

УДК 62–83–52: 622.276.53

А.В. Маляр, д-р техн. наук, проф.,  
А.С. АндрейшинНаціональний університет „Львівська політехніка“,  
м.Львів, Україна, e-mail: svmaryar@polynet.lviv.ua

## РОЗРАХУНОК ЗБАЛАНСОВАНОГО РЕЖИМУ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ШТАНГОВОЇ НАФТОВИДОБУВНОЇ УСТАНОВКИ МАЛОДЕБІТНОЇ СВЕРДЛОВИНИ

A.V. Malyar, Dr. Sci. (Tech.), Professor,  
A.S. AndreishynLviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine, e-mail:  
svmaryar@polynet.lviv.ua

## CALCULATION OF THE BALANCED MODE OF THE ELECTRIC DRIVE OF A SUCKER ROD OIL PUMP FOR A MARGINAL WELL

**Мета.** Викладення методу розрахунку швидкості гойдання балансира верстата-гойдалки штангової нафтовидобувної установки малодебітної свердловини, що забезпечує безперебійну роботу з максимальним наповненням помпи.

**Методика.** В основу алгоритму розрахунку покладені високої адекватності математичні моделі верстата-гойдалки й приводного двигуна та метод розрахунку періодичних залежностей координат стаціонарного режиму роботи електроприводу установки на основі розв'язування крайової задачі для системи диференціальних рівнянь, що описують динаміку системи електроприводу.

**Результати.** Розроблена математична модель для розрахунку координат режиму роботи електроприводу штангової глибиннопомпової установки в залежності від зміни дебіту пласта дає змогу визначити частоту гойдань балансира, що відповідає неперервній роботі установки з максимально можливим заповненням помпи протягом усього міжремонтного періоду.

**Наукова новизна.** Полягає в адекватному описі електроприводу нафтовидобувної установки на основі повної системи диференціальних рівнянь, що описують динаміку електроприводу, і розрахунку періодичних залежностей координат у позачасовій області, що забезпечує високу швидкодію алгоритму керування.

**Практична значимість.** Створена на основі розробленого алгоритму програма забезпечує аналіз роботи ШГПУ в реальному часі протікання процесів, що дає змогу прогнозувати роботу установок й формувати керуючі впливи на підставі отриманої у процесі роботи установки інформації з метою забезпечення збалансованості між відбором нафти та надходженням рідини у свердловину, що виключає режим періодичної експлуатації.

**Ключові слова:** нафтовидобувна установка, асинхронний електропривод, малодебітна свердловина, частота гойдань

**Вступ.** Глибинними штанговими помпами, що приводяться в рух за допомогою верстатів-гойдалок, видобувається переважна кількість нафти на нафтових родовищах як в Україні, так і в усьому світі [1–3]. Привідним двигуном верстата-гойдалки, здебільшого, є трифазний асинхронний двигун (АД) з короткозамкненим ротором, що за допомогою клинопасової передачі, редуктора та кривошипно-шатунного механізму зумовлює коливальний рух балансира, унаслідок чого з'єднана з ним колона штанг разом з плунжером глибинної помпи здійснює зворотно-поступальний рух. Отже, кількість гойдань балансира за хвилину дорівнює частоті обертання кривошипного вала. Редуктор штангової глибиннопомпової установки (ШГПУ) і клинопасова передача забезпечують швидкість обертання кривошипа в межах  $n_{кр} = 2,5–18$  об/хв. Якщо ротор двигуна обертається з кутовою швидкістю  $\omega = 2\pi f / p_0$ , де  $f$  – частота напруги живлення, а  $p_0$  – кількість пар полюсів, то кутова швидкість обертання криво-

шипа  $\omega_{кр} = \omega / k_i$ , де  $k_i$  – передавальне число від двигуна до кривошипа.

