

Динаміка електроприводу штангової нафтовидобувної установки

Розглянуто питання математичного моделювання динаміки електроприводу штангової нафтовидобувної установки з урахуванням змінного моменту інерції та циклічного закону зміни навантаження на основі використання математичної моделі приводного асинхронного двигуна, в якій враховується явище витіснення струму в стержнях ротора та насичення магнітопроводу.

Рассмотрен вопрос математического моделирования динамики электропривода штанговой нефтяной добывающей установки с учетом переменного момента инерции и циклического закона изменения нагрузки на базе использования математической модели приводного асинхронного двигателя, в которой учитывается явление вытеснения тока в стержнях ротора и насыщение магнитопровода.

Вступ. Механізоване видобування нафти із свердловин в Україні здебільшого здійснюється глибинними плунжерними помпами одинарної дії, привод в рух яких здійснюється з поверхні землі за допомогою колони штанг. Для цього біля свердловини встановлюють верстат-гойдалку, який перетворює обертовий рух ротора електродвигуна у зворотньо-поступальний рух зв'язаної з плунжером помпи колони штанг [1]. Установа для видобування нафти за допомогою верстата-гойдалки — це багатоланковий механізм зі змінним моментом інерції і змінним моментом навантаження. Для приводу верстатів-гойдалок використовують АД з короткозамкненим ротором з покращеними пусковими властивостями.

Суть проблеми. Відомі методики, які використовуються для визначення законів руху елементів верстата-гойдалки, мають в своїй основі допущення про постійність швидкості обертання жорстко зв'язаного з вихідним валом редуктора ротора АД протягом подвійного ходу точки підвішування штанг. Однак навантаження, яке діє на вал АД в усталених режимах роботи штангової нафтовидобувної установки (ШНВУ), має циклічно-змінний характер [1, 6], а це призводить до того, що миттєва кутова швидкість обертання валу двигуна є змінною величиною, що зумовлює нерівномірність кутової швидкості обертання кривошина. Отже застосування до дослідження кінематики елементів ШНВУ викладених в [6] не тільки наближених, але й, так званих, точних методик не забезпечує повної картини процесів, які мають місце при роботі установки протягом подвійного ходу точки підвішування штанг, що не дає змогу з достатньою точністю визначати швидкості та прискорення усіх елементів і, як наслідок, сил, які на них діють. Застосування комп'ютерної техніки для керування роботою ШНВУ вимагає розроблення алгоритмів і програм, котрі б давали достовірну інформацію про процеси, які протікають в ШНВУ і в системі електроприводу зокрема, що дасть змогу аналізувати

процеси в реальному часі.

Кожне положення точки підвішування штанг характеризується відповідними зусиллями, які діють на полірований шток, а також швидкостями та прискореннями. Якщо вважати швидкість обертання ротора АД постійною, що зазвичай робиться [6], то закон руху колони штанг визначається лише кінематичними параметрами механічної частини приводу. На практиці робота ШНВУ супроводжується появою широкого спектру поздовжніх коливань, що зумовлює ударні навантаження, які згубно впливають на втомну міцність матеріалу штанг і, як наслідок, призводять до аварійних ситуацій. Щоб їх уникнути вживають різні заходи [2], які гасять коливання, однак правильний їх вибір можливий лише на підставі математичного моделювання роботи електроприводу ШНВУ в цілому з урахуванням усіх важливих чинників.

Верстат-гойдалки ШНВУ належать до механізмів з важкими умовами пуску. Для їх приводу в рух, враховуючи значну інерцію всіх рухомих частин, можна використовувати лише ті АД, в яких пусковий обертальний момент приблизно у два рази більший від номінального [1, 6]. Цим вимогам задовольняють двигуни, які мають на роторі глибокі пази або подвійну клітку, тобто в яких використовується явище витіснення струму, тому в математичній моделі двигуна його врахування є визначальним. Іншими чинниками, які впливають на роботу ШНВУ, є насичення магнітопроводу АД, змінний момент інерції механізму і динамічне навантаження. Тільки врахування цих чинників у їх взаємозв'язку може дати достовірні результати математичного моделювання динаміки електроприводу ШНВУ.

