

Б.Т. Кононов, М.І. Будур

Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

ШЛЯХИ ПРИСКОРЕННЯ ПРОЦЕСУ СИНХРОНІЗАЦІЇ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ВІЙСЬКОВИХ ОБ'ЄКТІВ

З'ясовуються шляхи прискорення процесу синхронізації синхронних генераторів систем електропостачання військових об'єктів, які засновані на відмові від дотримання умов ідеальної точної синхронізації та використання, при врахуванні інерційності вимикача генератора. Використання при можливості формування команди на вмикання вимикача генератора зонного принципу синхронізації. Відмова від дотримання умов ідеальної точної синхронізації дозволить зменшити час, що витрачається на приведення генератора, що вмикається, у стан, при якому можливо здійснювати підключення на паралельну роботу за рахунок збільшення можливих значень частот ковзання та кутів між напругами що синхронізуються. Перехід до зонного принципу синхронізації збільшує діапазон можливих кутів вмикання, що унеможливує процес команди на вмикання вимикача генератора. Пропонуються способи отримання постійного кута та постійного часу випередження для зонних синхронізаторів. Доводиться можливість побудови вимірювального блока пристроїв синхронізації на базі операційних інтегруючих підсилювачів. Використання в блоці вимірювання інтегруючих операційних підсилювачів дозволить уникнути суттєвих похибок, які притаманні вимірювальним блокам, в яких використовується диференціювання.

Ключові слова: точка синхронізації, параметри синхронізації, зонний синхронізатор, синхронізатор з постійним кутом випередження, синхронізатор з постійним часом випередження, прискорення ковзання, вимірювання частоти та прискорення ковзання.

Вступ

Постановка проблеми. Зростання в системах електроспоживання військових об'єктів питомої ваги електроприймачів першої категорії й підвищення вимог споживачів до якості електричної енергії, потребує резервування джерел електричної енергії та вдосконалення способів їх вмикання на паралельну роботу, таких як самосинхронізація, груба та точна синхронізація, особливо в частині зменшення часу, що витрачається на виконання цього процесу. Вмикання синхронних генераторів на паралельну роботу способом самосинхронізації дозволяє суттєво прискорити виконання цієї операції, але неминуче пов'язане з провалами напруги й кидками струмів, оскільки генератор вмикається незбудженим, що неприпустимо до споживачів, критичних до якості електричної енергії. Використання способу грубої синхронізації забезпечує як прискорення процесу вмикання синхронних генераторів на паралельну роботу, так і дотримання вимагаємої якості електричної енергії, але пов'язано з суттєвим ускладненням системи електропостачання та необхідністю використання додаткової струмообмежуючої та комутаційної апаратури.

Використання в системах електропостачання військових об'єктів способу точної синхронізації неминуче породжує свої проблеми, серед яких основою є проблема забезпечення необхідної швидкодії при вмиканні генераторів на паралельну роботу з

мережею або з іншим генератором. Успішне розв'язання зазначеної проблеми в значній мірі ускладнюється наслідками електромеханічних та електромагнітних перехідних процесів, що супроводжують процес точної синхронізації в випадку, якщо її умови відрізняються від ідеальних, при яких у джерел, що синхронізуються, напруги і частоти однакові, а кут зсуву за фазою між напругами дорівнює нулю.

Відмова від дотримання ідеальних умов точної синхронізації відкриває великі можливості прискорення процесу вмикання генераторів на паралельну роботу, але викликає збурення в системі електропостачання, які можуть бути неприйнятними для споживачів електричної системи. Таким чином, визначення допустимих умов забезпечення якості електричної енергії відхилень параметрів синхронізації від їх ідеальних значень, тобто визначення, $\omega_{s\delta on}$ та δ_{don} , й відповідне своєчасне визначення моменту подачі команди на вмикання генератора дозволить уникнути небажаних збурень та скоротити час, що витрачається на проведення синхронізації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Загальні питання, пов'язані з з'ясуванням особливостей протікання перехідних процесів під час вмикання синхронних генераторів на паралельну роботу, розглянуті в [1–7]. В [12–13; 15; 19–20] наведені математичні моделі, розрахункові співвідношення й методика визначення параметрів автоматичної точ-

ної синхронізації, за допомогою яких можливо знайти умови, виконання яких забезпечують прискорення процесу синхронізації. Питання, пов'язані з визначення моменту своєчасної подачі команди на вмикання вимикача генератора частково розглянуті в [1; 8–10; 17–18]. Разом з тим, в розглянутих працях питанням визначення умов й вимірювання та обчислення при цьому відповідних параметрів, котрі забезпечують прискорення процесу синхронізації, не приділено достатньої уваги.

Метою статті є з'ясування шляхів прискорення процесу синхронізації синхронних генераторів в системах електропостачання військових об'єктів й аналіз можливих технічних рішень, випровадження яких забезпечить успішність проведення синхронізації з забезпеченням при цьому стійких показників якості електричної енергії.

