

## МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ АВТОМАТИЧНОЇ ТОЧНОЇ СИНХРОНІЗАЦІЇ СИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРІВ

Розглядається методика вибору початкових параметрів автоматичної точної синхронізації, в основу якої покладені співвідношення для визначення провалів напруги, які отримуються при розгляданні процесу точної синхронізації синхронних генераторів з використанням рівнянь Парка - Горева. Для визначення параметрів синхронізації використовуються диференціальні рівняння рівноваги напруг, записані в координатах  $d-q$  для явнополюсних синхронних генераторів, які крім статорних обмоток мають обмотки збудження й заспокійливі роторні обмотки. Рівняння рівноваги записуються спочатку для струмів, а в подальшому для потокозчеплень. Враховуючи те, що кутові частоти обертання відрізняються одна від одної, в розглядаємих рівняннях коефіцієнти при змінних не залишаються постійними, а залежать від часу та кутової частоти ковзання, що робить рівняння нелінійними. Використовуючи метод загальмованих коефіцієнтів вдається перетворити розглядаємої нелінійні диференціальні рівняння в лінійні диференціальні рівняння з коефіцієнтами, що періодичні змінюються у часі. При подальших перетвореннях ці коефіцієнти змінюються постійною складовою їх розкладу в ряд Фур'є. В результаті розв'язання розглядаємих рівнянь рівноваги напруги знайдені вирази для визначення залежності проєкцій напруги на шинах системи при автоматичній точній синхронізації від початкового кута зсуву за фазою між напругами, що вмикаються, й відповідно отримана залежність величини провалу напруги при синхронізації від кута зсуву за фазою між синхронізуємими напругами. З цієї залежності знайдений допустимий з умов забезпечення якості електричної енергії кут вмикання. Розглядаючи рівняння відносного руху роторів генераторів, що вмикаються, отримані граничні фазові траєкторії в координатах «ковзання-кут», які забезпечують проведення успішної точної синхронізації з вимагаємою якістю електричної енергії в процесі синхронізації. Наведені результати розрахунків по визначенню провалів напруг й побудови зон успішної синхронізації. Викладені рекомендації щодо вибору розрахункових режимів роботи при визначенні початкових параметрів синхронізації.

**Ключові слова:** параметри синхронізації, якість електричної енергії, рівняння Парка – Горева.

### Вступ

**Постановка проблеми.** При розв'язанні науково-технічних задач, пов'язаних з удосконаленням процесу вмикання синхронних генераторів на паралельну роботу, однією з найбільш важливих є задача визначення початкових параметрів точної синхронізації, дотримання яких забезпечить проведення успішної синхронізації з дотриманням при цьому в системі електропостачання вимагаємих показників якості електричної енергії. Для визначення допустимих значень початкових параметрів синхронізації, а саме допустимого значення  $\Delta U_{\text{доп}}$  – неоднаковості напруг  $U_{\text{max1}}$  та  $U_{\text{max2}}$ , допустимого значення кутової частоти ковзання –  $\omega_{\text{сдоп}}$  та допустимого значення кута  $\delta_{\text{доп}}$  між напругами, що вмикаються на паралельну роботу, необхідно встановити залежність кидків струмів  $\delta I = f(\Delta U_{\text{доп}}, \omega_{\text{сдоп}}, \delta_{\text{доп}})$  та провалів напруг  $\delta U = f(\Delta U_{\text{доп}}, \omega_{\text{сдоп}}, \delta_{\text{доп}})$  та з'ясувати, що можливо зробити для виконання вимог, відповідно до яких  $\delta I \leq \delta I_{\text{доп}}$ , а  $\delta U \leq \delta U_{\text{доп}}$ . Для отримання відповіді на завдання, що поставлені, слід розглянути перехідні процеси в системі електропостачання, в який здійснюється вмикання синхронного генератора

на паралельну роботу з мережею обмеженої потужності або з генератором, потужність якого співставлена з потужністю генератора, що вмикається [1–6].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Процес вмикання синхронних генераторів на паралельну роботу способом точної синхронізації розглянутий в [1–3; 9; 11–12]. Наведені в [1–3; 12–13] рекомендації щодо вибору значень  $\Delta U_{\text{доп}}$ ,  $\omega_{\text{сдоп}}$  та  $\delta_{\text{доп}}$  базуються на використанні наближених спрощених співвідношень, які потребують істотного уточнення, яке можливо в випадку розглядання процесу синхронізації явно полюсних синхронних генераторів, перехідні процеси в яких описуються за допомогою повних рівнянь Парка – Горева для умовної двофазної електричної машини, статорні обмотки якої розміщені відповідно по осям  $d$  та  $q$  та яка має обмотку збудження, що розміщена по осі  $f$ , та дві заспокійливі обмотки  $rd$  та  $rq$ , по осям  $d$  та  $q$ , [7–8].

**Мета статті** – розробка методики розрахунків початкових параметрів автоматичної точної синхронізації синхронних генераторів, при здійсненні якої забезпечується якість електричної енергії, яка вимагається.