**Суть проблеми.** Важливим завданням у технології видобування нафти штанговими глибинними помпами є покращення техніко-економічних показників електроприводів ШГПУ. Від раціонального вибору електроприводу установки та системи керування нею залежить ефективність експлуатації установки в цілому, а отже й енерговитрати на тонну видобутої нафти. У вартості видобутої нафти витрати експлуатаційні та на електроенергію можуть сягати 50% [4]. Вибір глибиннопомпового обладнання та режиму його роботи повинні відповідати продуктивності пласта свердловини, що з плином часу зменшується у відповідності до формули [4]

$$q_c(t) = q_0 \left( 1 - \left( \frac{t}{T_0} \right)^m \right), \quad (1)$$

де  $q_0$  – початковий дебіт нафти на час введення в експлуатацію свердловини або після ремонту;  $T_0$  – визна-

чений умовами експлуатації ШГПУ інтервал часу, через який установку зупиняють для ремонту або заміни помпи. Значення  $t$  знаходиться в межах  $t = 1,45\text{--}3,3$ . (Для більшості свердловин –  $t = 2,0$  [4]).

Миттєве значення продуктивності плунжерної помпи верстата-гойдалки, виражене в  $\text{м}^3/\text{с}$  видобутої рідини, можна визначити за формулою

$$q(t) = \frac{\lambda \pi D^2 S_0}{4 p_0 k_i} \omega, \quad (2)$$

де  $D$  – діаметр плунжера помпи;  $S_0$  – довжина шляху переміщення плунжера, визначена з урахуванням видовження колони штанг і труб;  $\lambda$  – коефіцієнт подачі помпи, що визначається як відношення реального до теоретично можливого об'єму рідини, який дещо менший від останнього в результаті витікання її з циліндра помпи ( $0,6 \leq \lambda \leq 0,8$  [4]).

Оскільки обладнання свердловини вибирається, виходячи з умов роботи на час введення її в експлуатацію, то із плином часу його потужність перевищує необхідну в кілька разів. На практиці заповнення циліндра помпи через деякий час після запуску установки знижується до 40–60% [3]. Робота установки зі значним незаповненням циліндра помпи рідиною внаслідок недостатнього дебіту свердловини або невідповідності частоти гойдань балансира притокові рідини до свердловини призводить не тільки до збільшення споживання реактивної потужності, але й супроводжується іншими негативними явищами, тому важливим питанням є оптимізація роботи малодебітних свердловин, кількість яких постійно зростає [1–4, 7].

Здебільшого, малодебітні свердловини переводять до режиму періодичної експлуатації, однак на практиці економія електроенергії при цьому не забезпечує економічної роботи установки в цілому. Часті пуски та зупинки призводять до підвищеного зношування обладнання, і, крім того, породжують низку проблем. Зокрема, упродовж проміжку часу, відведеного для наповнення свердловини, разом з рідиною в ній накопичується пісок, а піщані пробки зумовлюють значне підвищення моменту навантаження під час чергового пуску установки. Для вирішення цієї проблеми доводиться встановлювати АД завищеної потужності, що не тільки не економічно, але й може призвести до обриву штанг. Тому важливо забезпечити зміну режиму роботи верстата-гойдалки так, щоб він відповідав темпові наповнення свердловини нафтою. Оптимальним є режим роботи системи свердловина-помпа, за якого встановлена рівновага між кількістю видобутої рідини та надходженням її до свердловини з пласта, а коефіцієнт заповнення помпи лежить у межах  $k_s = 0,8\text{--}0,9$ . Цього можна досягнути, регулюючи кількість ходів верстата-гойдалки так, щоб зберегти встановлене значення коефіцієнта заповнення.

Дана робота спрямована на вирішення проблеми модернізації систем електроприводів ШГПУ малодебітних свердловин шляхом забезпечення ефективної

безперебійної роботи з максимальним наповненням помпи.