Виклад основного матеріалу

Під час проведення процесу синхронізації крім параметрів, що звичайно беруться до уваги, тобто крім допустимої неоднаковості напруги $\Delta U_{\text{дон}}$, допустимої частоти ковзання $\omega_{s\text{дон}}$ та допустимого кута зсуву за фазою напруги, що синхронізуються $\delta_{\text{дон}}$, слід враховувати час вмикання вимикача генератора $t_{\text{вмк}}$. Неврахування часу вмикання $t_{\text{вмк}}$ при синхронізації інерційності вимикача генератора приводить до суттєвих кутових помилок й появи значної напруги биття U_s , котра викликає збурення в системі електропостачання, пов'язані з значними кидками розрізнявальних струмів та провалами напруги на шинах розподільчих пристроїв електричних станцій системи електропостачання. Для зменшення й усунення впливу збурень, пов'язаних з неврахуванням інерційності вимикача генератора, пропонується подавати команду на вмикання вимикача генератора не в момент часу [1], коли напруги, що синхронізуються, співпадають за фазою, а з випередженням. При цьому розглядаються два способи випередження подачі команди на вмикання вимикача генератора: з постійним кутом випередження та з постійним часом випередження. В першому випадку кут випередження $\delta_{\text{вин1}}$ визначається таким чином

$$\delta_{\text{вин1}} = \omega_{s\text{розр}} \cdot t_{\text{вмк}}, \quad (1)$$

де $\omega_{s\text{розр}}$ – розрахункова кутова частота ковзання, значення якої, частіше за все, дорівнює $\frac{\omega_{s\text{дон}}}{2}$;

$t_{\text{вмк}}$ – час вмикання вимикача генератора.

У синхронізатора з постійним часом випередження кут випередження $\delta_{\text{вин2}}$ визначається таким чином

$$\delta_{\text{вин2}} = \omega_{s\phi} \cdot t_{\text{вмк}}, \quad (2)$$

де $\omega_{s\phi}$ – фактична кутова частота ковзання.

При проведенні синхронізації з постійним кутом випередження в випадку, коли фактична кутова частота ковзання $\omega_{s\phi}$ відрізняється від розрахункової частоти ковзання $\omega_{s\text{розр}}$, неминуче виникає кутова помилка $\Delta\delta$, яка дорівнює:

$$\Delta\delta = (\omega_{s\phi} - \omega_{s\text{розр}}) \cdot t_{\text{вмк}}, \quad (3)$$

та яка викликає небажані збурення в системі електропостачання.

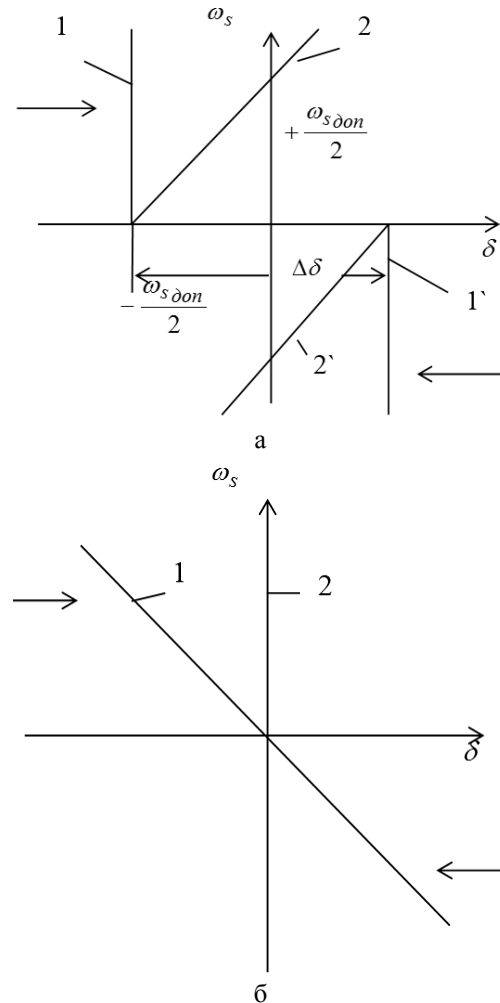


Рис. 1. Побудова ліній подачі команди 1,1' та ліній вмикання 2,2': а – у синхронізаторі з постійним кутом випередження; б – у синхронізаторі з постійним часом випередження

Рис. 1, побудований в координатах ковзання ω_s – кут δ , пояснює причину появи кутової помилки $\Delta\delta$ у синхронізатора з постійним кутом випередження, де цифрами 1 та 1' показана лінія подачі команди на вмикання вимикача генератора, а цифрами 2 та 2' показана лінія замикавання вимикача генератора, котра у синхронізаторі з постійним часом випередження співпадає з віссю ординат. Стрілоч-

