

УДК 621.313.332

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ АВТОНОМНОГО ЕЛЕКТРОГЕНЕРУЮЧОГО КОМПЛЕКСУ З АСИНХРОННИМИ ГЕНЕРАТОРАМИ ТА ЄДИНИМ НАПІВПРОВІДНИКОВИМ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ ЗБУДЖЕННЯ

Л.І. Мазуренко, докт. техн. наук, О.В. Джура, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

e-mail: mlins@ied.org.ua

*Розроблено математичну модель автономного електрогенеруючого комплексу з двома асинхронними генераторами і спільною вентиляльною системою збудження, яка дає змогу досліджувати перехідні процеси в його силовій частині як за інверсного перемикання транзисторів кожної стійки, так і за неспроможності всіх транзисторів вентиляльного перетворювача. Проведено тестове чисельне дослідження режимів роботи комплексу з двома асинхронними генераторами потужністю 75 кВт за постійної частоти обертання. В режимі, наближеному до холостого ходу, розраховано часові залежності величин, що характеризують процеси, під час почергового збудження генераторів і втрати ними збудження, їх підключення і від'єднання від вентиляльної системи збудження. Бібл. 7, рис. 4.*

**Ключові слова:** електрогенеруючий комплекс, асинхронний генератор, єдиний вентиляльний перетворювач.

Переваги електрогенеруючих автономних систем у порівнянні з одиничними автономними генераторами добре відомі [2, 7]. Це вища надійність електропостачання; більш раціональне використання невідновлюваних джерел енергії; можливість нарощення потужності за рахунок інтеграції нових джерел електроенергії в систему тощо. В зазначених системах можуть використовуватись такі генератори: з постійними магнітами, синхронні з електромагнітним збудженням, асинхронні подвійного живлення і з короткозамкненим (КЗ) ротором. Асинхронні генератори (АГ) з КЗ ротором і вентиляльним збудженням (ВЗ) досліджуються достатньо тривало [4], проте почали набувати впровадження в енергетиці порівняно недавно і належать до технологій електрогенерування на початку їх становлення [6]. Під час роботи таких АГ в автономній електрогенеруючій системі зазвичай кожен із генераторів має свою систему ВЗ. Проте можливе збудження АГ від однієї системи ВЗ, тобто спільного напівпровідникового перетворювача. На сьогодні не розроблені математичні моделі і не проведені дослідження електрогенеруючих комплексів (ЕГК) на основі АГ зі спільною системою ВЗ.

**Метою роботи** є розробка математичної моделі машинно-вентильної частини автономного електрогенеруючого комплексу з двома АГ і спільним ВП, що живить навантаження постійного струму.

Розрахункова схема такого комплексу показана на рис. 1, з якої видно, що автономний ЕГК містить генератори АГ1 і АГ2 з КЗ ротором, статорні обмотки яких з'єднуються за схемою "Δ" (рис. 2 а) або "Y" (рис. 2 б). Кожен АГ шунтовано RC ланками (елементи  $R_{K1}$ ,  $C_{K1}$  та  $R_{K2}$ ,  $C_{K2}$ ). Комутатори  $SW1$ ,  $SW2$  змінного струму призначені для підключення/відключення статорних обмоток до/від вентиляльного перетворювача (ВП), який також шунтовано RC ланками (елементи  $R_{K3}$ ,  $C_{K3}$ ). Всі ключі комутаторів  $SW1$ ,  $SW2$  є ключами змінного струму і реалізуються на основі відомих рішень напівпровідникових ключів (рис. 3 а-в) або за малої кількості підключень (декілька за годину) – електромагнітними контакторами. Вентильний перетворювач і ключ  $S_{AH}$  в колі навантаження виконуються на повністю керувані ключах (рис. 3 з).

Особливості роботи елементів генеруючого машинно-вентильного комплексу (рис. 1) такі:

– вентиляльний перетворювач забезпечує збудження підключеного до його виводів змінного струму генератора і відбирає активну потужність від АГ. Напругу  $u_d$  стабілізує система керування ключа  $S_{AH}$  за рахунок зміни коефіцієнта заповнення його імпульсів керування;