## Виклад основного матеріалу

Для отримання залежностей, що встановлюють зв'язок між кидками струмів і провалами напруг та початковими параметрами синхронізації, дотримуючись [2] складемо рівняння рівноваги напруг в статорних та роторних контурах працюючого і вмикаємого генератора

$$\|U_i\| = \|r_i\| \cdot \|I_i\| + \left\| \frac{d\psi_i}{dt} \right\| + \|\omega_i\| \cdot \|\psi_i\|, \quad (1)$$

де  $\|U_i\|^T = \begin{bmatrix} -U_{di} & -U_{qi} & U_{fi} & 0 & 0 \end{bmatrix}$  – матриця напруг;  $i = 1; 2$ ; T – символ транспонування;

$$\|r_i\| = \begin{bmatrix} r_i & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_r \end{bmatrix} \quad \text{– матриця активних}$$

опорів;  $r_i, r_f, r_r$  – активні опори статорної, обмотки збудження та роторної обмотки відповідно;

$$\|I_i\|^T = \begin{bmatrix} I_{di} & I_{qi} & I_{fi} & I_{rdi} & I_{rqi} \end{bmatrix} \quad \text{– матриця струмів;}$$

$I_{di}, I_{qi}$  – струми статорних контурів генератора;

$I_{fi}, I_{rdi}, I_{rqi}$  – струми в контурі збудження та в за-спокійливих роторних контурах;

$\|\psi_i\| = \begin{bmatrix} \psi_{di} & \psi_{qi} & \psi_{fi} & \psi_{rdi} & \psi_{rqi} \end{bmatrix}$  – матриця потокозчеплень;  $\psi_{di}, \psi_{qi}$  – потокозчеплення статорних контурів;  $\psi_{fi}, \psi_{rdi}, \psi_{rqi}$  – потокозчеплення роторних контурів;

$$\|\omega_i\| = \begin{bmatrix} 0 & \omega_i & 0 & 0 & 0 \\ -\omega_i & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{– матриця кутових}$$

частот обертання.

В системі диференціальних рівнянь (1) при складенні матриць кутових частот обертання  $\|\omega_i\|$  враховані наступні міркування. Обрані системи координат d–q обертаються з синхронними кутовими частотами обертання  $\omega_1$  та  $\omega_2$ , тобто вони обертаються разом з роторами синхронних генераторів. В зв'язку з цим в рівняннях рівноваги напруг статорних обмоток генераторів крім трансформаторних електрорушійних сил, пов'язаних зі зміною потокозчеплення у часі, слід враховувати електрорушійні сили, пов'язані зі зміною потокозчеплення у просторі при обертанні роторів генераторів.

В рівняннях рівноваги напруг (1) потокозчеплення  $\|\psi_i\|$  визначається в такій спосіб:

$$\|X_i\| = \|X_i\| \cdot \|I_i\|, \quad (2)$$

$$\text{де } \|X_i\| = \begin{bmatrix} X_{di} & 0 & X_{adi} & X_{adi} & 0 \\ 0 & X_{qi} & 0 & 0 & X_{aqi} \\ X_{adi} & 0 & X_{fi} & X_{adi} & 0 \\ X_{adi} & 0 & X_{adi} & X_{rdi} & 0 \\ 0 & X_{aqi} & 0 & 0 & X_{rqi} \end{bmatrix} \quad \text{– матриця}$$

реактивних опорів контурів генератора.

Взаємозв'язок синхронних генераторів з моменту зникнення контактів вмикача генератора, що включається на паралельну роботу, представимо за допомогою рівнянь першого закону Кірхгофа, записаних відповідно до осей d та q, а саме рівнянь:

$$\begin{aligned} I_{d1} + I_{d21} &= I_{dn}; \\ I_{q1} + I_{q21} &= I_{qn}, \end{aligned} \quad (3)$$

де  $I_{d1}, I_{q1}$  – проекції на осі d та q струму генератора, що працював;  $I_{d21}, I_{q21}$  – проекції на осі d та q струму генератора, який вмикається, з врахуванням того, що ротор цього генератора обертається з кутовою швидкістю  $\omega_2$ , яка відрізняється від кутової швидкості  $\omega_1$  працюючого генератора на величину кутової швидкості ковзання  $\omega_s$ , де кут  $\delta$  між роторами генераторів визначається добутком часу t на величину кутової частоти ковзання;  $I_{dn}, I_{qn}$  – проекції струму навантаження на осі d та q, які відповідно дорівнюють

$$\begin{aligned} I_{dn} &= U_d \cdot g_n + U_q \cdot b_n; \\ I_{qn} &= U_d \cdot b_n - U_q \cdot g_n, \end{aligned} \quad (4)$$

де  $g_n = r_n / Z_n^2$  – активна складова провідності навантаження;

$b_n = X_n / Z_n^2$  – реактивна складова провідності навантаження;

$r_n, X_n, Z_n = \sqrt{r_n^2 + X_n^2}$  – активне, реактивне та комплексне навантаження.