**Розв'язання задачі.** Електропривод ШГПУ працює в режимі циклічно-змінного навантаження, тому процеси в електромеханічній системі установки є динамічними не тільки в пускових режимах, але й в усталених. Зв'язок між законами руху ротора АД і плунжера глибинної помпи однозначно визначаються механічною трансмісією та чотириланковим механізмом верстата-гойдалки. За один оберт кривошипа відбувається повний цикл переміщення (вверх і вниз) плунжера глибинної помпи та зміни моменту навантаження, що діє на вал двигуна, тобто період зміни моменту навантаження дорівнює періодові обертання кривошипа. Для отримання максимального можливого видобутку нафти з мінімальними затратами необхідно, щоб швидкість обертання ротора АД, якою визначається частота гойдань балансира, змінювалась у відповідності до зміни дебіту пласта.

Основою для визначення необхідної для збалансованого за дебітом нафти швидкості обертання кривошипа служить динамограма як залежність зусилля, що діє в точці підвішування штанг, від переміщення  $P_0 = P_0(S)$ . Ця залежність є вхідною інформацією для роботи підпрограми, що описує роботу верстата-гойдалки та трансформує її в періодичну кутову залежність моменту навантаження двигуна від кута повороту кривошипа  $M_c(\alpha) = M_c(\alpha + 2\pi)$ . Очевидно, що кожному значенню продуктивності пласта відповідає своя динамограма, а значить і періодична залежність моменту на валу АД, якій відповідають періодичні залежності всіх координат, у тому числі й швидкості обертання кривошипного вала. На характер зміни цієї швидкості впливає як форма динамограми, так і ступінь зрівноваження верстата-гойдалки. Крім того, він залежить від динамічних властивостей привідного двигуна, отже отримати всю сукупність координат режиму роботи можна лише на підставі повної системи рівнянь, що описують як механічну частину ШГПУ, так і систему електроприводу.

Внаслідок циклічно-змінного моменту навантаження стаціонарні процеси в електроприводі характеризуються періодичною зміною як механічних, так і електричних координат. Ці залежності можна визначити лише на основі розв'язування диференціальних рівнянь (ДР) електромеханічної рівноваги всієї системи електроприводу, які в осях  $x$ ,  $y$ , враховуючи змінний момент інерції  $J$  установки, мають вигляд [5]

$$\frac{d\psi_{sx}}{d\alpha} = \frac{p_0 k_i (\omega_0 \psi_{sy} - R_s i_{sx} + u_{sx})}{\omega};$$

$$\frac{d\psi_{sy}}{d\alpha} = \frac{p_0 k_i (-\omega_0 \psi_{sx} - R_s i_{sy} + u_{sy})}{\omega};$$

$$\frac{d\psi_{rx}}{d\alpha} = \frac{p_0 k_i (\omega_0 \psi_{ry} - R_r i_{rx})}{\omega} - p_0 k_i \psi_{ry};$$

$$\frac{d\psi_{ry}}{d\alpha} = \frac{p_0 k_i (-\omega_0 \psi_{rx} - R_r i_{ry})}{\omega} + p_0 k_i \psi_{rx}; \quad (3)$$

$$\frac{d\omega}{d\alpha} = \frac{p_0^2 k_i}{J\omega} \left( \frac{3}{2} p_0 (\psi_{sx} i_{sy} - \psi_{sy} i_{sx}) - M_c(\alpha) \right) - \frac{\omega}{2J} \frac{dJ}{d\alpha},$$