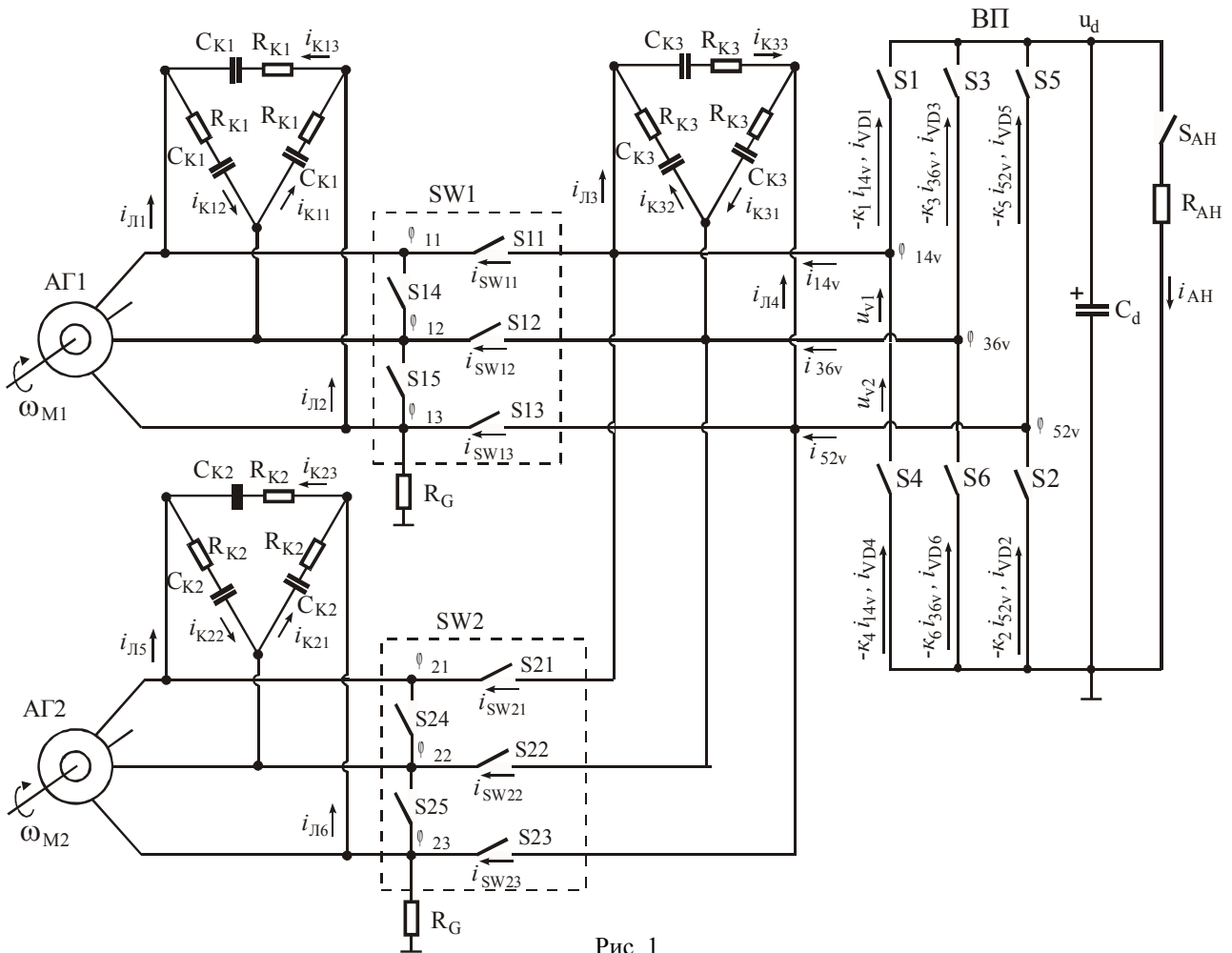


Рис. 1

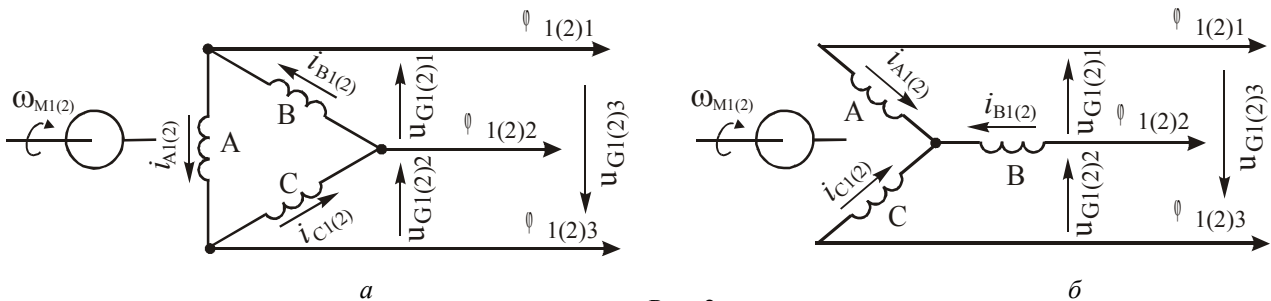


Рис. 2

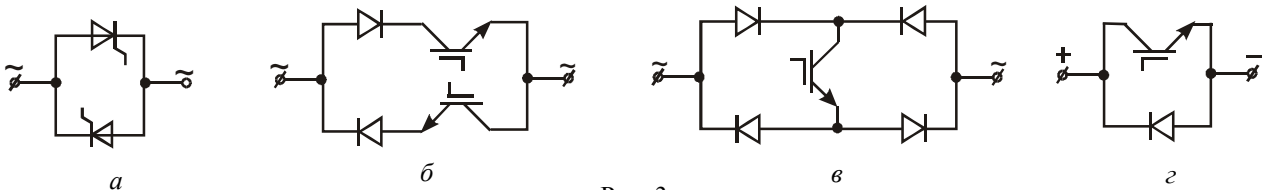


Рис. 3

– для виведення з роботи АГ вентильний перетворювач шляхом замикання всіх його ключів переводиться в режим некерованого випрямляча. Після спадання входних струмів БП  $i_{14V}$ ,  $i_{36V}$ ,  $i_{52V}$  комутатор  $SW1$  ( $SW2$ ) з допомогою основних ключів  $S11$ ,  $S12$ ,  $S13$  ( $S21$ ,  $S22$ ,  $S23$ ) від'єднує АГ від системи збудження і одночасно двома допоміжними ключами  $S14$ ,  $S15$  ( $S24$ ,  $S25$ ) шунтує статорні обмотки від'єданого АГ для усунення комутаційних перенапруг;

– для введення в роботу одного з АГ замість іншого необхідно з допомогою комутатора  $SW1$  ( $SW2$ ) одразу ж після від'єднання попередньо працюючого генератора під-

ключити його до клем змінного струму ВП, імпульси керування ВП розблоковуються і здійснюється збудження підключеного АГ;

– за необхідності відбирати потужність одночасно від двох АГ, їх вихідні потужності мають регулюватись відповідними приводами або ВП (коли генератори та їх приводи повністю ідентичні).

Основні переваги ЕГК, в якому два АГ збуджуються від спільного напівпровідникового перетворювача в порівнянні з конфігурацією комплексу "два АГ – два ВП" [3] такі:

– більша надійність у перехідних режимах роботи, пов'язаних з коливаннями навантаження внаслідок застосування єдиного ВП більшої потужності (обирається на сумарну потужність АГ);

– оскільки АГ з'єднані по колах змінного струму, то спрощується інтеграція інших джерел змінного струму до складу системи;

– спрощується проектування автономної системи через те, що ВП у складі машинно-вентильної частини комплексу лише один на відміну від інших систем [3].

Розглянемо математичні моделі складових елементів комплексу (рис. 1).