Пускові режими. Врахувати насичення магнітопроводу та витіснення струму в стержнях ротора АД в динамічних режимах найбільш точно можна шляхом використання рівнянь електромагнітного поля. Однак застосовувати польові методи для розв'язування задач динаміки електроприводу ШНВУ

недоцільно внаслідок їх громіздкості, а достатньо точні результати можна отримати методами теорії кіл.

Найбільш простим методом урахування насичення магнітопроводу в коловій постановці задачі є використання насичених значень статичних індуктивностей, які отримують шляхом множення ненасичених значень на коефіцієнт насичення. Витіснення струму також можна врахувати за допомогою відповідних коефіцієнтів, які визначають глибину проникнення електромагнітного поля в провідник. Однак такий спосіб урахування цих чинників для розрахунку динамічних режимів електроприводів малоприматний і не може забезпечити достовірність отриманих результатів.

В розробленій математичній моделі електроприводу ШНВУ для врахування насичення магнітопроводу АД використовуються криві намагнічування основного магнітного шляху та шляхів потоків розсіювання обмотки статора і ротора, які дають змогу обчислити матрицю диференціальних індуктивностей [8]. При цьому насичення основного магнітного шляху і шляхів потоків розсіювання розраховуються незалежно. Для врахування явища витіснення струму в стрижнях ротора кожен з них розбивається по висоті на n ділянок, в межах яких густину струму можна вважати постійною [3]. В результаті вважається, що на роторі є n розподілених за синусоїдним законом короткозамкнених обмоток, між якими існує взаємодуктивний зв'язок як за рахунок основного магнітного потоку, так і потоків розсіювання. Потокозчеплення шляхів розсіювання обмоток ротора розділено на чотири складові: потокозчеплення з потоками, які замикаються навколо пазів через шліци; потокозчеплення з потоками, які замикаються поперек пазів; потокозчеплення з потоками лобових частин; потокозчеплення диференціального розсіювання. Останні два потокозчеплення є лінійними функціями струмів ротора і від насичення не залежать. Потокозчеплення стрижня з потоком шліцевого розсіювання є нелінійною функцією струму стрижня і враховується за допомогою окремої кривої намагнічування. Потокозчеплення стрижня ротора з потоками розсіювання, які замикаються навколо кожного з n елементів стрижня і проходять поперек пазів, зв'язане лінійно зі струмами цих елементів. Алгоритм їх обчислення викладений в [9].

Однією з основних проблем математичного моделювання процесів в ШНВУ є вибір системи координат для опису електромагнітних процесів в АД. Навантаження ШНВУ має складний періодично-змінний характер, тому електромагнітні процеси в АД є динамічними не тільки в пускових, але й в стаціонарних режимах роботи. Тому рівняння електромагнітної рівноваги в будь-якому координатному базисі завжди будуть диференціальними. Однак застосовувати систему фізичних координат (фазних), якщо не розглядати аварійні режими, які характеризуються різними несиметріями, недоцільно. Оскільки серійні АД мають

електричну і магнітну симетрію, найбільш раціональною системою координат є ортогональні осі x, y [4], які обертаються синхронно з полем двигуна. Це дає змогу вилучити з диференціальних рівнянь (ДР) електричної рівноваги контурів куту повороту ротора, а значить відпадає необхідність розглядати процеси всередині періоду зміни напруги живлення. Таке перетворення дозволяє описати електромагнітні процеси в АД мінімальною кількістю рівнянь, але в той же час не призводить до зниження точності розрахунків для симетричних машин.