де  $\psi_{sx}, \psi_{sy}, \psi_{rx}, \psi_{ry}, i_{sx}, i_{sy}, i_{rx}, i_{ry}$  – потокозчеплення та струми контурів статора (індекс  $s$ ) і ротора (індекс  $r$ );  $u_{sx}, u_{sy}$  – прикладені до контурів статора напруги;  $\omega_0$  – кутова частота напруги живлення АД;  $r_s, r_r$  – активний опір обмотки статора та приведений до трифазної обмотки статора еквівалентний опір обмотки ротора. Приведений до валу двигуна момент інерції рухомих частин установок залежить від кута  $\alpha$  повороту кривошипа  $J(\alpha) = J(\alpha + 2\pi)$  і визначається як сума приведених моментів інерції усіх елементів. Для його визначення необхідно знати миттєві значення кутових швидкостей елементів, що мають обертальний рух, та швидкостей переміщення мас (стовп рідини, штанги, зрівноважувальні вантажі), які рухаються поступально. Зазначені швидкості взаємопов’язані та однозначно визначаються з математичної моделі верстата-гойдалки, в якій входною величиною є швидкість обертання ротора двигуна, яка, у свою чергу, визначається з рівнянь (3) електромеханічної рівноваги системи електроприводу. Похідна від моменту інерції визначається чисельним диференціюванням.

Зазначимо, що результатом розрахунку стаціонарного динамічного режиму, який описується системою ДР (3), є не сукупність значень координат, а їх функціональні залежності впродовж періоду (рис.1), а задача отримання цих залежностей набагато складніша від розрахунку статичного режиму. На основі цих залежностей можна синтезувати необхідні для забезпечення оптимальної роботи закони керування системою електроприводу ШГПУ, зокрема й швидкості обертання кривошипа.

Стаціонарний періодичний режим можна розрахувати методом усталення, в якому результат отримують шляхом розв’язування задачі Коші в часовій області за деяких початкових умов, що полягає в безпосередньому інтегруванні системи ДР (3) до досягнення періодичної зміни координат. Однак часовий період обертання валу кривошипа в кількості разів перевищує період зміни напруги живлення, а внаслідок значної інерційності установки перехідний процес триває надто довго. Крім того, метод усталення практично непридатний для вирішення оптимізаційних задач.

Найбільш ефективним способом знаходження періодичних залежностей координат є розв’язування крайової задачі, що дає змогу отримати розв’язок з мінімальним обсягом обчислень у позачасовій області, тобто не вдаючись до розрахунку перехідного процесу. Відомі методи розв’язування крайових задач відрізняються способом алгебризації ДР та крайовими умовами. У розробленому алгоритмі періодичні залежності координат стаціонарного режиму

визначаються шляхом розв’язування нелінійної двочислової крайової задачі для системи ДР першого порядку з періодичними крайовими умовами, розробленим на основі апроксимації координат режиму сплайнами третього порядку [6]. Здійснивши апроксимацію координат на сітці  $n$  вузлів періоду з кроком  $h = 2\pi/n$ , отримуємо алгебричний аналог системи ДР (3)  $k$ -го порядку у вигляді нелінійної системи алгебричних рівнянь  $kn$ -го порядку, яку у векторній формі можна записати у вигляді

$$H\vec{Y}(\vec{X}) = \vec{Z}(\vec{Y}, \vec{X}), \quad (4)$$

де  $H$  – матриця переходу від неперервних координат до їх вузлових значень, елементи якої визначаються лише сіткою вузлів [7];  $\vec{Y} = (y_1, \dots, y_n)^*$ ;  $\vec{Z} = (z_1, \dots, z_n)^*$ ;  $\vec{X} = (x_1, \dots, x_n)^*$  – вектори-стовпці, утворені зі значень відповідних величин у вузлах сітки.

Рівняння (2) для  $j$ -го вузла періоду має вигляд

$$q_j = \frac{\lambda \pi D^2 S_0}{4 p_0 k_i} \omega_j, \quad (j=1, \dots, n). \quad (5)$$