**Асинхронні машини.** Математична модель АГ1 (АГ2) [4] представлена у векторній формі в нерухомій симетричній фазній системі координат і складається з таких рівнянь:

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{\Psi}_{s1(2)}}{dt} &= \bar{U}_{s1(2)} - r_1 \bar{I}_{s1(2)}; & \frac{d\bar{\Psi}_{r1(2)}}{dt} &= -r_2 \bar{I}_{r1(2)} - \omega_{1(2)} \bar{\Psi}_{r1(2)} A_1; \\ \bar{I}_{s1(2)} &= (\bar{\Psi}_{s1(2)} - \bar{\Psi}_{m1(2)}) / L_1; & \bar{I}_{r1(2)} &= (\bar{\Psi}_{r1(2)} - \bar{\Psi}_{m1(2)}) / L_2; \\ \bar{\Psi}_{m1(2)} &= \bar{I}_{\Sigma 1(2)} L_{\Sigma k1(2)}; & \bar{I}_{m1(2)} &= \frac{2}{3} (\bar{I}_{s1(2)} + \bar{I}_{r1(2)}) - (\bar{I}_{s1(2)} + \bar{I}_{r1(2)}) A_2; \\ \bar{I}_{\Sigma 1(2)} &= \bar{\Psi}_{s1(2)} / L_1 + \bar{\Psi}_{r1(2)} / L_2; & L_{\Sigma k1(2)} &= (L_1^{-1} + L_2^{-1} + L_{m1(2)}^{-1})^{-1}; \\ M_{r1(2)} &= \frac{3p}{2} \left( \bar{I}_{s\alpha\beta 1(2)} (\bar{\Psi}_{s\alpha\beta 1(2)} A_3)^T \right); & \bar{I}_{s\alpha\beta 1(2)} &= \bar{I}_{s1(2)} A_4; & \bar{\Psi}_{s\alpha\beta 1(2)} &= \bar{\Psi}_{s1(2)} A_4; \\ A_1 &= \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{pmatrix}; & A_2 &= \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}; & A_3 &= \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}; & A_4 &= \frac{2}{3} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{pmatrix}, \quad (1) \end{aligned}$$

де  $\bar{\Psi}_{s1(2)} = (\Psi_{A1(2)}, \Psi_{B1(2)}, \Psi_{C1(2)})$  – вектор потокозчеплень статора;  $\bar{\Psi}_{r1(2)} = (\Psi_{a1(2)}, \Psi_{b1(2)}, \Psi_{c1(2)})$  – вектор потокозчеплень ротора;  $\bar{U}_{s1(2)} = (u_{A1(2)}, u_{B1(2)}, u_{C1(2)})$  – вектор фазних напруг статора;  $\bar{I}_{s1(2)} = (i_{A1(2)}, i_{B1(2)}, i_{C1(2)})$  – вектор фазних струмів статора;  $\bar{I}_{r1(2)} = (i_{a1(2)}, i_{b1(2)}, i_{c1(2)})$  – вектор фазних струмів ротора;  $\bar{I}_{m1(2)} = (i_{mA1(2)}, i_{mB1(2)}, i_{mC1(2)})$  – вектор намагнічуючих струмів;  $\bar{I}_{s\alpha\beta 1(2)} = (i_{\alpha 1(2)}, i_{\beta 1(2)})$  – вектор перетворених фазних струмів у нерухомій двофазній системі координат  $\alpha\beta$ ;  $\bar{\Psi}_{s\alpha\beta 1(2)} = (\Psi_{\alpha 1(2)}, \Psi_{\beta 1(2)})$  – вектор потокозчеплень фаз статора в системі координат  $\alpha\beta$ ;  $\bar{I}_{\Sigma 1(2)} = (i_{A\Sigma 1(2)}, i_{B\Sigma 1(2)}, i_{C\Sigma 1(2)})$  – вектор сумарних струмів по фазних вісях.

Тлумачення інших величин наведено в [4]. Насичення машини враховує залежність  $L_{m1(2)} = f(Y_{m1(2)})$ , яка отримується на основі характеристики намагнічування асинхронних машин.

**Вентильний перетворювач.** У відомих дослідженнях АГ з ВЗ ключі перетворювача, як правило, вважаються ідеальними (нульовий опір – у провідному стані, нескінченний – у непровідному) і такими, що працюють у протифазі постійно. Такий підхід дає змогу отримати достатньо просту модель ВП, з допомогою якої на основі поточних значень комутаційних функцій (логічних рівнів імпульсів керування) ключів ВП і напруги кола постійного струму розраховуються вхідні напруги перетворювача. Втім, як зрозуміло з зазначеного вище, ре-

жими роботи ВП у схемі електрогенеруючого комплексу (рис. 1) передбачають існування інтервалів роботи, що характеризуються неспроможністю обох ключів у кожній стійці при роботі перетворювача в режимі некерованого випрямляча. Відповідно постає необхідність у застосуванні моделей ВП, що враховують характеристики і параметри як транзисторів, так і зворотних діодів, які їх шунтують. У результаті цього суттєво сповільнюється швидкість чисельних розрахунків засобами обчислювальної техніки, збільшується імовірність розходження процесу інтегрування і ускладнюється налагодження програми. Тому доцільно підходити до моделювання ВП дещо іншим чином: у режимі вентиляного збудження генераторів ВП пропонується моделювати за усталеним підходом, вважаючи кожну пару "транзистор – діод" єдиним ключем, а в режимі некерованого випрямляча (надалі просто випрямляча) використовувати модель трифазного діодного мостового випрямляча. Внаслідок цього через короткочасність існування режиму випрямляча більша частина розрахунків триватиме з використанням спрощеної моделі ВП, що сприятиме зменшенню часу розрахунків. Відповідно для ВП при роботі в режимі вентиляного збудження АГ отримуємо

$$\varphi_{14V} = \begin{cases} u_d - i_{14V} r_{S01}, & S1 \text{ вкл.} \\ -i_{14V} r_{S04}, & S4 \text{ вкл.} \end{cases}, \quad \varphi_{36V} = \begin{cases} u_d - i_{36} r_{S03}, & S3 \text{ вкл.} \\ -i_{36V} r_{S06}, & S6 \text{ вкл.} \end{cases}, \quad \varphi_{52V} = \begin{cases} u_d - i_{52V} r_{S05}, & S5 \text{ вкл.} \\ -i_{52V} r_{S02}, & S2 \text{ вкл.} \end{cases}$$

або

$$\begin{pmatrix} \varphi_{14V} \\ \varphi_{36V} \\ \varphi_{52V} \end{pmatrix} = u_d \begin{pmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \end{pmatrix} - U_{S0} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

де  $K_1, K_3, K_5$  – комутаційні функції ключів  $S1, S3, S5$  ( $K_i = 1$  – ключ замкнено,  $K_i = 0$  – ключ розімкнено);  $i = 1, 3, 5$ ;  $r_{S01} \dots r_{S06}$  – опори ключів  $S1 \dots S6$  у відкритому стані;  $U_{S0}$  – падіння напруги на довільному ключі у відкритому стані, яке надалі приймемо постійним ( $U_{S0} = const$ ).