В динамічних режимах електромагнітні процеси в перетворених до осей x, y контурах статора і ротора АД з урахуванням розбиття стрижня по висоті на n елементів описуються системою ДР $m=2(1+n)$ -го порядку, яка має вигляд

$$\begin{aligned} d\psi_{sx}/dt &= \omega_0 \psi_{sy} - R_s i_{sx} + u_{sx}; \\ d\psi_{sy}/dt &= -\omega_0 \psi_{sx} - R_s i_{sy} + u_{sy}; \\ d\psi_{1x}/dt &= (\omega_0 - \omega) \psi_{1y} - R_1 i_{1x}; \\ d\psi_{1y}/dt &= -(\omega_0 - \omega) \psi_{1x} - R_1 i_{1y}; \\ &\dots\dots\dots \\ d\psi_{nx}/dt &= (\omega_0 - \omega) \psi_{ny} - R_n i_{nx}; \\ d\psi_{ny}/dt &= -(\omega_0 - \omega) \psi_{nx} - R_n i_{ny}, \end{aligned} \quad (1)$$

де $\psi_{sx}, \psi_{sy}, \psi_{1x}, \psi_{1y}, \dots, \psi_{nx}, \psi_{ny}, i_{sx}, i_{sy}, i_{1x}, i_{1y}, \dots, i_{nx}, i_{ny}$ — потокозчеплення та струми перетворених контурів статора і ротора; R_s, R_1, \dots, R_n — активні опори цих контурів; ω_0 — циклічна частота напруги живлення; ω — кутова швидкість обертання ротора, виражена в електричних рад. за сек.

Враховуючи, що

$$\frac{d\vec{\psi}}{dt} = \frac{\partial \vec{\psi}}{\partial t} \frac{d\vec{t}}{dt} = L \frac{d\vec{i}}{dt},$$

систему ДР (1) можна записати у вигляді

$$L \frac{d\vec{i}}{dt} = D\vec{\psi} - R\vec{i} + \vec{u}, \quad (2)$$

де L — матриця диференціальних індуктивностей перетворених контурів АД [8], $\vec{\psi} = (\psi_{sx}, \psi_{sy}, \psi_{1x}, \psi_{1y}, \dots, \psi_{nx}, \psi_{ny})^T$; $\vec{i} = (i_{sx}, i_{sy}, i_{1x}, i_{1y}, \dots, i_{nx}, i_{ny})^T$; $\vec{u} = (u_{sx}, u_{sy}, 0, \dots, 0)^T$ — вектори потокозчеплень струмів і напруг контурів; $R = \text{diag}(R_s, R_s, R_{r1}, R_{r1}, \dots, R_1, R_m)$ — діагональна матриця активних опорів; D — квадратна матриця m -го порядку, елементи якої визначаються системою рівнянь (1). (Верхній індекс "T" означає транспонування).

Електромеханічний перехідний процес опису-

ється системою ДР, що складається з рівнянь (1) та рівняння динаміки ротора, яке, враховуючи змінний момент інерції J установки, має вигляд

$$\frac{J}{p_0} \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega}{2p_0} \frac{dJ}{dt} = M_e(t) - M_B(t), \quad (3)$$

де p_0 — кількість пар полюсів АД; $M_e(t) = 1,5p_0(\psi_{sx} i_{sy} - \psi_{sy} i_{sx})$ — електромагнітний момент двигуна, який залежить від часової координати t , оскільки струми та потокозчеплення перетворених контурів змінюються внаслідок динамічного характеру навантаження не тільки в перехідних, але й в усталених режимах роботи; $M_B(t)$ — часова залежність моменту навантаження на валу двигуна; $J = J_d + J_p + J_{kp} + J_{ш} + J_{б} + J_{шп}$ — момент інерції установки, який складається із суми моментів інерції всіх рухомих частин (J_d — ротора двигуна разом із муфтою та шківом, за допомогою яких він з'єднаний клинопасовою передачею зі шківом вхідного валу редуктора; J_p — редуктора, який складається із моментів інерції зубчастих коліс, приведених до вхідного валу; J_{kp} — кривошипа разом із зрівноважувальним вантажем на його кінці (при роторному зрівноваженні); $J_{ш}$ — шатуна; $J_{б}$ — балансира разом із балансиричним вантажем (при балансиричному зрівноваженні); $J_{шп}$ — штанг з плунжером помпи та стовпа рідини, яка знаходиться над ним). Моменти інерції всіх елементів установки обчислюються за відомими [7] формулами і приводяться до валу двигуна. Серед них є як незмінні, так і такі, що залежать від кута α повороту кривошипа. В результаті сумарний момент інерції $J = J(\alpha)$, як і момент навантаження, залежать від кута повороту кривошипа, який, в свою чергу, є функцією кута γ повороту ротора двигуна.