Векторне рівняння (5) разом зі скалярним рівнянням (6), записаним для всіх  $n$  вузлів періоду, можна подати у вигляді нелінійної системи алгебричних рівнянь вигляду

$$\vec{F}(\vec{Y}, \vec{X}) = \vec{0}, \quad (6)$$

де вектори  $\vec{Y}, \vec{X}$  складаються з вузлових значень векторів

$$\vec{y}_j = (\psi_{sxj}, \psi_{syj}, \psi_{rxj}, \psi_{ryj}, \omega_j, q_j)^* ;$$

$$\vec{x}_j = (i_{sxj}, i_{syj}, i_{rxj}, i_{ryj}, \omega_j, q_j)^* .$$

Внаслідок нелінійної залежності потокозчеплень контурів від струмів, а також наявності в рівнянні руху ротора добуток координат режиму, система алгебричних рівнянь (6) – нелінійна, як і вихідна система ДР. Її розв’язком є значення вектора  $\vec{X}$ , компоненти якого визначають періодичні залежності координат. Розв’язування може бути здійснене ітераційним методом Ньютона. Для забезпечення збіжності ітераційного процесу використовується метод продовження по параметру, суть якого полягає в дискретному нарощуванні вимушуючих сил, якими, у нашому випадку, є вузлові значення прикладеної напруги та моменту навантаження від нуля до заданих значень. Однак, одночасно нарощувати напругу живлення та момент навантаження неможливо, оскільки ці величини зв’язані між собою нелінійно, а це, як правило, призводить до розбіжності ітераційного процесу. Тому задача розрахунку стаціонарного періодичного режиму для заданого значення величини  $q_c$  розв’язується у два етапи. Спочатку за рівняннями електричної рівноваги визначаємо значення координат при заданому сталому

значенні кутової швидкості  $\omega = \omega_0$  і прикладеної напруги. Очевидно, що такий режим роботи АД відповідатиме неробочому режимові, тобто відсутності навантаження, а система рівнянь електричної рівноваги є нелінійною алгебричною.

Отримані значення компонент вектора  $\vec{X}$  є початковими умовами для другого етапу, що здійснюється диференціальним методом [8] і дає змогу дослідити поведінку системи електроприводу при зміні продуктивності пласта. Для цього систему алгебричних рівнянь (9) диференціюємо по  $q_c$ . У результаті отримуємо

$$H \frac{d\vec{Y}}{d\vec{X}} - \frac{\partial \vec{Z}}{\partial \vec{Y}} \frac{d\vec{Y}}{d\vec{X}} - \frac{\partial \vec{Z}}{\partial \vec{X}} \frac{d\vec{X}}{dq_c} = \frac{\partial \vec{Z}}{\partial q_c}, \quad (7)$$

де

$$\begin{aligned} \frac{d\vec{Y}}{d\vec{X}} &= \text{diag} \left( \left. \frac{d\vec{y}}{d\vec{x}} \right|_{j=1}, \dots, \left. \frac{d\vec{y}}{d\vec{x}} \right|_{j=n} \right); \\ \frac{d\vec{Z}}{d\vec{X}} &= \text{diag} \left( \left. \frac{d\vec{z}}{d\vec{x}} \right|_{j=1}, \dots, \left. \frac{d\vec{z}}{d\vec{x}} \right|_{j=n} \right); \\ \frac{d\vec{Z}}{d\vec{Y}} &= \text{diag} \left( \left. \frac{d\vec{z}}{d\vec{y}} \right|_{j=1}, \dots, \left. \frac{d\vec{z}}{d\vec{y}} \right|_{j=n} \right), \end{aligned}$$

а відповідні блочні елементи матриці Якобі мають наступний зміст

$$\frac{d\vec{y}}{d\vec{x}} = \begin{matrix} \begin{matrix} L_{sxx} & L_{sxsy} & L_{sxrx} & L_{sxry} & 0 & 0 \\ L_{sysx} & L_{sysy} & L_{sysr} & L_{sysr} & 0 & 0 \\ L_{rxsx} & L_{rxsy} & L_{rxsx} & L_{rxry} & 0 & 0 \\ L_{ryyx} & L_{ryys} & L_{ryrx} & L_{ryry} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{matrix} \end{matrix};$$