Через потенціали  $\varphi_{14V}, \varphi_{36V}, \varphi_{52V}$  визначаються напруги на вході ВП:

$$\begin{pmatrix} u_{V1} \\ u_{V2} \\ u_{V3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varphi_{36V} - \varphi_{14V} \\ \varphi_{52V} - \varphi_{36V} \\ \varphi_{14V} - \varphi_{52V} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Коли всі транзистори ключів (рис. 3 з) ВП закриті, вважатимемо, що опір їх зворотних діодів має активно-індуктивний характер. За такого припущення на основі законів Кірхгофа отримуємо

$$u_d + i_{VD1} r_{VD1} + L_\partial \frac{di_{VD1}}{dt} + i_{VD4} r_{VD4} + L_\partial \frac{di_{VD4}}{dt} = 0; \quad (4)$$

$$u_d + i_{VD3} r_{VD3} + L_\partial \frac{di_{VD3}}{dt} + i_{VD6} r_{VD6} + L_\partial \frac{di_{VD6}}{dt} = 0; \quad (5)$$

$$u_d + i_{VD5} r_{VD5} + L_\partial \frac{di_{VD5}}{dt} + i_{VD2} r_{VD2} + L_\partial \frac{di_{VD2}}{dt} = 0; \quad (6)$$

$$u_{V1} - i_{VD3} r_{VD3} - L_\partial \frac{di_{VD3}}{dt} + i_{VD1} r_{VD1} + L_\partial \frac{di_{VD1}}{dt} = 0; \quad (7)$$

$$u_{V3} - i_{VD5} r_{VD5} - L_\partial \frac{di_{VD5}}{dt} + i_{VD1} r_{VD1} + L_\partial \frac{di_{VD1}}{dt} = 0, \quad (8)$$

де  $L_\partial$  і  $r_{VDi}$  ( $i=1 \dots 6$ ) – відповідно індуктивність і активний опір зворотних діодів.

Враховуючи, що

$$i_{VD6} = i_{VD1} + i_{VD3} + r_{VD5} - i_{VD4} - i_{VD2}, \quad (9)$$

та відповідно

$$\frac{di_{VD6}}{dt} = \frac{di_{VD1}}{dt} + \frac{di_{VD3}}{dt} + \frac{di_{VD5}}{dt} - \frac{di_{VD4}}{dt} - \frac{di_{VD2}}{dt},$$

приходимо до такої системи диференціальних рівнянь (ДР) у формі Коші:

$$\bar{I}'_{VD} = \frac{1}{6L_\delta} (\bar{X}_1 \bar{U}_V + \bar{X}_2 (\bar{R}_{VD} \bar{I}_{VD}) + r_{VD6} \bar{X}_3 \bar{I}_{VD}), \quad (10)$$

$$\text{або } \bar{I}'_{VD} = \left[ \frac{di_{VD1}}{dt}, \frac{di_{VD2}}{dt}, \frac{di_{VD3}}{dt}, \frac{di_{VD4}}{dt}, \frac{di_{VD5}}{dt} \right]^T;$$

$$\bar{X}_1 = \begin{pmatrix} -2 & -2 & -3 \\ 2 & -4 & -3 \\ 4 & -2 & -3 \\ 2 & 2 & -3 \\ -2 & 4 & -3 \end{pmatrix}; \quad \bar{X}_2 = \begin{pmatrix} -5 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ -1 & -5 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -5 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & -1 & -5 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & -5 \end{pmatrix}; \quad \bar{X}_3 = \begin{pmatrix} -1 & 1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & 1 & 1 \end{pmatrix};$$

$$\bar{R}_{VD} = \begin{pmatrix} r_{VD1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_{VD2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_{VD3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_{VD4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_{VD5} \end{pmatrix}; \quad \bar{I}_{VD} = \begin{pmatrix} i_{VD1} \\ i_{VD2} \\ i_{VD3} \\ i_{VD4} \\ i_{VD5} \end{pmatrix}; \quad \bar{U}_V = \begin{pmatrix} u_{V1} \\ u_{V2} \\ u_d \end{pmatrix}.$$

Якщо опори діодів прийемо активними і залежними від напрямку їх струмів, то отримаємо

$$r_{VDi} = \begin{cases} r_{вд}, & i_{VDi} > 0 \\ r_{зд}, & i_{VDi} \leq 0 \end{cases}, \quad i = 1 \dots 6, \quad (11)$$

де  $r_{вд}$ ,  $r_{зд}$  – активні опори діодів у відкритому і закритому стані,  $r_{зд} \gg r_{вд}$ .

Система диференціальних рівнянь (10) для визначення струмів зворотних діодів має бути доповнена початковими умовами. Початкові значення струмів  $i_{VD1} \dots i_{VD5}$  [ $i_{VD6}$  обчислюється з рівняння (9)] на момент закриття всіх транзисторів ВП найбільш просто визначити, якщо прийняти, що на початку першого кроку інтегрування (10) зворотний струм діодів дорівнює нулю. Тоді на цей момент часу струми відкритих діодів будуть дорівнювати вхідним струмам ВП:

$$\bar{I}_{VD0} = \bar{I}_{VD} \Big|_{t=t_V} = \left( -i_{14V} \overline{\text{sgn} i_{14V}} \quad i_{52V} \overline{\text{sgn} i_{52V}} \quad -i_{36V} \overline{\text{sgn} i_{36V}} \quad i_{14} \overline{\text{sgn} i_{14}} \quad -i_{52V} \overline{\text{sgn} i_{52V}} \right)_{t=t_V}^T, \quad (12)$$

де  $t = t_V$  – момент часу, з якого ВП починає працювати як випрямляч;  $\text{sgn } x = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases}$ ,

$\overline{\text{sgn } x}$  – величина, інверсна до  $\text{sgn } x$ .

Як видно з (12), для визначення початкових струмів діодів необхідно знати лише знак і абсолютне значення вхідних струмів ВП на цей момент часу.