ками на рис. 1 показані фазові траєкторії. Для зменшення кутової помилки у синхронізаторів з постійним кутом випередження можливий діапазон допустимих значень кутових частот ковзання $\omega_{\text{доп}}$ слід розбити на дві або декілька піддіапазонів й в кожному з них вибирати свій кут вмикання. Для отримання постійного кута випередження доцільно використовувати імпульсні послідовності, які сформовані на початку кожного періоду напруги, що синхронізуються, і мають постійну довжину кожного імпульсу τ . В зв'язку з тим, що частоти напруги, що синхронізуються, різні, імпульсні послідовності на протязі часу зсуваються одна відносно другої. При цьому імпульси більшої частоти своїм переднім фронтом, нібито насуваються на імпульси меншої частоти і в решті решт, передній фронт імпульсів більшої частоти співпадає з заднім фронтом меншої частоти. В цей момент часу й подається команда з постійним кутом випередження. Для з'ясування можливості вмикання за умовою допустимого значення кутової частоти ковзання слід підрахувати кількість співпадінь імпульсів більшої частоти з імпульсами меншої частоти, використовуючи для цього крім основних імпульсів постійної тривалості, допоміжні імпульси постійної тривалості, жорстко прив'язані к заднім фронтам основних імпульсів. Перед співпадінням основних імпульсів мають місце співпадіння основних імпульсів більшої частоти з допоміжними імпульсами меншої частоти, що слід використовувати для визначення кутової частоти ковзання.

Для отримання постійного часу випередження можливо порівнювати постійні значення напруги биття та її похідної, порівнювати значення поточного і розрахункового кутів зсуву за фазою, зсувати за фазою в бік відставання напруги більшої та меншої частот, затримувати імпульсні послідовності жорстко прив'язані до синусоїд напруги мережі та генератора, визначити час вмикання на початку періоду биття, вимірювати після цього інтервал часу до середини періоду биття й переносити виміряний відрізок часу на другу половину періоду биття. В випадках, коли тривалість періоду биття T_s співставна з часом вмикання вимикача генератора доцільно штучно збільшувати тривалість періоду биття, зменшуючи в n разів частоти напруг, що синхронізуються. Використання синхронізаторів з постійним кутом та постійним часом випередження дозволяє здійснювати вмикання генераторів на паралельну роботу, але не виключає випадків затягування процесу синхронізації особливо тоді, коли кутова частота ковзання ω_s мала, тобто великий період ковзання T_s , й в разі пропуску команди на вмикання, оскільки ця команда повинна бути подана в точці в момент часу, коли поточне значення кута δ дорівнює розрахунковому

значенню $\delta_{\text{вмк1}}$ або $\delta_{\text{вмк2}}$. Суттєво прискорити процес вмикання генераторів на паралельну роботу можливо, якщо використовувати зонний принцип побудови пристроїв синхронізації, за яким подачу команди на вмикання вимикача генераторів слід здійснювати використовуючи для цього не лінію вмикання, а площу (зону), яка обмежена сепаратрисою $\delta\left(\frac{1}{\omega_s}\right)$, побудованою в координатах ω_s та $\delta_{\text{доп}}$.

При вмиканні генератора з параметрами ω_s та δ , що знаходяться в цій зоні, синхронізація завершиться без суттєвих збурень і якість електричної енергії при цьому буде задовольняти вимоги, що висуваються споживачами. Таким чином, необхідно забезпечити можливість вмикання вимикача генератора в діапазоні значень кутової частоти ковзання, які дозволяють провести успішну синхронізацію в випадку, коли координати фазової траєкторії попадають в зону вмикання, яка визначається виразом

$$+\delta(\omega_s) - \omega_s t_{\text{вмк}} > \delta > -\delta(\omega_s) + \omega_s t_{\text{вмк}}, \quad (4)$$

де $\pm\delta(\omega_s)$ – кут зсуву за фазою між напругами генератора й мережі, який знаходиться з граничною фазовою траєкторією, що забезпечує в координатах δ , ω_s область успішної синхронізації.

Гранична фазова траєкторія представляється неоднозначною функцією, в зв'язку з чим в виразі (4) слід розрізнити її праву $+\delta(\omega_s)$ та ліву $-\delta(\omega_s)$ гілки. На рис. 2 показано побудову зони вмикання.

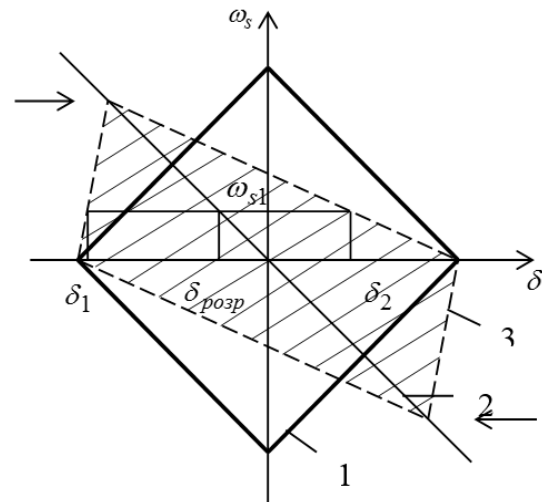


Рис. 2. Побудова зони вмикання

Гранична фазова траєкторія (сепаратриса), яка показана для спрощення на рис. 2 в вигляді чотирикутника 1, обмежує область успішної синхронізації. Пряма, що проходить через початок координат, являє собою лінію вмикання 2, яка відповідає виразу $\delta_{\text{розр}} = \omega_s \phi t_{\text{вмк}}$.