В спільній для обох генераторів системі координат, що обертається зі швидкістю  $\omega_1$  проекції статорних струмів  $I_{d21}$  та  $I_{q21}$  визначаються за допомогою наступних виразів

$$\begin{aligned} I_{d21} &= I_{d2} \cos \delta + I_{q2} \sin \delta; \\ I_{q21} &= -I_{d2} \sin \delta + I_{q2} \cos \delta, \end{aligned} \quad (5)$$

а рівняння (3) з врахуванням (1) та (4) приймають такий вигляд:

$$\begin{aligned} I_{d1} + I_{d21} + \left( r_i I_{d1} + \frac{d\psi_{d1}}{dt} + \omega_1 \psi_{q1} \right) g_1 + \\ + \left( r_i I_{q1} + \frac{d\psi_{q1}}{dt} - \omega_1 \psi_{d1} \right) b_n = 0; \end{aligned}$$

$$I_{q1} + I_{q21} + \left( r_1 I_{d1} + \frac{d\psi_{d1}}{dt} + \omega_1 \psi_{q1} \right) b_n - \left( r_1 I_{q1} + \frac{d\psi_{q1}}{dt} - \omega_1 \psi_{d1} \right) g_n = 0. \quad (6)$$

Враховуючи те, що  $g_n^2 + b_n^2 = 1/Z_n^2$ , а  $g_n \cdot Z_n^2 = r_n$  й  $b_n \cdot Z_n^2 = X_n$  отримуємо з (6), що

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_{d1}}{dt} &= -I_{d1} (r_1 + r_n) - I_{d21} r_n - I_{q1} X_n - \\ &\quad - I_{q21} X_n - \omega_1 \psi_{q1}; \\ \frac{d\psi_{q1}}{dt} &= I_{q1} (r_1 + r_n) + I_{q21} r_n - I_{q1} X_n - \\ &\quad - I_{d1} X_n - I_{d21} X_n + \omega_1 \psi_{d1}. \end{aligned} \quad (7)$$

Для зменшення кількості змінних в рівняннях (7) доцільно від струмів  $I$  перейти до потокозчеплень  $\psi$ , використовуючи для цього обернену матрицю  $\|X^{-1}\|$ , так звану матрицю реактивних провідностей  $\|b\| = \|X^{-1}\|$ , яка має вигляд

$$\|X^{-1}\| = \|b\| = \begin{vmatrix} b_{dd} & 0 & -b_{df} & b_{ddr} & 0 \\ 0 & b_{qq} & 0 & 0 & -b_{qqr} \\ -b_{df} & 0 & b_{ff} & -b_{dfr} & 0 \\ b_{ddr} & 0 & -b_{dfr} & b_{drr} & 0 \\ 0 & -b_{qqr} & 0 & 0 & b_{qrr} \end{vmatrix}. \quad (8)$$

Перехід в рівняннях (7) від потокозчеплень до струмів корисний й тому, що в перехідних процесах потокозчеплення змінюються повільніше у порівнянні зі струмами, що дозволяє розглядати процеси у варіанті припущення про незмінність потокозчеплень.

Виконавши перетворення рівнянь (7) та враховуючи (8), отримуємо:

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_{d1}}{dt} &= -b_{dd1} (r_1 + r_2) \psi_{d1} - (b_{qq1} X_n + \omega_1) \psi_{q1} - \\ &\quad - \left[ (b_{dd2} \cos \delta + b_{qq2} \sin \delta) r_n - \right. \\ &\quad \left. - (b_{dd2} - b_{qq2}) \sin \delta \cos \delta X_n \right] \psi_{d21} + \\ &\quad + \left[ (b_{dd2} - b_{qq2}) \sin \delta \cos \delta r_n - \right. \\ &\quad \left. - (b_{dd2} \cos^2 \delta + b_{qq2} \sin^2 \delta) X_n \right] \psi_{q21}; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_{q1}}{dt} &= [b_{qq1} (r_1 + r_2) - \omega_1] \psi_{q1} - b_{dd1} X_n \psi_{d1} - \\ &\quad - \left[ (b_{dd2} \cos^2 \delta + b_{qq2} \sin^2 \delta) X_n - \right. \\ &\quad \left. - (b_{dd2} - b_{qq2}) \sin \delta \cos \delta r_n \right] \psi_{d21} + \theta_0. \end{aligned}$$

З'ясуємо отримані результати. Враховуючи, що рівняння руху роторів кожного з генераторів має наступний вигляд:

$$\frac{H_i}{\omega_c} \cdot \frac{d^2 \theta_i}{dt^2} = M_{pt} - M_{ei}; \quad \delta_{доп}, \quad (10)$$

де  $H_i$  – інерційні постійні генераторів, сек;  $\omega_c$  – синхронна кутова швидкість (при  $\delta_{доп} \omega_c = 314 \text{ рад/сек}$ );  $\omega_s$  – кут навантаження генератора;  $\delta_0$  – момент руху  $i$ -го первинного двигуна генератора, представлений в відносних одиницях і рівний попередньому навантаженню генератора;  $M_{ет}$  – електромагнітні моменти генераторів в відносних одиницях. Використовуючи (10), отримаємо:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \theta_1}{dt^2} - \frac{d^2 \theta_2}{dt^2} &= \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \omega_s \frac{d\omega_s}{dt} = \\ &= \frac{10^4}{H_e \omega_c 57,3} \left[ \frac{(M_{p1} - M_{e1}) \alpha - (M_{p2} - M_{e2})}{1 + \alpha} \right], \end{aligned} \quad (11)$$

