертации обоснована возможность использования метода дискретных управляющих воздействий и получены аналитические соотношения для определения моментов управляющих воздействий и их амплитуд, которые обеспечивают оптимальное по условию быстрогодействия приведение дизель-генератора к состоянию, при котором возможна синхронизация. Соответствующее техническое решение заключается в том, что при пуске дизель-генератора рейка топливного насоса должна быть установлена в положение, при котором к расчетному моменту времени обеспечивается выход агрегата на номинальную частоту вращения, а в расчетный момент времени рейка топливного насоса должна быть переведена на номинальную подачу топлива. Рассмотренный алгоритм реализовывается с помощью программного устройства, которое влияет на управляющий золотник регулятора частоты вращения. Предложено доработать известную кинематическую схему регулятора частоты вращения, введя в его состав электромагнит.

Для этого был разработан макетный образец устройства синхронизации. Синхронизатор рассчитывался из условия, в соответствии с которым величина угла опережения может достигать  $720^\circ$ , т.е. из условия, что максимальная частота скольжения равняется 4 Гц. Синхронизатор предложен для работы в системах электроснабжения с частотой 50 Гц. При этом возможный диапазон изменения частот синхронизируемых напряжений равняется 48-52 Гц, а допустимое отклонение по времени включения не превышает 0,04 с. Входные трансформаторы синхронизатора выполнены на напряжение, равное 230 В. Допустимый диапазон изменения напряжения находится в пределах (0,8-1,2) от номинального.

Натурные испытания макета устройства автоматической точной синхронизации свидетельствуют в пользу обоснованности избранных решений как по стенду для испытаний синхронизаторов, так и по предложенной методике проектирования устройств синхронизации. Результаты натурных исследований подтверждают работоспособность синхронизатора в избранном диапазоне частот скольжения от 0,1 Гц до 1,7 Гц (от 0,2%

до 3,4% номинальной частоты).

В результате выполненных исследований в диссертации решена научно-техническая задача обоснования технических условий ускорения процесса синхронизации и повышения точности при проведении этой операции.

**Ключевые слова:** системы управления, моделирование систем автоматики и защиты, электроэнергетические объекты;

**Malysh A.N. Synthesis of accelerated automatic synchronization devices of the advanced accuracy for off-line electric-power supply systems.** - Manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of candidate of science (technology) on 05.14.02 speciality - Power plants, networks and systems. National Technical University "Kharkov polytechnic institute ", Kharkov, 2005.

The thesis is devoted to a substantiation of a possibility of creation of devices of the accelerated automatic synchronization of the advanced accuracy. Such devices are necessary for elimination of voltage undershootings and current inrushes in the transient caused by turning on of alternator on parallel operation.

The technique of designing of devices of automatic exact synchronization is developed. The possibility of use of a method of discrete control actions is justified and analytical parities for definition of the moments of control actions and their amplitudes which ensure optimum on a condition of speed reduction of the diesel-generator a condition at which synchronization is possible are obtained.

During realization of researches the possibility of realization of the offered solutions was mustered. For this purpose the model sample of the device of synchronization has been developed. The analysis of outcomes of natural researches of an experimental model of the synchronizer was carried out on specially developed stand test of devices of synchronization.

As a result of the carried out researches in a thesis the scientific and technical problem of a substantiation of specifications on a speed-up of process of synchronization and increase of accuracy is solved at conducting this operation.

**Keywords:** control systems, design of the systems of automation and protect, electroenergy objects.

Підписано до друку 12.07.2005 р.  
Формат 60x84 1/16. Папір газетний. Гарнітура Times New Roman.  
Друк RISO. Умовн. друк. арк. 0,9.  
Замовлення. № 621/05. Тираж 100 прим. Ціна договірна.

---

Видавництво ХНАДУ, 61200, м. Харків-МСП, вул. Петровського, 25

---

*Свідоцтво державного комітету інформаційної політики, телебачення та радіомовлення  
України про внесення суб'єкта видавничої справи до державного реєстру видавництв,  
виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції,  
серія ДК № 897 від 17.04.2002 р.*