Абсиси границь зони вмикання 3 (на рис. 2 ця зона заштрихована) для будь якого значення орди-

нати ω_s знаходяться шляхом складання абсцис сепаратриси 1 і лінії вмикання 2. Стрілками на рис. 2 показані фазові траєкторії в випадках, коли $\omega_s > 0$ та $\omega_s < 0$. Так, для кутової частоти ковзання, що дорівнює ω_{s1} , для звичайного синхронізатора з постійним часом випередження розрахунковий кут вмикання дорівнює $\delta_{розр1}$, а для зонного синхронізатора синхронізація можлива у всьому діапазоні значень кутів вмикання від δ_1 до $\delta_{розр}$, що практи-

чно включає випадки пропуску команди на вмикання вимикача генератора й забезпечує вигреш у часі, який прямо пропорційний ширині зони вмикання і обернено пропорційний кутовій частоті ковзання при якій здійснюється синхронізація.

На рис. 3 показані мережа (працюючий генератор) 1, вмикаємий генератор 2, вимірювальний блок 3, який стримує інформацію о значенні поточної величини напруги биття $u_s(t)$ й видає інформацію о частоті ковзання ω_s та кути δ між напругами, що синхронізуються.

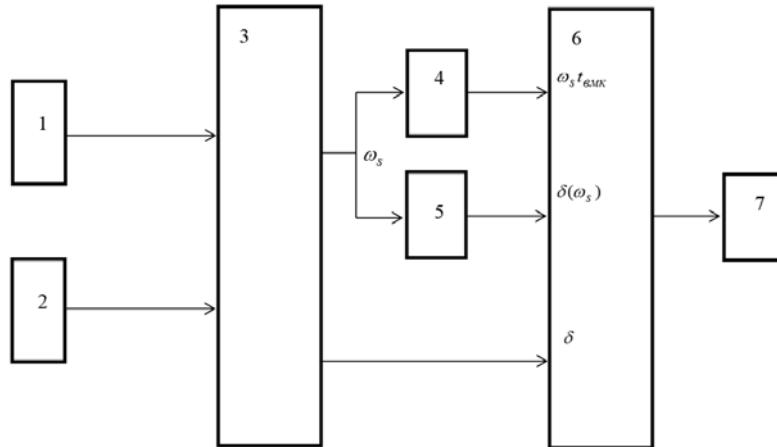


Рис. 3. Функціональна схема пристрою зонної синхронізації

Блок 4 забезпечує побудову лінії вмикання $\omega_s t_{вмк}$, а блок 5 забезпечує визначення абсцис сепаратриси $\delta_{розр}$. В логічному блоці 6 фіксуються попадання поточного кута δ в зону вмикання й формується команда на вмикання вимикача генератора 7 в випадку, коли виконується вимога 4. В разі необхідності врахування зміни в процесі синхронізації кутової частоти ковзання, тобто врахування прискорення ϵ_s що, наприклад, має місце при вимірюванні частоти або при автоматичному повторному вмиканні в системах електропостачання, які мають у

своєму складі потужні асинхронні двигуни які в процесі свого гальмування переходять в генераторний режим й генерують змінну напругу зі змінною частотою, при побудові зони вмикання, слід використовувати наступний вираз

$$+\delta(\omega_s)\omega_s t_{вмк} \frac{\epsilon_s t_{вмк}^2}{2} > \delta > \delta(\omega_s) + \omega_s t_{вмк} + \frac{\epsilon_s t_{вмк}^2}{2}. \quad (5)$$

На рис. 4 наведена функціональна схема пристрою зонної синхронізації, в якому реалізується залежність (5). На рис. 4 показані мережа (працюючий генератор) 1 та вмикаємий генератор 2.