де  $M_{22} \frac{f_{c1} f_{c2}}{f_{c1} + f_{c2}} (\psi_{d20} \psi_{q20} - I_{q20} \psi_{d20})$  – кут між осями роторів генераторів;

$$H_e = \frac{H_1 H_2}{H_1 + H_2} \text{ – еквівалентна постійна інерції;}$$

$$\alpha = \frac{H_2}{H_1} \text{ – відношення постійних інерцій.}$$

Оскільки електромагнітні моменти визначаються добутками струмів й потокозчеплень, отримані рівняння (9), в яких кут  $\delta$  залежить від часу  $t$ , струмів  $I$  та потокозчеплень  $\psi$ , є нелінійними. Для розв'язання нелінійних диференціальних рівнянь (9) пропонується використовувати так названий метод загальмованих коефіцієнтів, відповідно до якого на певному інтервалі часу з початку процесу втягування генератора в синхронізм кутова частота ковзання не змінюється, а її величина дорівнює початковій різниці частот. На наступному інтервалі часу будемо вважати, що знову кутова частота ковзання не змінюється, а її величина визначається значеннями струмів, потокозчеплень, які відповідають новому моменту часу, а власне значення  $\omega_s$  визначається з рівняння (11).

Таким чином, відносний рух роторів генераторів з врахуванням загальмованості значень кутової частоти ковзання дає підставу стверджувати, що диференціальні рівняння (9) для визначення потокозчеплень можливо представити лінійними диференціальними рівняннями, коефіцієнти при змінних у яких періодично змінюються у часі. При розв'язанні такого типу диференціальних рівнянь пропонується коефіцієнти, що періодично змінюються у часі, замінити постійними складовими їх розкладу в ряд Фур'є.

Похибку, яка при цьому має місце, можливо оцінити шляхом використання інтегральних рівнянь Вольтера другого роду. Така оцінка дає підставу стверджувати, що при визначенні потокозчеплень статорних й роторних контурів можливо

спочатку вважати, що потокозчеплення цих контурів можуть бути знайденими для консервативної системи, в якій має місце ідеальна провідність обмоток. В подальшому уточнення вводяться з врахуванням того, що при визначенні потокозчеплень статорних контурів можливо нехтувати активними опорами роторних контурів, а при визначенні потокозчеплень роторних контурів можливо нехтувати активними опорами статорних контурів.

Використання запропонованого прийому дозволило отримати наступні співвідношення для визначення з (9) значень складових напруг  $\omega_s$  та  $U_q$  в початковий момент часу після синхронізації:

$$\begin{aligned}
 U_d &= 1/(b_{c1} + b_{c2}) \times \\
 &\times (b_{c1} U_{d10} + b_{c2} U_{d20} \cos \delta_0 + b_{c2} U_{q20} \sin \delta_0) - \\
 &- \frac{1}{T_e} \cdot \frac{b_{c1}}{b_{c1} + f_{c2}} (-U_{q10} + U_{q20} \cos \delta_0 - U_{d20} \sin \delta_0); \\
 U_q &= 1/(b_{c1} + b_{c2}) \times \\
 &\times (b_{c1} U_{q10} + b_{c2} U_{q20} \cos \delta_0 - b_{c2} U_{d20} \sin \delta_0) - \\
 &- \frac{1}{T_e} \cdot \frac{b_{c2}}{b_{c1} + b_{c2}} (-U_{d10} + U_{q20} \sin \delta_0 + U_{d20} \cos \delta_0).
 \end{aligned} \tag{12}$$

де  $b_{ci} = (1/X_{di}'' + 1/X_{qi}')/2 \pm 10\% U_{ном}$ ;  $X_{di}''$  – напівперехідна реактивність  $i$ -го генератора по осі  $d$ ;  $X_{qi}'$  – перехідна реактивність  $i$ -го генератора по осі  $d-q$ ;  $T_e = \frac{b_{c1} + b_{c2}}{b_{c1} b_{c2}} (r_1 + r_2)$  – еквівалентна постійна часу системи;  $U_{di0}, U_{qi0}$  – складові напруг генераторів по осям  $d$  та  $q$  в попередніх режимах роботи;  $r_1, r_2$  – активні опори статорних обмоток генератора;  $\delta_0$  – початкове значення кута між роторами генераторів, що вмикаються.

Складові напруг, струмів та потокозчеплень для попередніх режимів роботи генераторів можливо змінити, використовуючи для цього векторну діаграму генератора, наведену на рис. 1 [4–6].

Провал напруги  $\delta U$  в процесі синхронізації можливо визначити з виразу:

$$\delta U = U_{10} - \sqrt{U_d^2 + U_q^2}, \tag{13}$$

де  $U_{10}$  – початкове значення напруги, яке визначається напругою працюючого генератора, яке в системі відносних одиниць дорівнює одиниці.

Задаючи різні значення початкового кута зсуву за фазою та враховуючи (12) та (13), можливо отримати залежність провалу напруги  $\delta U$  від початкового кута зсуву напруг за фазою  $\delta_0$  й знаючи допустиме значення провалу напруги  $\delta U_{доп}$ , яка визначається вимогами споживачів електричної енергії,

знайти допустиме значення кута  $\delta_{доп}$ , при виконанні операції синхронізації. З цим кутом зсуву за фазою провал напруги не перевищує допустиме значення.