$$\frac{\partial \vec{z}}{\partial \vec{y}} = \begin{matrix} \begin{matrix} c_1 & & & & & & -\frac{g(\omega_0 \Psi_{sy} - R_s i_{sx} + u_{sx})}{\omega^2} \\ & & & & & & -\frac{g(-\omega_0 \Psi_{sx} - R_s i_{sy} + u_{sy})}{\omega^2} \\ & & & & & & -\frac{g(\omega_0 \Psi_{ry} - R_r i_{rx})}{\omega^2} \\ & & & & & & -\frac{g(-\omega_0 \Psi_{rx} - R_r i_{ry})}{\omega^2} \\ & & & & & & -\frac{p_0^2 k_i}{J \omega} (M_e - M_c) - \frac{1}{2J} \frac{dJ}{d\alpha} \\ & & & & & & \frac{\pi D^2 \alpha S_0}{4 p_0 k_i} \end{matrix} \\ & & & & & & 1 \end{matrix};$$

$$\frac{\partial \vec{z}}{\partial \vec{x}} = \begin{matrix} \begin{matrix} (\omega_0 L_{sysx} - R_s) \frac{g}{\omega} & \omega_0 L_{sysy} \frac{g}{\omega} & \omega_0 L_{sysr} \frac{g}{\omega} & \omega_0 L_{syry} \frac{g}{\omega} & -\frac{g(\omega_0 \Psi_{sy} - R_s i_{sx} + u_{sx})}{\omega^2} \\ -\omega_0 L_{sxx} \frac{g}{\omega} & (-\omega_0 L_{sxsy} - R_s) \frac{g}{\omega} & -\omega_0 L_{sxx} \frac{g}{\omega} & -\omega_0 L_{sxry} \frac{g}{\omega} & -\frac{g(-\omega_0 \Psi_{sx} - R_s i_{sy} + u_{sy})}{\omega^2} \\ L_{ryyx} c_2 & L_{ryys} c_2 & L_{ryrx} c_2 - \frac{R_r g}{\omega} & L_{syry} c_2 & -\frac{g(\omega_0 \Psi_{ry} - R_r i_{rx})}{\omega^2} \\ -L_{rxsx} c_2 & -L_{ryys} c_2 & -L_{ryrx} c_2 & -L_{syry} c_2 - \frac{R_r g}{\omega} & -\frac{g(-\omega_0 \Psi_{rx} - R_r i_{ry})}{\omega^2} \\ c_3 (L_{sxx} i_{sy} - L_{sysx} i_{sx} - \Psi_{sy}) & c_3 (L_{sxsy} i_{sy} - L_{sysy} i_{sx} + \Psi_{sx}) & c_3 (L_{sxrx} i_{sy} - L_{sysx} i_{sx}) & c_3 (L_{sxry} i_{sy} - L_{sysy} i_{sx}) & -\frac{p_0^2 k_i}{J \omega} (M_e - M_c) - \frac{1}{2J} \frac{dJ}{d\alpha} \\ & & & & \frac{\pi D^2 \alpha S_0}{4 p_0 k_i} \end{matrix} \\ & & & & 1 \end{matrix};$$

де  $g = p_0 k_i$ ;  $c_1 = \frac{g \omega_0}{\omega}$ ;  $c_1 = g \left( \frac{\omega_0}{\omega} - 1 \right)$ ;  $c_2 = g \frac{3p_0^2}{2J}$ .

Інтегруючи систему ДР (7) одним із числових методів по  $q_c$ , отримуємо багатовимірну характеристику у вигляді сукупності періодичних залежностей вузлових координат (компонент вектора  $\vec{X}$ ) стаціонарного режиму від продуктивності пласта, використовуючи які отримуємо періодичні залежності поточозчеплень, електромагнітного моменту тощо. На кожному крокові інтегрування чи ітераційного уточнення поточозчеплення, диференціальні індуктивності контурів АД визначаються з урахуванням насичення, для чого використовуються криві намагнічування основного магнітного шляху та шляхів потоків розсіювання контурів статора й ротора.