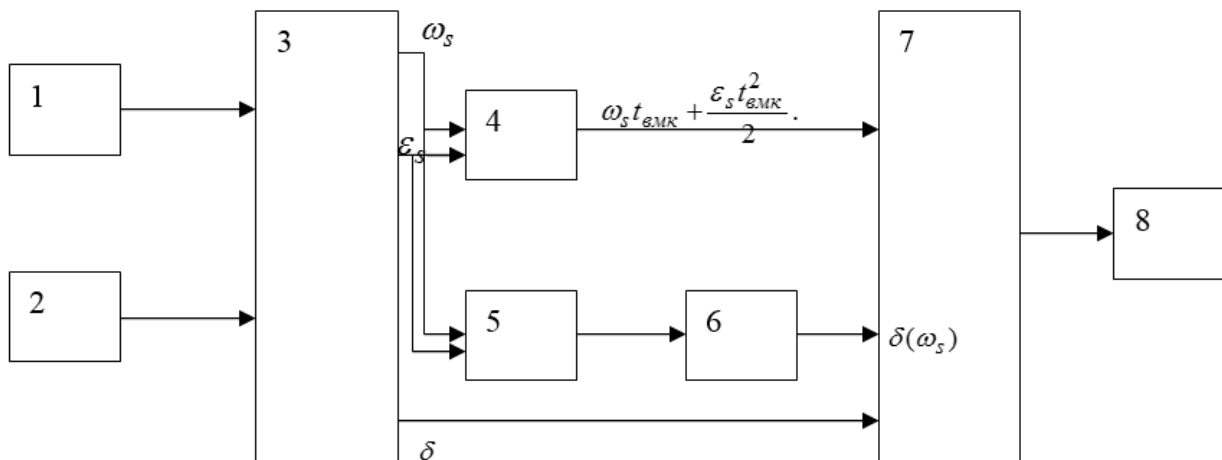


Рис. 4. Функціональна схема пристрою зонної синхронізації, з врахуванням прискорення

Вимірювальний блок 3 на відміну від вимірювального блока, наведеного на рис. 3, дозволяє вимірювати не тільки кутову частоту ковзання ω_s й кут δ між напругами, що синхронізуються, але й прискорення частоти ковзання ε_s .

Блок 4 забезпечує побудову лінії вмикання, блок 5 забезпечує визначення очікуємої к моменту замикання контактів генератора кутової частоти ковзання. Блок 6 забезпечує визначення абсцис сепаратриси $\delta_{розр}$. В логічному блоці 7 фіксується попадання поточного кута δ в зону вмикання й формується команда на вмикання вимикача генератора 8 в випадку, коли виконується вимога (5). Пристрій зонної синхронізації, показаний на рис. 4, дозволяє крім прискорення процесу синхронізації підвищити точність визначення кута, при якому слід подавати команду на вмикання вимикання генератора, оскільки в цьому синхронізаторі можливо уникнути кутових помилок, обумовлених неврахуванням прискорення ковзання, що зменшує можливі негативні збурення в процесі синхронізації.

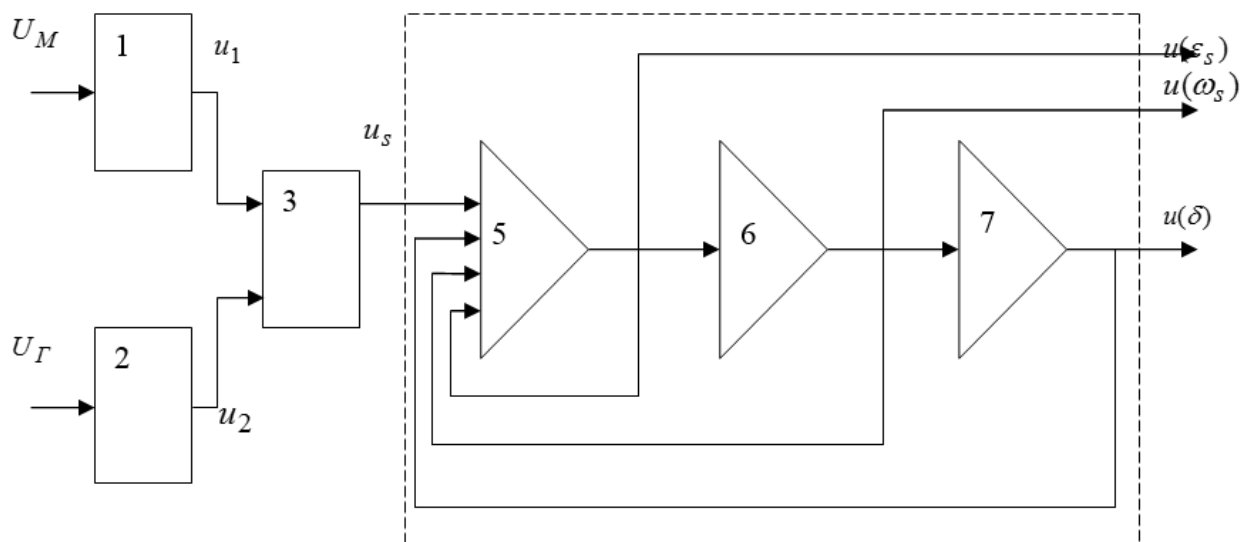


Рис. 5. Вимірювальний блок зонного синхронізатора

У вимірювальному блоці імпульсні послідовності утворюються в формувачах імпульсів 1 та 2, на вході яких подається напруга мережі U_M та напруга генератора U_G . На виході формувачів імпульсів 1 та 2 сигнали U_1 та U_2 мають вигляд імпульсних послідовностей, жорстко прив'язаних до нульової фази відповідних синусоїд u_M та u_G . Записуючий одиницю вхід тригера 3 з'єднаний з входом формувача імпульсів 1, а скидаючий вхід тригера 3 з'єднаний з входом формувача імпульсів 2. На вході тригера 3 утворюється імпульсна послідовність u_s , середнє значення вихідної напруги тригера 3 пропорційно куту зсуву за фазою між напругами, що синхронізуються. Напруги U_s з виходу тригера 3 по-