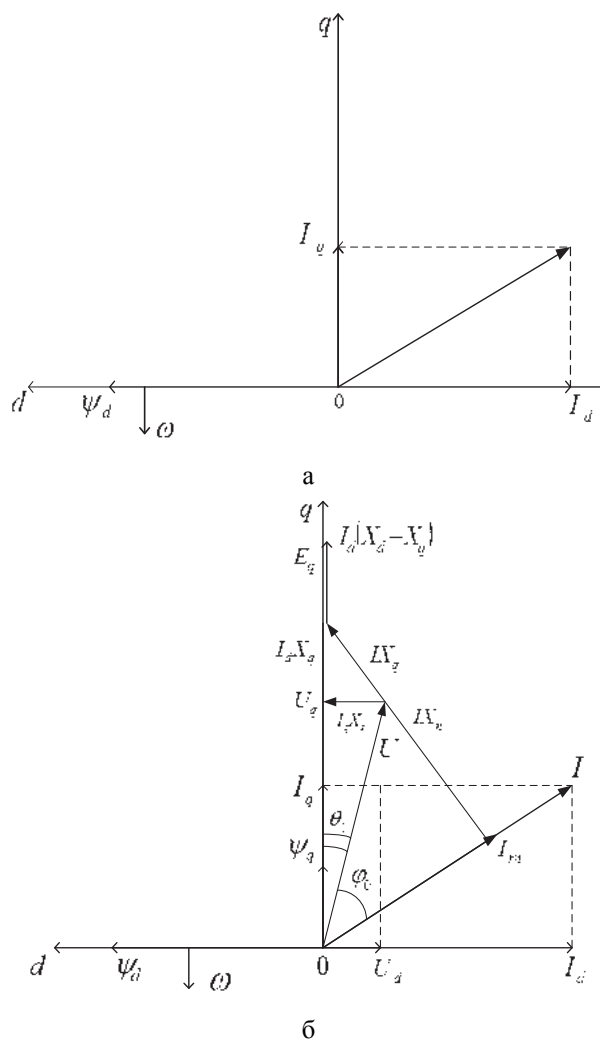


Рис. 1. Векторна діаграма синхронного генератора для попереднього режиму роботи з кутом навантаження

Відповідно залежність  $\delta U = -f(\delta_0)$  побудована на рис.2., яка отримала в результаті розрахунків значень провалів напруги в процесі вмикання на паралельну роботу двох генераторів типу СГД-400-1000, у яких повздовжня реактивність  $X_d = 1,105$ , поперечна реактивність  $X_q = 0,591$ ,  $X_d'' = 0,118$ ,  $X_q' = 0,108$ ,  $r = 0,0172$ . Розрахунки проведені для наступних попередніх режимів роботи генераторів:

- 1 – режим неробочого ходу ( $S_{n1} = 0; S_{n2} = 0$ ),
- 2 – режим номінального навантаження ( $S_{n1} = 0, \cos \phi_1 = \cos \phi_2 = 0,8$ ),
- 3 – режим вмикання ненавантаженого генератора на номінально навантажений генератор ( $S_{n2} = 0, S_{n1} = 1, \cos \phi_1 = 0,8$ ).

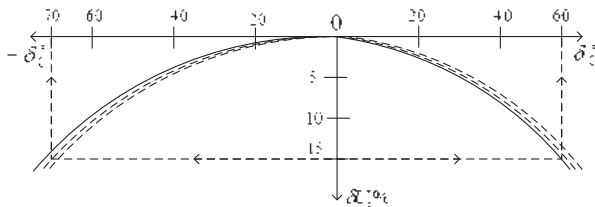


Рис. 2. Залежність провалу напруги при синхронізації від кута зсуву за фазою між напругами, що вмикаються

Визначення допустимого з умов якості електричної енергії кута зсуву за фазою  $\delta_{\text{доп}}$  дає змогу знайти граничні значення кутових частот ковзання, при яких синхронізація здійснюється успішно, тобто завершується в першому циклі коливань ротора без його провороту. Виконуючи інтегрування рівняння (11) по швидкості від 0 до  $\omega_{\text{сдоп}}$ , а по куту від 0 до  $\delta_{\text{доп}}$ , отримаємо рівняння фазової траєкторії, яка обмежує зону початкових значень параметрів синхронізації  $\omega_s$  та  $\delta_0$ , при яких в цьому процесі підтримуються якість електричної енергії, яка вимагається:

$$\omega_{\text{сдiтi}} \leq \sqrt{2 \cdot 10^4 / ((H_e \omega_e 57,3)(1 + \alpha))} \times \sqrt{(\alpha M_{p1} - M_{p2} - \alpha M_{11} + M_{22})(\delta_0 + \delta_{\text{дiтi}}) + M_m (\cos \delta_0 - \cos \delta_{\text{дiтi}})}, \quad (14)$$

де 
$$M_{11} = \frac{f_{c1}}{f_{c1} + f_{c2}} (I_{d10} \Psi_{q10} - I_{q10} \Psi_{d10});$$

$$M_{22} = \frac{f_{c1} f_{c2}}{f_{c1} + f_{c2}} (\Psi_{d20} \Psi_{q20} - I_{q20} \Psi_{d20});$$

$$M_m = \frac{f_{c1} f_{c2}}{f_{c1} + f_{c2}} (\Psi_{d10} \Psi_{d20} + \Psi_{q10} \Psi_{q20}).$$

Початкові значення струмів та потокозчеплень можливо знайти, використовуючи векторну діаграму генератора (рис. 1) для попереднього режиму його роботи.