Інший підхід до визначення  $\bar{I}_{VD0}$ , що пропонується, передбачає розрахунок початкових струмів з системи алгебраїчних рівнянь. Якщо прийняти  $L_\delta = 0 \Big|_{t=t_V}$ , то відповідно до цього з (4)...(6) отримуємо для дискретного моменту часу  $t_V$

$$u_d + i_{VD1} r_{VD1} + i_{VD4} r_{VD4} = 0; \quad (13)$$

$$u_d + i_{VD3} r_{VD3} + i_{VD6} r_{VD6} = 0; \quad (14)$$

$$u_d + i_{VD5} r_{VD5} + i_{VD2} r_{VD2} = 0. \quad (15)$$

Отримані рівняння доповнимо двома наступними:

$$i_{VD4} - i_{VD1} - i_{14V} = 0, \quad i_{VD6} - i_{VD3} - i_{36V} = 0. \quad (16)$$

З (13)...(16), врахувавши (9), отримуємо

$$\bar{I}_{VD0} = \begin{pmatrix} -\frac{u_d + i_{14V} r_{VD4}}{r_{VD1} + r_{VD4}} & \frac{i_{52V} r_{VD5} - u_d}{r_{VD5} + r_{VD2}} & -\frac{u_d + i_{36V} r_{VD6}}{r_{VD3} + r_{VD6}} & \frac{i_{14V} r_{VD1} - u_d}{r_{VD1} + r_{VD4}} & -\frac{i_{52V} r_{VD2} + u_d}{r_{VD5} + r_{VD2}} \end{pmatrix}^T, \quad (17)$$

де  $\bar{I}_{VD0}$  – вектор-стовпець початкових струмів діодів на момент часу  $t_V$ . Невідомі величини активних опорів діодів у (17) необхідно визначити на основі (11) і (12) на початку попереднього кроку інтегрування ( $t = t_V - \tau_I$ ,  $\tau_I$  – крок інтегрування).

Напруга на конденсаторі  $C_d$  розраховується при роботі ВП за вентиляльного збудження (активний режим) АГ з рівняння

$$\frac{du_d}{dt} = \frac{1}{C_d} (-k_1 i_{14V} - k_3 i_{36V} - k_5 i_{52V} - i_{AH}), \quad (18)$$

а в режимі некерованого випрямляча (пасивний режим) з ДР

$$\frac{du_d}{dt} = \frac{1}{C_d} (i_{VD1} + i_{VD3} + i_{VD5} - i_{AH}), \quad (19)$$

де  $i_{AH} = K_{AH} u_d / R_{AH}$ ,  $K_{AH}$  – комутаційна функція ідеального ключа в колі автономного навантаження  $R_{AH}$ ;  $K_{AH} = \begin{cases} 1, & S_{AH} \text{ – замкнено} \\ 0, & S_{AH} \text{ – розімкнено} \end{cases}$ .

Ключі  $S14$ ,  $S15$  та  $S24$ ,  $S25$  вважатимемо ідеальними (нульовий опір у відкритому стані, нескінченний – у закритому), а  $S11$ ,  $S12$ ,  $S13$  та  $S21$ ,  $S22$ ,  $S23$  – такими, що мають нескінченний опір у закритому стані і відмінний від нульового активний у відкритому. Тоді вихідні напруги АГ1 і АГ2 у разі відкритого стану основних ключів  $SW1$  ( $SW2$ ) можуть бути розраховані з таких рівнянь:

$$\begin{pmatrix} u_{G11} \\ u_{G12} \\ u_{G13} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varphi_{12} - \varphi_{11} \\ \varphi_{13} - \varphi_{12} \\ \varphi_{11} - \varphi_{13} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_{V1} + R_{SW0} (i_{SW11} - i_{SW12}) \\ u_{V2} + R_{SW0} (i_{SW12} - i_{SW13}) \\ u_{V3} + R_{SW0} (i_{SW13} - i_{SW11}) \end{pmatrix}; \quad (20)$$

$$\begin{pmatrix} u_{G21} \\ u_{G22} \\ u_{G23} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varphi_{22} - \varphi_{21} \\ \varphi_{23} - \varphi_{22} \\ \varphi_{21} - \varphi_{23} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_{V1} + R_{SW0} (i_{SW21} - i_{SW22}) \\ u_{V2} + R_{SW0} (i_{SW22} - i_{SW23}) \\ u_{V3} + R_{SW0} (i_{SW23} - i_{SW21}) \end{pmatrix}, \quad (21)$$

де  $R_{SW0}$  – опір основних ключів комутаторів у відкритому стані.

В іншому випадку, коли основні ключі  $SW1$  ( $SW2$ ) розімкнені, а допоміжні замкнені, вихідні напруги АГ1 (АГ2) дорівнюють нулю:  $u_{G1(2)1} = u_{G1(2)2} = u_{G1(2)3} = 0$ .

*RC елементи на вході ВП* призначені головним чином для полегшення розрахунку вхідних напруг ВП у пасивному режимі роботи. Відмінності в математичному описі цих елементів під час активної і пасивної роботи ВП обумовлені відмінністю вхідних і вихідних даних моделі ВП під час цих двох режимів роботи. Як видно з виразів (2), (3), (18), вхідними змінними рівнянь ВП під час вентиляльного збудження АГ є напруга  $u_d$ , струми  $i_{14V}$ ,  $i_{36V}$ ,  $i_{52V}$ ,  $i_{AH}$  та комутаційні функції, а вихідними – напруги  $u_{V1}$ ,  $u_{V2}$ ,  $u_{V3}$ . Коли ж ВП працює як некерований випрямляч, вхідними змінними для його моделі (10), (19) є напруги  $u_{V1}$ ,  $u_{V2}$ ,  $u_{V3}$ , опори і струми діодів, струм навантаження, а основною вихідною величиною – напруга  $u_d$ . Відповідно до зазначеного при роботі ВП в режимі вентиляльного збудження рівняння *RC* ланок на вході ВП подамо таким чином:

$$\begin{pmatrix} i_{L3} \\ i_{L4} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i_{K31} - i_{K32} \\ i_{K33} - i_{K31} \end{pmatrix}; \quad \begin{pmatrix} i_{K31} \\ i_{K32} \\ i_{K33} \end{pmatrix} = \frac{1}{R_{K3}} \begin{pmatrix} u_{V3} - u_{K31} \\ u_{V1} - u_{K32} \\ u_{V2} - u_{K33} \end{pmatrix}; \quad \begin{pmatrix} u_{K31} \\ u_{K32} \\ u_{K33} \end{pmatrix} = \frac{1}{C_{K3}} \begin{pmatrix} \int i_{K31} dt \\ \int i_{K32} dt \\ \int i_{K33} dt \end{pmatrix}, \quad (22)$$