можливості технічної реалізації пристроїв зонної синхронізації залежить від можливості [11; 16] вимірювання в процесі синхронізації кута δ , частоти ковзання $\omega_s = \frac{d\delta}{dt}$ й прискорення ковзання

$$\varepsilon_s = \frac{d\omega_s}{dt} = \frac{d^2\delta}{dt^2}.$$

Виконання в імпульсних пристроях диференціювання призводить до появи суттєвих завад, які значно викривлюють результати вимірювань і не дозволяють отримати потрібну точність при визначенні моменту подачі команди на вмикання генератора.

Для подолання зазначених негараздів в якості вимірювального блока в зонних синхронізаторах пропонується використовувати пристрій, показаний на рис. 5.

До його складу входять формувачі імпульсів, тригер та фільтр, який складається з 3 інтегруючих операційних підсилювачів, охоплених зворотними зв'язками.

даються на вхід фільтра, який містить три послідовно з'єднані інтегруючі операційні підсилювачі 5, 6 та 7.

Передатна функція $W(P)$ цього фільтра відповідає передатній функції ланки третього порядку яка має наступний вигляд:

$$W(P) = \frac{K}{ap^3 + bp^2 + cp + 1}, \quad (6)$$

де K – коефіцієнт підсилення; a , b та c – коефіцієнти при похідних;

$$P = \frac{d}{dt} \text{ – оператор диференціювання. Сигнал на}$$

вході фільтра $u(\delta)$ пропорційний поточному куту зсуву за фазою між напругою мережі й напругою

генератора. Оскільки сигнал на вході третього інтегруючого операційного підсилювача, пропорційний поточному куту зсуву за фазою, то сигнал на вході цього підсилювача, тобто сигнал на виході другого інтегруючого операційного підсилювача $u(\omega_s)$ повинний бути пропорційним кутовій частоті ковзання ω_s . Зрозуміло, що сигнал на вході другого інтегруючого операційного підсилювача, тобто сигнал на виході першого операційного підсилювача $u(\varepsilon_s)$ повинен бути пропорційним прискоренню ковзання ε_s . Таким чином, в запропонованому вимірювальному блоці вимірювання кутової частоти і прискорення ковзання здійснюється без виконання диференціювання, що дозволяє впевнитися в можливості технічної реалізації пристроїв зонної синхронізації.

Висновки

1. В даній статті були з'ясовані шляхи прискорення процесу синхронізації синхронних генераторів у системах електропостачання військових об'єктів.

2. З'ясований аналіз можливих технічних рішень, випровадження яких забезпечить успішність проведення синхронізації з забезпеченням при цьому стійких показників якості електричної енергії.

3. Для вмикання на паралельну роботу резервних джерел живлення в системах електропостачання

військових об'єктів слід виконувати спосіб автоматичної точної синхронізації.

4. Для прискорення процесу точної синхронізації доцільно відмовитися від дотримання умов ідеальної синхронізації й вибирати параметри синхронізації такі як допустима неоднаковість напруги ΔU_{don} , допустима кутова частота ковзання ω_{sdon} та допустимий кут зсуву за фазою напруги, що синхронізуються, δ_{don} з умов забезпечення визначеної якості електричної енергії в процесі синхронізації.

5. Для виключення збурень, пов'язаних з можливими провалами напруги й кидками струмів під час проведення синхронізації крім дотримання вимог, які стосуються параметрів синхронізації, обов'язково слід враховувати інерційність вимикача генератора та подавати команду на вмикання вимикача генератора з постійним кутом або постійним часом випередження, надаючи, при цьому, перевагу синхронізаторам з постійним часом випередження.

6. Для скорочення часу, витрачаємого на проведення синхронізації, слід використовувати зонні синхронізатори, в яких для підвищення точності визначення кута вмикання слід використовувати фільтри, побудовані на інтегруючих операційних підсилювачах.

7. Даний спосіб може використовуватися при ввімкненні синхронних генераторів працюючих на паралельну роботу.