На рис. 3 наведена зона успішної синхронізації, при якій провал напруги не перевищує  $\delta U_{\text{доп}} \leq 15\%$ .

Відповідні фазові траєкторії побудовані для випадків вмикання генераторів на паралельну роботу з режиму неробочого ходу ( $S_{n1} = 0; S_{n2} = 0$ ) траєкторія 1, та вмикання генератора, у якого наванта-

ження відсутні на повністю навантажений генератор ( $S_{n2} = 0; S_{n1} = 1, 0; \cos \phi_1 = 0, 8$ ) – траєкторія 2.

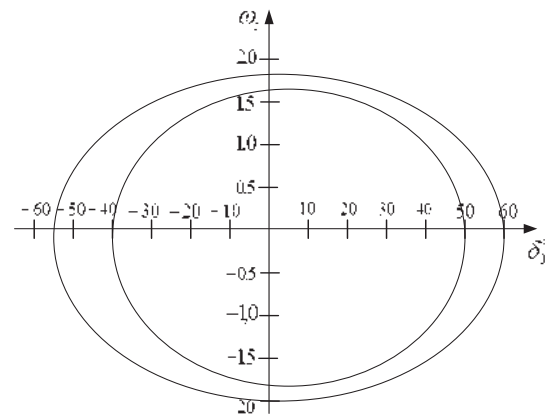


Рис. 3. Зона успішної синхронізації з якістю електричної енергії, яка вимагається

## Висновки

1. Запропонована методика й отримані аналітичні залежності, які дозволяють встановити зв'язок між провалами напруг, що мають місце при вмиканні синхронних генераторів на паралельну роботу, та початковими параметрами синхронізації. При цьому розрахунковим режимом при визначенні параметрів синхронізації слід вважати неробочого ходу обох генераторів.

2. Параметрами, які визначають успішну синхронізацію з якістю електричної енергії, яка вимагається, є кутова частота ковзання  $\omega_s$  та кут  $\delta_0$  між напругами, які вмикаються. Неоднаковість амплітуд  $\Delta U$  напруг, що синхронізуються, в діапазоні до  $\pm 10\% U_{\text{ном}}$  практично не впливає на границі зони допустимих значень  $\omega_s$  та  $\delta_0$ .

3. Максимальні провали напруги мають місце при синхронізації генераторів співставимої потужності. Зі зростанням потужності працюючого генератора у порівнянні з потужністю генератора, що вмикається, величина провалу напруги зменшується. В зв'язку з цим зона початкових значень параметрів синхронізації, при яких провал напруги не перевищує допустиме значення, визначена для варіанта вмикання генератора співставимої потужності, впевнено забезпечить успішну синхронізацію синхронного генератора з мережею необмеженої потужності.

## Список літератури

1. Кононов Б.Т. Релейний захист та автоматика в системах електропостачання військових об'єктів: підручник / Б.Т. Кононов, Б.Ф. Самойленко, В.Б. Кононов – Х.: ХУПС, 2007. – 38 с.
2. Електричні машини: підручн. / Б.Т. Кононов, Г.І. Лагутін, О.Б. Котов, А.О. Нечаус; заг. ред. Б.Т. Кононова. – Х.: ХУПС, 2015. – 496 с.
3. Метельський В.П. Електричні машини та мікромашини: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. / В.П. Метельський. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2010. – 660 с.
4. Андрієнко В.Н. Електричні машини: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл., які навч. за. напрямом підготов. «Електротехніка та електротехнології» / В.М. Андрієнко, В.П. Куєвда. – К.: НУХТ, 2010. – 366 с.