Часова координата t зв'язана з кутовою координатою α повороту кривошипа залежністю

$$dt = p_0 k_i \omega^{-1} d\alpha, \quad (4)$$

де k_i — передавальне число від валу двигуна до осі обертання кривошипа, а перехід від похідної моменту інерції J по часу t до похідної по кутові α здійснюється за формулою

$$dJ/dt = (\omega/k_i p_0) (dJ/d\alpha),$$

З урахуванням сказаного рівняння (3) набуває вигляд

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{p_0}{J} [M_e(t) - M_B(\alpha)] - \frac{p_0 k_i}{2J} \frac{dJ}{d\alpha}. \quad (5)$$

Розрахунок електромеханічного перехідного процесу полягає в розв'язуванні задачі Коші для системи ДР (2), (5) при відповідних початкових

умовах. При цьому на кожному крокові (підкрокові) інтегрування необхідно обчислювати матрицю L диференціальних індуктивностей. Похідна $dJ/d\alpha$ розраховується чисельним методом і зберігається в пам'яті комп'ютера разом із періодичними залежностями $J = J(\alpha)$ та $M_B(\alpha)$.

Стаціонарні режими. Для проектування систем керування здебільшого практичний інтерес мають не перехідні процеси, а усталені режими роботи електроприводу ШНВУ. В такому разі розв'язувати задачу методом усталення нецільно. Це пояснюється тим, що часове значення періоду повного циклу зміни навантаження ШНВУ в кілька десятків разів перевищує період обертання ротора АД, а внаслідок значної інерційності електроприводу електромеханічний перехідний процес триває надто довго, що вимагає інтегрування системи ДР до усталення процесу на великому часовому інтервалі. Крім того, існує проблема ідентифікації закінчення перехідного процесу, оскільки значення координат на початку і в кінці періоду повторюваності процесів можуть мало відрізнятися.

В стаціонарних режимах роботи електроприводу ШНВУ процеси є періодичними, причому період T_M зміни моменту навантаження дорівнює періодові обертання кривошипа, яке відповідає подвійному ходу плунжера глибинної помпи. Отже, в усталеному режимі розв'язком системи ДР (2), (5) є T_M -періодична залежність вектора \vec{i} струмів контурів АД. Як показано в [5], ці залежності можна отримати шляхом розв'язання нелінійної двоточкової крайової задачі для системи ДР першого порядку з періодичними крайовими умовами диференціальним сплайн-методом, який дає змогу отримати залежності координат режиму на періоді, не вдаючись до розрахунку перехідного процесу, тобто в позачасовій області. Для цього систему ДР (2), (5) необхідно алгебризувати шляхом апроксимації координат режиму на періоді повторюваності процесів, однак часове значення цього періоду наперед не відоме, тому необхідно здійснити перехід від похідних по часу t до похідних по куту α повороту кривошипа.

Беручи до уваги (4), отримасмо

$$\begin{aligned} d\psi_{sx}/d\alpha &= g(\omega_0 \psi_{sy} - R_s i_{sx} + u_{sx})/\omega; \\ d\psi_{sy}/d\alpha &= g(-\omega_0 \psi_{sx} - R_s i_{sy} + u_{sy})/\omega; \\ d\psi_{lx}/d\alpha &= g(\omega_0 \psi_{ly} - R_l i_{lx})/\omega - g\psi_{ly}; \\ d\psi_{ly}/d\alpha &= g(-\omega_0 \psi_{lx} - R_l i_{ly})/\omega + g\psi_{lx}; \\ &\dots\dots\dots (6) \\ d\psi_{nx}/d\alpha &= g(\omega_0 \psi_{ny} - R_n i_{nx})/\omega - g\psi_{ny}; \\ d\psi_{ny}/d\alpha &= g(-\omega_0 \psi_{nx} - R_n i_{ny})/\omega + g\psi_{nx}; \end{aligned}$$