Список літератури

1. Кононов Б.Т. Релейний захист та автоматика в системах електропостачання військових об'єктів / Б.Т. Кононов, Б.Ф. Самойленко, В.Б. Кононов. – Х.: ХУПС, 2007. – 384 с.
2. Електричні машини / Б.Т. Кононов, Г.І. Лагутін, О.Б. Котов, А.О. Нечаус. – Х.: ХУПС, 2015. – 496 с.
3. Метельський В.П. Електричні машини та мікромашини / В.П. Метельський. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2010. – 660 с.
4. Андрієнко В.М. Електричні машини / В.М. Андрієнко, В.П. Куєвда. – К.: НУХТ, 2010. – 366 с.
5. Яцун М.А. Електричні машини / М.А. Яцун. – Львів: Політехніка, 2011. – 461 с.
6. Белікова Л.Я. Електричні машини / Л.Я. Белікова, В.П. Шевченко. – Одеса: Наука і техніка, 2012. – 478 с.
7. Андреев В.Н. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения / В.Н. Андреев. – М.: Высшая школа, 2006. – 639 с.
8. SYNCHROFACT. Synchronizing and parallel devices and systems // Patasheet; 3BHS 901067 E01. Rev.C, ABB, 2012. – 36 p.
9. Кононов Б.Т. Спосіб отримання постійного часу випередження та пристрій його реалізації / Б.Т. Кононов, В.В. Винницка // Енергозбереження, енергетика, энергоаудит. – 2012. – № 7(101). – С. 44-46.
10. Боровиков Ю.С. Автоматика энергосистем / Ю.С. Боровиков, А.С. Гусев, М.В. Андреев. – Томск: Томский политехнический университет, 2014. – 196 с.
11. Аввакумов В.Г. Постановка и решение электроэнергетических задач исследования операции / В.Г. Аввакумов. – К.: Высшая школа, 1983. – 240с.
12. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. Ч. 1 / Г.И. Атабеков. – М.: Энергия, 1966. – 320 с.
13. Чуев Ю.В. Исследование операций в военном деле / Ю.В. Чуев. – М.: Воениздат, 1970. – 256 с.
14. Поливанов К.М. Теоретические основы электротехники. Ч. 1 / К.М. Поливанов. – М.: Энергия, 1969. – 352 с.
15. Лушчик В.Д. Современные электрические машины и аппараты / В.Д. Лушчик. – К.: Техника, 1993. – 203 с.
16. Барзам А.Б. Системная автоматика. 4-е изд. / А.Б. Барзам. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 446 с.
17. Беркович М.А. Автоматика энергосистем / М.А. Беркович, В.А. Гладышев, В.А. Семенов. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 240 с.
18. Методичні рекомендації по проектуванню систем гарантованого електропостачання / В.Г. Кузнецов, С.Д. Федоров, С.В. Облакевич, Е.П. Островский. – К.: "Аратта", 2005. – 76 с.
19. Карташев И.И. Качество электроэнергии в системах электроснабжения. Способы его контроля и обеспечения / И.И. Карташев. – М.: МЭИ, 2001. – 120 с.

References

1. Kononov, B.T., Samoilenko, B.F. and Kononov, V.B. (2007), "Releinyi zakhyst ta avtomatyka v systemakh elektro-postachannia viiskovykh ob'ektiv" [Relay protection and automatics in power supply systems of military objects], KhUPS, Kharkiv, 384 p.
2. Kononov, B.T., Lahutin, H.I., Kotov, O.B. and Nechaus, A.O. (2015), "Elektrychni mashyny" [Electric cars], KhUPS, Kharkiv, 496 p.
3. Metelskyi, V.P. (2010), "Elektrychni mashyny ta mikromashyny" [Electric machines and micromachines], ZNTU, Zaporizhzhia, 660 p.
4. Andriienko, V.N. and Kuievda, V.P. (2010), "Elektrichni mashyny" [Electric machines], NUKhT, Kyiv, 366 p.
5. Yatsun, M.A. (2011), "Elektrichni mashyny" [Electric machines], Politehnika, Lviv, 461 p.
6. Bielikova, L.Ya. and Shevchenko, V.P. (2012), "Elektrichni mashyny" [Elektrychni mashyny], Nauka i Tekhnika, Odesa, 478 p.
7. Andreev, V.A. (2008), "Releinaia zashchyta y avtomatyka system elektrosnabzheniya" [Relay protection and automatics of power supply systems], High School, Moscow, 639 p.
8. (2012), SYNCHROТАCT. Synchronizing and parallel devices and systems, Patasheet; 3BHS 901067 E01. Rev.C, ABB, 36 p.
9. Kononov, B.T. and Vynnytska, V.V. (2012), "Sposib otrymannia postiinoho chasu vyperedzhennia ta prystrii yoho realizatsii" [A method for obtaining a constant advance time and a device for its implementation], Energy saving, power engineering, power audit, No. 7 (101), pp. 44-46.
10. Borovykov, Yu.S., Husev, A.S. and Andreiev, M.V. (2014), "Avtomatyka enerhosystem" [Automation of power systems], Tomsk Polytechnic University, Tomsk, 196 p.
11. Avvakumov, V.G. (1983), "Postanovka i resheniye elektroenergeticheskikh zadach issledovaniya operatsii" [Statement and solution of electric power problems of operation research], Higher school, Kyiv, 240 p.
12. Atabekov, G.I. (1966), "Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki" [Theoretical foundations of electrical engineering], Energy, Kyiv, 320 p.
13. Chuev, Yu.V. (1970) "Issledovaniye operatsiy v voyennom dele" [Operations Research in Military], Military Publishing, Moscow, 256 p.
14. Polivanov, K.M. (1969), "Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki" [Theoretical foundations of electrical engineering], Energy, Moscow, 352 p.
15. Lushchik, V.D. (1993), "Sovremennyye elektricheskyye mashyny i aparaty" [Modern electrical machines and equipment], Technique, Kyiv, 203p.
16. Barzam, A.B. (1989), "Sistemnaya avtomatika" [System automation], Energoatomizdat, Moscow, 446 p.
17. Berkovich, M.A. (1991), "Avtomatika energosistem" [Automation power systems], Energoatomizdat, Moscow, 240 p.
18. Kuznetsov, V.G., Fedorov, S.D., Oblkevich, S.V. and Ostrovsky, E.P. (2005), "Metodychni rekomendatsiyi po proektuvannuyu system harantovanoho elektropostachannya" [Methodical recommendations for the design of guaranteed electrical supply systems], "Aratta", Kyiv, 76 p.
19. Kartashev, I.I. (2001), "Kachestvo elektroenergii v sistemakh elektrosnabzheniya. Sposoby yego kontrolya i obepecheniya" [Power quality in power supply systems. Ways of its control and maintenance], MEI, Moscow, 120 p.