5. Яцун М.А. Электричні машини : підручник / М.А. Яцун. – Л.: Вид. во Львів. політехніки. 2011. – 461 с.
6. Белікова Л.Я. Электричні машини : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. / Л.Я. Белікова, В.П. Шевченко. – Оdesa : Наука і техніка, 2012. – 478 с.
7. Кононов Б.Т. Математична модель дугостаторного електричного двигуна з короткозамкненим ротором / Б.Т. Кононов, Н.М. Рябуха // Системи озброєння і військова техніка. – Х.: ХУПС ім. Івана Кожедуба, 2015. – № 1 (41). – С. 112-115.
8. Кононов Б.Т. Розрахункові співвідношення для визначення кидків струмів та провалів напруги при пуску дугостаторного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором / Б.Т. Кононов, Н.М. Рябуха // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України : Науково-технічний журнал. – Х.:ХУПС ім. Івана Кожедуба, 2015 – №2 (19). – С. 132-136.
9. Кононов Б.Т. ; Спосіб отримання постійного часу випередження та пристрій його реалізації / Б.Т. Кононов, В.В. Виннищак // Енергозбереження, енергетика, енергоаудит. Вип. 07 (101). – Харків, 2012. – С. 44-46.
10. Кононов Б.Т. Обґрунтування методики дослідження шляхів підвищення надійності роботи систем обертання антен радіолокаційних станцій / Б.Т. Кононов, Н.М. Рябуха // Наука і техніка Повітряних Сил України. – 2016. – № 1 (22). – С. 88-90.
11. Боровиков Ю.С. Автоматика энергосистем : учеб. пособие / Ю.С. Боровиков, А.С. Гусев, М.В. Андреев, Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 196 с.
12. SYNCHROTECT. Synchronizing and parallel devices and systems // Patasheet; 3BHS 901067 E01. Rev.C, ABB, 2012. – 36 p.
13. Андреев В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения. Учебник для вузов по специальности «Электроснабжения» направление подготовки «Электроэнергетика» / В.Н. Андреев. – М., 2008. – 639 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]*, Kh.:KhUPS, 384 p.
2. Kononov, B.T., Lahutin, N.I. Kotov, O.B. Nechaus, A.O. and Kononova, B.T. (2015), *Elektrychni mashyny [Electric cars]*, KhUPS, 496 p.
3. Metelskyi, V.P. (2010), *Elektrychni mashyny ta mikromashyny [Electric machines and micromachines]*, navch.posib. dlia stud. vyshch. navch. zakl., Zaporizhzhia, ZNTU, 660 p.
4. Andriienko, V.N. and Kuievda, V.P. (2010), *Elektrychni mashyny [Electric machines]*, navch. posib. dlia stud. vyshch. navch. zakl., yaki navch. za. napriamom pidhotov. «Elektrotehnika ta elektrotekhnolohii», NUKhT, 366 p.
5. Yatsun, M.A. (2011), *Elektrychni mashyny [Electric machines]*, Vyd. vo Lviv.politekhniky, 461 p.
6. Bielikova, L.Ia. and Shevchenko, V.P. (2012), *Elektrychni mashyny [Elektrychni mashyny]*, Odesa, Nauka i tekhnika, 478 p.
7. Kononov, B.T. and Riabukha, N.M. (2015), "Matematychna model duho-statornoho elektrychnoho dvyhuna z korotkozamknennym ro-torom" [Mathematical model of arc-stator electric motor with short-circuited rotor], *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika [Arms systems and military equipment]*, Scientific Journal, No. 1 (41), pp. 112-115.
8. Kononov, B.T. and Riabukha, N.M. (2015), "Rozrakhunkovi spivvidnoshennia dlia vyznachennia kydkiv strumiv ta provaliv napruhy pry pusku duho-statornoho asynkronnoho dvyhuna z korotkozamknennym rotorom" [Estimated ratios for determination of currents of currents and voltage failures when starting an arc-stator asynchronous motor with a short-circuit rotor], *Nauka i tekhnika Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy [Science and Technology of the Air Forces of the Armed Forces of Ukraine]*, No. 2 (19), pp. 132-136.
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], *Enerhozberzhennia, enerhetyka, enerhoaudyt [Energy Saving, Energy Energy Audit]*, No. 07 (101), Kharkiv, pp. 44-46.
10. Kononov, B.T. and Riabukha, N.M. (2016), "Obhruntuvannia metodyky doslidzhennia shliakhiv pidvyshchennia nadiinosti roboty system obertannia anten radiolokatsiinykh stantsii" [Justification of the methodology for investigating ways to increase the reliability of the radar antenna rotation systems], *Nauka i tekhnika Povitrianykh Syl Ukrainy [Science and Technology of the Air Forces of Ukraine]*, Vol. 1 (22), pp. 88-90.
11. Borovykov, Iu.S., Husev, A.S. and Andreiev, M.V. (2014), *Avtomatyka enerhosystem [Automation of power systems]*, Tomskiy polytekhnycheskyi unyversytet, Tomsk, Yz-vo Tomskoho polytekhnycheskoho unyversyteta, 196 p.
12. (2012) SYNCHROTECT. *Synchronizing and parallel devices and systems*, Patasheet; 3BHS 901067 E01. Rev.C, ABB, 36 p.
13. Andreev V.A. (2008), *Releinaia zashchyta y avtomatyka system elektrosnabzheniya [Relay protection and automatics of power supply systems]*, Uchebnyk dlia vuzov po spetsyalnosti «Elektrosnabzheniya» napravlenye podgotovky «Elektroenerhetyka» – 639 p.