$$\frac{d\omega}{d\alpha} = g \frac{3p_0^2}{2J} \left[(\psi_{sx} i_{sy} - \psi_{sy} i_{sx}) - M_p(\alpha) \right] / \omega - \frac{\omega}{2J} \frac{dJ}{d\alpha},$$

де $g = p_0 k_t$.

Утворивши вектори $\vec{y} = (\vec{\psi}, \omega)^T$; $\vec{x} = (\vec{i}, \omega)^T$, запишемо систему (6) у векторній формі

$$d\vec{y}/d\alpha = \vec{z}(\vec{y}, \vec{x}, \vec{u}). \quad (7)$$

Повороту кривошипа на кут $\alpha = 2\pi$ відповідає періодична залежність $M(\alpha) = M(\alpha + 2\pi)$ моменту навантаження, а, значить, і координат режиму. В такому разі розв'язком системи (7) є $T = 2\pi$ -періодична залежність координат від кута повороту кривошипа. Для його отримання методом розв'язування крайової задачі систему ДР (7) алгебрисуємо шляхом апроксимації змінних стану на сітці $N+1$ вузлів періоду кубічними сплайнами вигляду

$$\vec{y}(\alpha) = \vec{a}_j + \vec{b}_j(\alpha_j - \alpha) + \vec{c}_j(\alpha_j - \alpha)^2 + \vec{d}_j(\alpha_j - \alpha)^3, \quad (8)$$

де $j = (\overline{1, N})$ — номер ділянки періоду; $\vec{a}_j, \vec{b}_j, \vec{c}_j, \vec{d}_j$ — вектори коефіцієнтів сплайнів; α_j — значення кутвої координати $\vec{y} = (\vec{\psi}, \omega)^T$ в j -му вузлі.

Враховуючи умови неперервності сплайна (8), його першої та другої похідних та здійснивши перехід від континуальної зміни координат до їх вузлових значень, отримуємо алгебричний аналог системи (7) у вигляді [5]

$$H_C \vec{Y}_C + \vec{Z}_C = 0, \quad (9)$$

де H_C — блочно-діагональна матриця, яка складається з N однакових блоків, елементи яких визначаються лише віддалами між вузлами періоду; \vec{Y}_C, \vec{Z}_C — вектори, які складаються в свою чергу з N векторів \vec{y}_j, \vec{z}_j ($j = \overline{1, N}$). Система (9) має порядок $N \times m$, а невідомими в ній є значення вектора \vec{x} в N вузлах періоду. Внаслідок нелінійної залежності потокозчеплень контурів від струмів, а також наявності в рівнянні руху ротора добутку координат режиму система (9) — нелінійна. Її розв'язування може бути здійснене одним із ітераційних методів, наприклад, методом Ньютона. Для забезпечення збіжності ітераційного процесу використовується метод продовження по параметру, суть якого полягає в дискретному нарощуванні вимушуючих сил (вузлових значень прикладених напруг та моменту навантаження) від нуля до заданих значень, з уточненням на кожному кроці методом Ньютона. Матриця Якобі системи (9) має вигляд

$$W = \left(H_C - \frac{\partial \vec{Z}_C}{\partial \vec{Y}_C} \right) \frac{\partial \vec{Y}_C}{\partial \vec{X}_C} - \frac{\partial \vec{Z}_C}{\partial \vec{X}_C}. \quad (10)$$