де струми  $i_{L3}$ ,  $i_{L4}$  є вихідними змінними, які надалі використовуються в рівняннях вхідних струмів ВП:

$$\begin{pmatrix} i_{14V} \\ i_{36V} \\ i_{52V} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i_{L3} + i_{SW11} + i_{SW21} \\ -i_{14V} - i_{52V} \\ i_{L4} + i_{SW13} + i_{SW23} \end{pmatrix}. \quad (23)$$

У режимі некерованого випрямляча рівняння RC ланок на вході ВП приведено до де-що іншого вигляду:

$$\begin{pmatrix} u_{V1} \\ u_{V2} \\ u_{V3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_{K32} + R_{K3}(i_{K33} - i_{L3} - i_{L4}) \\ -u_{V1} - u_{V3} \\ u_{K31} + R_{K3}(i_{K33} - i_{L4}) \end{pmatrix}; \quad \begin{pmatrix} u_{K31} \\ u_{K32} \\ u_{K33} \end{pmatrix} = \frac{1}{C_{K3}} \begin{pmatrix} \int (i_{K33} - i_{L4}) dt \\ \int (i_{K33} - i_{L3} - i_{L4}) dt \\ \int i_{K33} dt \end{pmatrix}, \quad (24)$$

де  $i_{K33} = -(u_{K31} + u_{K32} + u_{K33})/R_{K3} + 2i_{L4} + i_{L3}/3$ .

RC елементи на клеммах статорних обмоток АГ призначені головним чином для зменшення жорсткості системи рівнянь математичної моделі (рис. 1), а в умовах фізичної моделі за далекого розміщення АГ від ВП – для зменшення комутаційних перенапруг на вентилях S14, S15, S24, S25. Їх математичний опис здійснимо таким чином:

$$\begin{pmatrix} i_{K11} \\ i_{K12} \\ i_{K13} \end{pmatrix} = \frac{1}{R_{K1}} \begin{pmatrix} u_{G11} - u_{K11} \\ u_{G12} - u_{K12} \\ u_{G13} - u_{K13} \end{pmatrix}; \quad \begin{pmatrix} u_{K11} \\ u_{K12} \\ u_{K13} \end{pmatrix} = \frac{1}{C_{K1}} \begin{pmatrix} \int i_{K11} dt \\ \int i_{K12} dt \\ \int i_{K13} dt \end{pmatrix}; \quad \begin{pmatrix} i_{L1} \\ i_{L2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i_{K13} - i_{K11} \\ i_{K12} - i_{K13} \end{pmatrix}; \quad (25)$$

$$\begin{pmatrix} i_{K21} \\ i_{K22} \\ i_{K23} \end{pmatrix} = \frac{1}{R_{K2}} \begin{pmatrix} u_{G21} - u_{K21} \\ u_{G22} - u_{K22} \\ u_{G23} - u_{K23} \end{pmatrix}; \quad \begin{pmatrix} u_{K21} \\ u_{K22} \\ u_{K23} \end{pmatrix} = \frac{1}{C_{K2}} \begin{pmatrix} \int i_{K21} dt \\ \int i_{K22} dt \\ \int i_{K23} dt \end{pmatrix}; \quad \begin{pmatrix} i_{L5} \\ i_{L6} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i_{K23} - i_{K21} \\ i_{R22} - i_{K23} \end{pmatrix}, \quad (26)$$

де вхідними змінними є напруги  $u_{G11}$ ,  $u_{G12}$ ,  $u_{G13}$  та  $u_{G21}$ ,  $u_{G22}$ ,  $u_{G23}$ , а  $i_{L1}$ ,  $i_{L2}$  та  $i_{L5}$ ,  $i_{L6}$  є вихідними змінними, які входять до рівнянь визначення  $i_{SW11}$ ,  $i_{SW13}$  та  $i_{SW21}$ ,  $i_{SW23}$  при провідному стані основних ключів SW1, SW2.

Для схеми з'єднання обмоток машин на рис. 2 а зазначені рівняння мають такий вигляд:

$$\begin{pmatrix} i_{SW11} \\ i_{SW13} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i_{A1} - i_{B1} + i_{L1} \\ i_{C1} - i_{A1} + i_{L2} \end{pmatrix}; \quad \begin{pmatrix} i_{SW21} \\ i_{SW23} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i_{A2} - i_{B2} + i_{L5} \\ i_{C2} - i_{A2} + i_{L6} \end{pmatrix}, \quad (27)$$

а на рис. 2 б –

$$\begin{pmatrix} i_{SW11} \\ i_{SW13} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i_{A1} + i_{L1} \\ i_{C1} + i_{L2} \end{pmatrix}; \quad \begin{pmatrix} i_{SW21} \\ i_{SW23} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i_{A2} + i_{L5} \\ i_{C2} + i_{L6} \end{pmatrix}. \quad (28)$$

За непровідного стану основних ключів SW1, SW2 вважатимемо, що струми через них не протікають:

$$\begin{pmatrix} i_{SW11} \\ i_{SW13} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i_{SW21} \\ i_{SW23} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (29)$$

Система рівнянь (1)...(3), (9)...(11), (12) або (17), (18)...(29) дає змогу розраховувати часові залежності величин, що характеризують електромагнітні процеси в силовій частині машинно-вентильного комплексу (рис. 1).

Попереднє тестування математичної моделі електрогенеруючого комплексу (рис. 1) було проведено за таких умов:

- обидва генератори ідентичні, номінальної потужності 75 кВт, промислової напруги і частоти 230 В / 50 Гц (параметри наведено в [3]), частота обертання дорівнює 1500 об/хв;
- струми ВП регулюються гістерезисними регуляторами (струмове керування), задані струми ВП розраховуються через задані складові  $i_{q1}^*$ ,  $i_{q2}^*$ ,  $i_{d1}^*$ ,  $i_{d2}^*$  [1, 5];
- опори і ємність  $RC$  ланок мають такі значення:  $R_{K1} = R_{K2} = 10^4$  Ом,  $C_{K1} = C_{K2} = 2 \cdot 10^{-4}$  Ф,  $R_{K3} = 200$  Ом,  $C_{K3} = 1 \cdot 10^{-7}$  Ф;
- початкова напруга на конденсаторі  $C_d$  дорівнює 950 В, а його ємність –  $75 \cdot 10^{-3}$  Ф.