Надійшла до редколегії 26.12.2018

Схвалена до друку 17.01.2019

Відомості про авторів:**Будур Микола Ігорович**

магістр
курсант Харківського національного
університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-1151-777X>

Кононов Борис Тимофійович

доктор технічних наук професор
професор кафедри Харківського національного
університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-4252-6708>

Information about the authors:**Mykola Budur**

Master
Cadet of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-1151-777X>

Boris Kononov

Doctor of Technical Sciences Professor
Professor of Department of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-4252-6708>

**ПУТИ УСКОРЕНИЯ ПРОЦЕССА синхронизации В СИСТЕМАХ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ВОЕННЫХ ОБЪЕКТОВ**

Б.Т. Кононов, М.И. Будур

Рассматриваются пути ускорения процесса синхронизации синхронных генераторов систем электроснабжения военных объектов, основанные на отказе от соблюдения условий идеальной точной синхронизации и использования, при учете инерционности выключателя генератора, возможности формирования команды на включение выключателя генератора зонного принципа синхронизации. Отказ от соблюдения условий идеальной точной синхронизации позволит уменьшить время, затрачиваемое на приведение генератора включается в состояние, при котором возможно осуществлять подключение на параллельную работу за счет увеличения возможных значений частот скольжения и углов между напряжениями что синхронизируются. Переход к зонного принципа синхронизации увеличивает диапазон возможных углов включения, что делает невозможным процесс команды на включение выключателя генератора. Предлагаются способы получения постоянного угла и постоянного времени опережения для зонных синхронизаторов. Приходится возможность построения измерительного блока устройств синхронизации на базе операционных интегрирующих усилителей. Использование в блоке измерения интегрирующих операционных усилителей позволит избежать существенных ошибок, присущих измерительным блокам, в которых используется дифференцирование.

Ключевые слова: точка синхронизации, параметры синхронизации, зонный синхронизатор, синхронизатор с постоянным углом опережения, синхронизатор с постоянным временем опережения, ускорение скольжения, измерения частоты и ускорения скольжения.

**WAYS OF ACCELERATION OF SYNCHRONIZATION PROCESS IN ELECTRICAL
SUPPLY SYSTEMS OF MILITARY OBJECTS**

B. Kononov, M. Budur

The ways of accelerating the process of synchronizing synchronous generators of power supply systems of military objects, based on the refusal to observe the conditions of perfect precise synchronization in which the dissimilarity of the voltage amplitudes which are synchronized, angular frequency of slip and angle of phase shift between stresses which are synchronized must be zero, these values are called initial synchronization parameters. But in practice, the implementation of the conditions of perfect precise synchronization is not possible because it is impossible to get zero initial parameters of synchronization, the process inclusion synchronous generators for parallel work is accompanied by electromagnetic and electromechanical transients. In this case there are failures of voltage on the busbars parallel to the running generators and throws equalizing current between them. Also, ways are found to accelerate the process of synchronizing synchronous generators of power supply systems of military objects, which are based on use, taking into account the inertia of the generator switch, the possibility of forming a command to turn on the generator switch zone principle of synchronization are considering. Denial to observe the conditions of perfect precise synchronization will reduce the time spent on bringing the incoming generator to a state in which it is possible to connect to a parallel job by increasing the possible values of slip frequencies and angles between synchronous voltages. The transition to the zone-based synchronization principle increases the range of possible turning angles, which makes it impossible for the comand to turn on the generator switch. The ways of obtaining a constant angle and constant time advance for zone synchronizers are offered. It is possible to construct a measuring block of synchronization devices based on operational integrating amplifiers. Using in the measurement block integrating operational amplifiers will make possible to avoid significant errors that are inherent to the measuring blocks that use the differentiation operation.

Keywords: synchronization point, synchronization parameters, zone synchronizer, synchronizer with constant forward angles, synchronizer with constant advance time, acceleration of slip, frequency measurement and acceleration of sliding.