Оскільки значення вектора \vec{y}_j в j -му вузлі періоду визначається значенням вектора \vec{x}_j в цьому ж вузлі і не залежить від його значень в інших вузлах, то відповідні блоки матриці Якобі є блочно-діагональними

$$\frac{d\vec{Y}_C}{d\vec{X}_C} = \text{diag} \left(\left. \frac{d\vec{y}}{d\vec{x}} \right|_{j=1}, \dots, \left. \frac{d\vec{y}}{d\vec{x}} \right|_{j=N} \right);$$

$$\frac{d\vec{Z}_C}{d\vec{X}_C} = \text{diag} \left(\left. \frac{d\vec{z}}{d\vec{x}} \right|_{j=1}, \dots, \left. \frac{d\vec{z}}{d\vec{x}} \right|_{j=N} \right);$$

$$\frac{d\vec{Z}_C}{d\vec{Y}_C} = \text{diag} \left(\left. \frac{d\vec{z}}{d\vec{y}} \right|_{j=1}, \dots, \left. \frac{d\vec{z}}{d\vec{y}} \right|_{j=N} \right).$$

Розв'язком системи (9) є $\vec{X}_C = (\vec{x}_1^T, \dots, \vec{x}_N^T)^T$, який є сітковим відображенням періодичного процесу, що дає змогу побудувати континуальну сплайн-апроксимацію усіх координат.

Як приклад, на рис. 1 наведено розрахункові криві зображуючого вектора ($i = (i_{sx}^2 + i_{sy}^2)^{0,5}$) струму статора, електромагнітного моменту (у відносних одиницях) і швидкості обертання ротора двигуна 4AP160S4Y3, який приводить в рух верстат-гойдалку 7СК8-3,5-4000, під час пуску, а на рис. 2 — те ж саме в стаціонарному режимі.

Висновок. Особливістю електроприводу ШНВУ

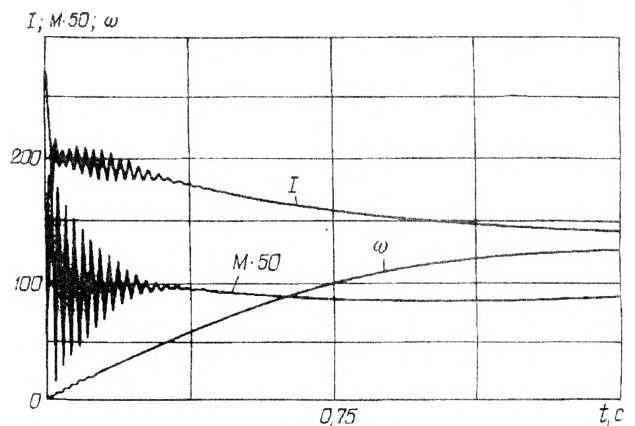


Рис. 1

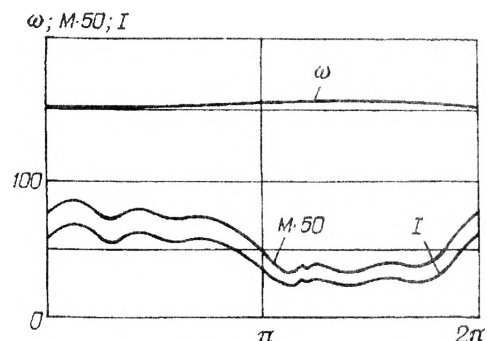


Рис. 2

є значна інерційність рухомих мас, що вимагає використання АД з підвищеним пусковим моментом, а також змінний момент інерції та циклічний закон зміни моменту навантаження, у зв'язку з чим процеси в електроприводах ШНВУ є динамічними як в пускових, так і в стаціонарних режимах роботи, тому перетворенням координат неможливо звести рівняння електричної рівноваги до алгебричних.

Стаціонарний режим роботи електроприводу ШНВУ в ортогональному базисі x, y характеризується періодичною зміною перетворених координат з періодом, який дорівнює періоду одного циклу роботи установки, що дає змогу отримати періодичні залежності координат методом розв'язування крайової задачі в позачасовій області. Такий метод значно скорочує обсяг обчислень і дає можливість здійснювати оптимізацію роботи ШНВУ та системи керування нею.