У межах семи часових інтервалів (рис. 4) стан і режими роботи елементів комплексу змінюються таким чином:

- 1 – ключі  $S11$ ,  $S12$ ,  $S13$ ,  $S24$ ,  $S25$  комутаторів  $SW1$ ,  $SW2$  замкнено, інші розімкнено, ВП працює в активному режимі, АГ1 – збуджений, АГ2 – незбуджений;
- 2 – стан ключів комутаторів ідентичний інтервалу 1, ВП – у пасивному режимі, АГ1 втрачає збудження, АГ2 – незбуджений;
- 3 – ключі  $S11$ ,  $S12$ ,  $S13$ ,  $S21$ ,  $S22$ ,  $S23$  розімкнено, інші замкнено, ВП в пасивному режимі, обидва АГ незбуджені;
- 4 – ключі  $S14$ ,  $S15$ ,  $S21$ ,  $S22$ ,  $S23$  замкнено, інші розімкнено, ВП працює в активному режимі, АГ1 – незбуджений, АГ2 – збуджується;
- 5 – стан ключів комутаторів ідентичний інтервалу 4, ВП – в активному режимі, АГ1 незбуджений, АГ2 – збуджений;
- 6 – стан ключів комутаторів ідентичний інтервалу 4, ВП – у пасивному режимі, АГ1 – незбуджений, АГ2 – втрачає збудження;
- 7 – стан АГ – незбуджені, стан ключів кожного комутатора і ВП відповідає інтервалу 3.

Інтервали 1 і 4 під час чисельного експерименту були задані значно меншими за період фазної напруги з метою кращої візуалізації процесів під час інших інтервалів роботи. На практиці інтервали 1, 4 будуть неспівставно тривалішими. Одна в.о. струмів на рис. 4 відповідає номінальному значенню фазного струму АГ.

З рис. 4 видно, що спад струмів статора АГ, який втрачає збудження, до практично нульового значення (інтервали 2, 6) займає в часі 240 ... 250 мкс, а зворотний процес, тобто процес наростання струмів до заданих значень під час збудження АГ – близько 270 мкс. Така достатньо коротка тривалість зазначених процесів дає підстави вважати, що вони не будуть суттєво впливати на характеристики електрогенеруючого машинно-вентильного комплексу. Також слід зазначити, що тривалість інтервалів збудження і втрати збудження є важливими даними, які впливають на вибір ємності конденсатора  $C_d$ .

У той же час необхідно зазначити, що моделювання проводилось за досить малих величин потокозчеплень у машинах. У результаті цього не було необхідності в їх зменшенні перед відімкненням АГ. У реальних робочих режимах модуль вектора потокозчеплення перед відімкненням АГ має бути попередньо зменшений.

**Висновки.** Розроблено математичну модель силової частини електрогенеруючого комплексу на основі асинхронних генераторів з спільним напівпровідниковим перетворювачем для збудження. Модель дає змогу досліджувати електромагнітні процеси в елементах комплексу при роботі вентильного перетворювача в активному (виконує функції регулятора реактивної потужності і активного випрямляча) і пасивному (працює як некерований випрямляч) режимах.

Виконані тестові дослідження комплексу з генераторами на основі чотириполюсних асинхронних машин, номінальна потужність і номінальна напруга статорної обмотки яких складають відповідно 75 кВт та 220/380 В. Одержані результати не суперечать теорії асинхронних вентильних генераторів.