Надійшла до редколегії 30.01.2018

Схвалена до друку 6.03.2018

### Відомості про авторів:

#### Кононов Борис Тимофійович

Заслужений діяч науки і техніки України,  
доктор технічних наук професор  
професор кафедри Харківського національного  
університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,  
Харків, Україна  
<https://orcid.org/0000-0003-4252-6708>  
e-mail: aveprofessor@gmail.com

### Information about the authors:

#### Boris Kononov

Honoured Worker of Science Ukraine  
Doctor of Technical Science Professor,  
Professor of Ivan Kozhedub Kharkiv  
National Air Force University,  
Kharkiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0003-4252-6708>  
e-mail: aveprofessor@gmail.com

**Щербина Юлія Ігорівна**

бакалавр Харківського національного  
університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,  
Харків, Україна  
<https://orcid.org/0000-0002-1034-4056>  
e-mail: shcherbyna1012@gmail.com

**Ушаков Андрій Сергійович**

бакалавр Харківського національного  
університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,  
Харків, Україна  
<https://orcid.org/0000-0003-4347-169X>  
e-mail: andrety11100@gmail.com

**Yuliia Shcherbyna**

Bachelor of Ivan Kozhedub Kharkiv  
National Air Force University,  
Kharkiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-1034-4056>  
e-mail: shcherbyna1012@gmail.com

**Andrii Ushakov**

Bachelor of Ivan Kozhedub Kharkiv  
National Air Force University,  
Kharkiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0003-4347-169X>  
e-mail: andrety11100@gmail.com

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ТОЧНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Б.Т. Кононов, Ю.И. Щербина, А.С. Ушаков

Рассматривается методика выбора начальных параметров автоматической точной синхронизации, в основу которой положены соотношения для определения провалов напряжения, которые получаются при рассмотрении процесса точной синхронизации синхронных генераторов с использованием уравнений Парка - Горева. Для определения параметров синхронизации используются дифференциальные уравнения равновесия напряжений, записанные в координатах  $d - q$  для явнополюсных синхронных генераторов, которые кроме статорных обмоток имеют обмотки возбуждения и успокоительные роторные обмотки. Уравнения равновесия записываются сначала для токов, а в дальнейшем для потокосцеплений. Учитывая, что угловые частоты вращения отличаются друг от друга, в рассматриваемой уравнениях коэффициенты при переменных не остаются постоянными, а зависят от времени и угловой частоты скольжения, что делает уравнение нелинейными. Используя метод заторможенных коэффициентов удается превратить рассматриваемой нелинейные дифференциальные уравнения в линейные дифференциальные уравнения с коэффициентами, периодически меняющимися во времени. При дальнейших преобразованиях эти коэффициенты меняются постоянной составляющей их разложения в ряд Фурье. В результате решения рассматриваемых уравнений равновесия напряжения найдены выражения для определения зависимости проекций напряжения на шинах системы при автоматической точной синхронизации от начального угла сдвига по фазе между напряжениями, которые включаются, и соответственно получена зависимость величины провала напряжения при синхронизации от угла сдвига по фазе между синхронизируемыми напряжениями. С помощью этой зависимости найден допустимый из условий обеспечения качества электрической энергии угол включения. Рассматривая уравнения относительного движения роторов включаемых генераторов, получены предельные фазовые траектории в координатах «скольжение-угол», которые обеспечивают проведение успешной точной синхронизации с требуемым качеством электрической энергии в процессе синхронизации. Приведены результаты расчетов по определению провалов напряжений и построения зон синхронизации. Изложены рекомендации по выбору расчетных режимов работы при определении начальных параметров синхронизации.

**Ключевые слова:** параметры синхронизации, качество электрической энергии, уравнения Парка - Горева.

## METHODOLOGY OF DETERMINATION OF PARAMETERS AUTOMATIC EXACT SYNCHRONIZATION OF SYNCHRONOUS GENERATORS

B. Kononov, Y. Shcherbyna, A. Ushakov

Methodology of choice of initial parameters of automatic synchronization, in basis of that the fixed correlations for determination of failures of tension, that turn out at consideration of process of exact synchronization of synchronous generators with the use of equalizations Parka, is examined - Goreva. For determination of parameters to synchronization differential equalizations of equilibrium of voltage are used, written in coordinates  $d - q$  for explicit pole of synchronous generators that except stator windings have winding of excitation and calming rotor winding. Equation of equilibrium are written down at first for currents, and in the future for flow coupling. Taking into account that the pulsances of rotation differ one from other, in considerations equalizations coefficients at variables do not remain permanent, but depend on time and angular slip frequency that does equations nonlinear. Using the method of the put on the brakes coefficients it is succeeded to convert are considering nonlinear differential equalizations in linear differential equalizations with coefficients, that the periodic change in time. At further transformations these coefficients change the permanent constituent of their time-table in the row of Fourier. As a result of decision of considering equalizations of equilibrium of tension expressions are found for determination of dependence of projections of tension on the tires of the system during automatic exact synchronization from the initial corner of change after a phase between voltages, that included, and accordingly the got dependence of size of failure of tension during synchronization from the corner of change after a phase synchronous voltage. From this dependence the possible is found from the terms of providing of quality of electric energy angle of including. Examining equalization of relative motion of rotors of generators that is included, receipt maximum phase trajectories in coordinates "skidding-corner", that provide realization of successful exact synchronization with required quality of electric energy in the process of synchronization. The brought results over of calculations on determination of failures of voltages and constructions of zones of successful synchronization. The expounded recommendations are in relation to the choice of calculation office hours at determination of initial parameters of synchronization.

**Keywords:** parameters of synchronization, quality of electric energy, equalization Parka - Goreva.