Запропоновані в статті методи розрахунку динаміки електроприводу ШНВУ мають в своїй основі математичну модель АД високого рівня адекватності, яка враховує явище насичення магнітопроводу та витіснення струму в стрижнях ротора. Розроблені математичні моделі та алгоритми дають змогу здійснювати розрахунок як пускових, так і усталених режимів електроприводу ШНВУ з високою точністю при мінімальній обсязі обчислень, що дає змогу аналізувати процеси в реальному часі.

1. *Бойко В.С.* Розробка та експлуатація нафтових родовищ. — К.: РеалПрінт, 2004. — 695 с.

2. *Величкович А.С.* Оболонковий амортизатор штангової свердловинної насосної установки // Пафтова і газова промисловість. — 2006. — № 2. — С. 30—32.

3. *Кравченко Ю.И.* Моделирование переходных процессов асинхронного двигателя с насыщенной магнитной системой и вытеснением тока в стержнях короткозамкнутого ротора. — К.: Изд. АН УССР, 1977. — 156 с.

4. *Копылов И.П., Фильц Р.В., Яворский Я.Я.* Об уравнениях асинхронной машины в различных системах координат // Изв. ВУЗов СССР. Электромеханика. — 1986. — № 3. — С. 22—33.

5. *Маляр В.С., Маляр А.В.* Математическое моделирование периодических режимов электротехнических устройств // Электронное моделирование. — 2005. — Т. 27. — № 3. — С. 39—53.

6. *Михайлов В.В., Жуков Ю.С., Суд И.И.* Энергетика нефтяной и газовой промышленности. — М.: Недра, 1982. — 350 с.

7. *Справочник по проектированию автоматизированного электропривода и систем управления технологическими процессами* / Под ред. В.И.Круповича, Ю.Г.Барыбина, М.И.Самовера. — М.: Энергоиздат, 1982. — 416 с.

8. *Фильц Р.В.* Математические основы теории электромеханических преобразователей. — К.: Наукдумка, 1979. — 208 с.

9. *Stakhiv P., Malyar A.* Influence of saturation and skin effect on current harmonic spectrum of asynchronous motor powered by thyristor voltage regulator // Proceedings of the IVth International Workshop Computational Problems of Electrical Engineering. — Gdynia, Poland, June 1-3. — 2005. — P. 58—60.

Надійшла 15.11.2006

УДК 621.313.323.65.002.5-868

Г.М.Голенков, канд.техн.наук, Р.П.Бондар, С.А.Макогон (Київський нац. ун-т будівництва і архітектури), Богаєнко М.В., Попков В.С. (НВП "Промелектрообладнання", м.Київ)

Моделювання роботи електричного вібратора з коаксіально-лінійним індукційним двигуном при різних законах регулювання

Розроблено методика розрахунку, що дозволяє проводити комп'ютерне моделювання і дослідження електромеханічних характеристик і резонансних властивостей вібратора з постійними магнітами при різних законах регулювання. Розрахунок потোকосцеплення виконується на основі розв'язку задачі електромагнітного поля в активній зоні вібратора. Показано, що найбільш ефективно робота вібратора реалізується у вузькому діапазоні частот живлення — 15...20 Гц.

Разработана методика расчета, которая дает возможность производить компьютерное моделирование и исследование электромеханических характеристик и резонансных свойств вибратора с постоянными магнитами при различных законах регулирования. Расчет потোকосцепления выполняется на основании решения задачи электромагнитного поля в активной зоне вибратора. Показано, что наиболее эффективно работа вибратора реализуется в узком диапазоне частот питания — 15...20 Гц.

Вступ. Відомі традиційні конструкції вібраторів з одним чи декількома дебалансними валами та приводом від двигуна обертання мають ряд суттєвих недоліків, а саме: недовговічність дебаланс-

© Голенков Г.М., Бондар Р.П., Макогон С.А., Богаєнко М.В., Попков В.С., 2007