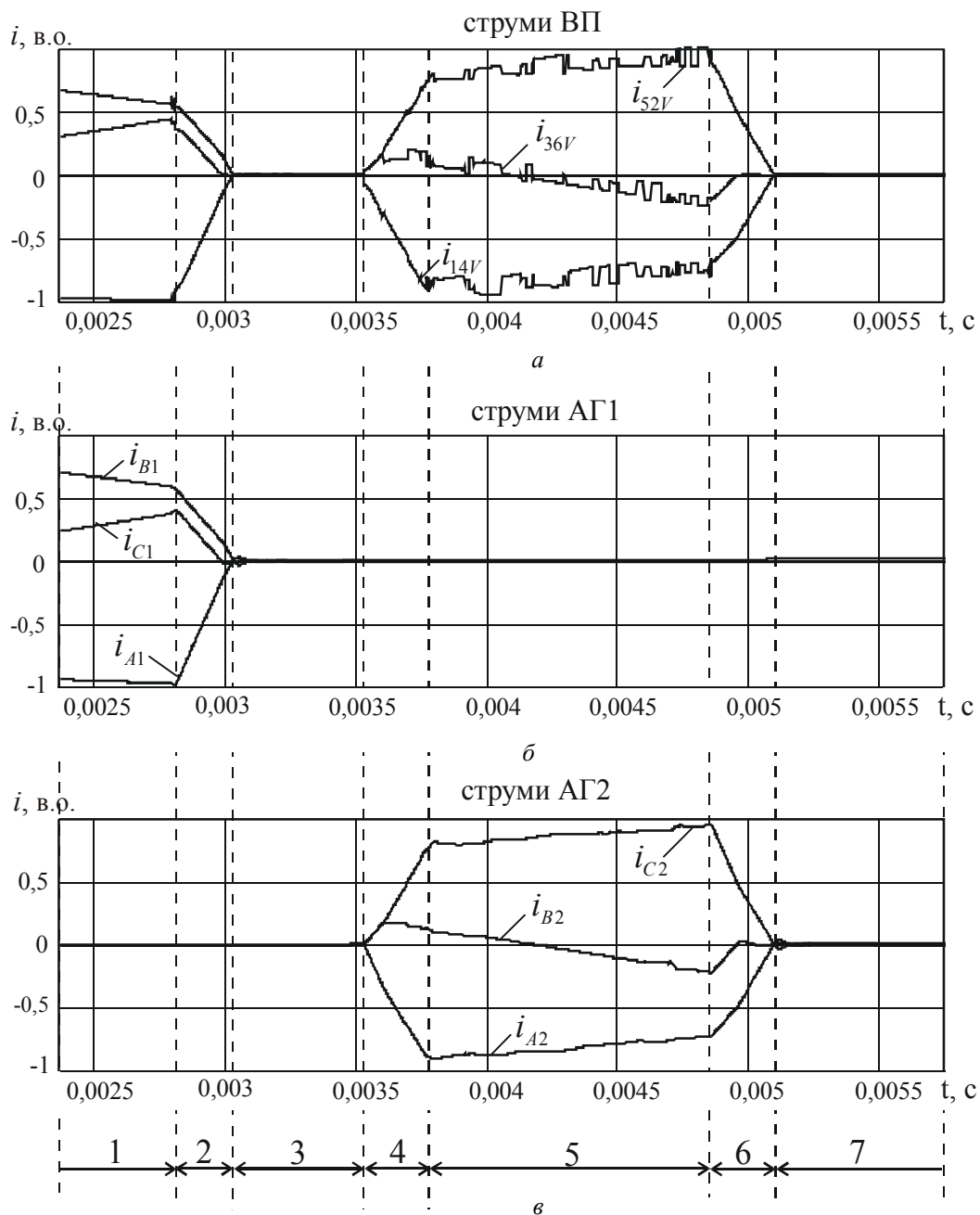


Рис. 4

Більш детальні дослідження ЕГК (рис. 1), у тому числі дослідження його роботи в складі генеруючих систем з різними приводними двигунами планується розглянути в наступних публікаціях.

1. Джюра О.В. Гідродизельна автономна енергосистема з асинхронними генераторами // Гідроенергетика України. – 2013. – № 3-4. – С. 40–46.
2. Лукутин Б.В., Обухов С.Г., Шандарова Е.Б. Автономное электроснабжение от микрогидроэлектростанций. – Томск, 2001. – 104 с.
3. Мазуренко Л.І., Гребеніков В.В., Джюра О.В., Романенко В.І., Попович О.М., Головань І.В., Шуруб Ю.В., Бібік О.В., Приймак М.В. Моделювання і алгоритми керування електромеханічних перетворювачів енергії та систем на їх основі // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ. – 2015. – Вип. 41. – С. 50–61.
4. Мазуренко Л.І., Лищенко А.І. Асинхронные генераторы с вентильным и вентильно-емкостным возбуждением для автономных энергоустановок. – К.: Наук. думка, 2011. – 272 с.
5. Antony A.P., Sankaran R. Simulation of Performance of a Cage Induction Motor Driven Spooler Drive with Speed and Current Feedback using Field-Oriented Control // International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering Vol. 3, Issue 3, March 2014. – P. 7797–7806.

6. Yaramasu V., Wu B., Sen P.C., Kouro S. High-Power Wind Energy Conversion Systems: State-of-the-Art and Emerging Technologies // Proc. of the IEEE, Vol. 103, № 5, May 2015. – P. 740–788.
7. How to benefit from multiple paralleled generators in traditional single-generator stand by applications / Интернет ресурс / [http://kohlerpower.com/common/107308\\_Genset%20Paper.pdf](http://kohlerpower.com/common/107308_Genset%20Paper.pdf)

УДК 621.313.332

**Л.И. Мазуренко**, докт. техн. наук, **А.В. Джура**, канд. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

**Математическая модель автономного электрогенерирующего комплекса с асинхронными генераторами и единственным полупроводниковым преобразователем возбуждения**

*Разработана математическая модель автономного электрогенерирующего комплекса с двумя асинхронными генераторами и общей вентильной системой возбуждения, которая позволяет исследовать переходные процессы в его силовой части как при инверсном переключении транзисторов каждой стойки, так и при непроводящем состоянии всех транзисторов вентильного преобразователя. Проведено тестовое численное исследование режимов работы комплекса с двумя асинхронными генераторами мощностью 75 кВт при постоянной частоте вращения. В режиме, приближенном к холостому ходу, рассчитаны временные зависимости величин, которые характеризуют процессы во время поочередного возбуждения генераторов и потери ими возбуждения, их подключения и отсоединения от вентильной системы возбуждения. Библ. 7, рис.4.*

**Ключевые слова:** электрогенерирующий комплекс, асинхронный генератор, единый вентильный преобразователь.

**L.I. Mazurenko, O.V. Dzhura**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

**The mathematical model of a stand-alone power generating complex containing two asynchronous generators and a single semiconductor converter for excitation**

*The mathematical model of the stand-alone power generating complex with two asynchronous generators and common excitation system based on transistors. This model allows to research transients in power circuits of the complex in an inverse transistor switching mode for each leg and in non-conductive state of inverter transistors. The numerical and experimental tests of operation modes were executed for complex containing two asynchronous generators of 75 kW power each at constant speed of rotation. In the operation mode similar to non-loaded operation the transients were obtained for operation modes such as interlaced generators excitation and its loss, as generators connecting and disconnecting from transistor excitation system. References 7, figures 4.*

**Key words:** power generation complex, induction generator, single inverter.

Надійшла 12.07.2016

Received 12.07.2016

УДК 621.313.8

**ЛЕНТОЧНЫЕ МАГНИТОПРОВОДЫ ИЗ АМОРФНОГО ЖЕЛЕЗА В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТИПА**

**А.Е. Антонов**, докт. техн. наук, **И.С. Петухов**, докт. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

e-mail: aoe@ied.org.ua

*Получены частотные зависимости потерь в ленточных магнитопроводах из аморфного железа при радиальной и аксиальной ориентации магнитного поля ротора в электромеханическом преобразователе магнитоэлектрического типа. Выполнен сравнительный анализ полученных частотных зависимостей потерь с потерями в магнитопроводах из электротехнической стали. Определены структуры магнитоэлектрических двигателей, в которых целесообразно применение ленточных магнитопроводов. Библ. 6, рис. 5.*

**Ключевые слова:** шихтованный магнитопровод, ленточный магнитопровод, потери на вихревые токи и гистерезис, магнитоэлектрический двигатель.

Настоящее исследование продолжает цикл работ, направленных на создание технологичных магнитопроводов, в том числе сложной формы для быстроходных и моментных элект-