Для прикладу, нижче наведені періодичні залежності значення моменту навантаження (рисунок, а) та електромагнітного моменту (рисунок, б) привідного двигуна 4AP160S4Y3 ( $P_n = 15\text{кВт}$ ,  $U_n = 380/220\text{В}$ ), що відповідають різним значенням продуктивності пласта ( $q=0,018; 0,014; 0,012; 0,010 \text{ м}^3/\text{с}$ ) і, відповідно, різним середнім значенням швидкості обертання кривошипного валу ( $n_{кр}=18,5; 16,5; 13,5; 12,0 \text{ об/хв}$ ) верстата-гойдалки 7СК8-3,5-4000, при яких забезпечується неперервна робота ШГПУ з максимальним заповненням помпи. Аналогічні періодичні залежності має кутова швидкість обертання ротора, середнє значення якої використовується для керування електроприводом установки.

**Висновки.** Запропонована математична модель дає змогу визначати частоту гойдань балансира верстата-гойдалки в залежності від зміни дебіту пласта,

що відповідає неперервній роботі установки з максимально можливим заповненням помпи протягом усього міжремонтного періоду.

Створена на основі розробленого алгоритму програма забезпечує оперативний аналіз режимів роботи ШГПУ не тільки в реальному часі протікання процесів, але й з її випередженням, що дає змогу прогнозувати роботу установки та формувати керуючі впливи на підставі отриманої у процесі роботи установки інформації.

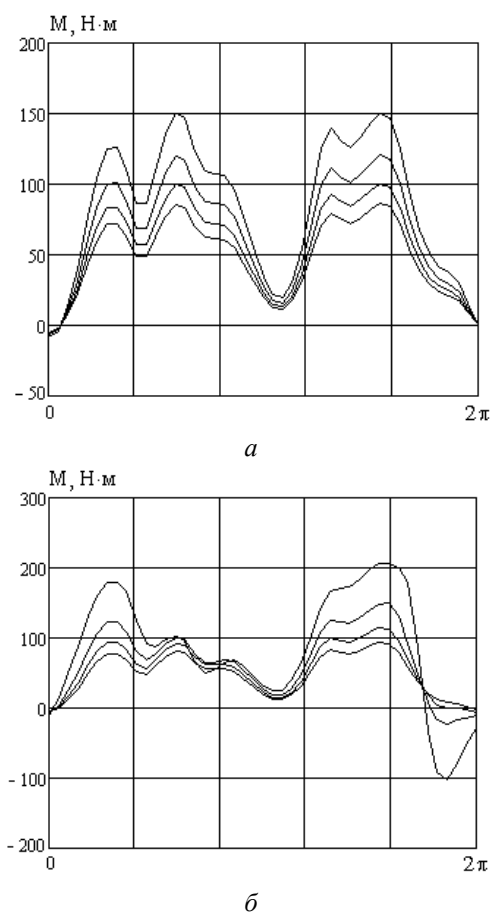


Рис. Періодичні залежності привідного двигуна 4AP160S4V3: а – значення моменту навантаження; б – значення електромагнітного моменту

**Список літератури / References**

1. Альтшулер М.И Работы ОАО „ВНИИР“ в области электроприводов для нефтедобычи: труды АЭН Чуваш. респ. / М.И. Альтшулер – 2000. – № 2. – С. 25–27.  
 Altshuter, M.I. (2000), “Work of ОАО “VNIIR” in the field of electric drive for oil production”, *Proc. AEN Chuvash Republic*, no. 2, pp. 25–27.  
 2. Акульшин О.О. Про встановлення режимів експлуатації свердловин установками штангових глибоких насосів за умови  $P_{\text{виг}} < P_{\text{нас}}$  / О.О.Акульшин // Нафтова і газова промисловість. – 2004. – № 5. – С. 20–31.

Akulshyn, O.O. (2004), “About establish modes of operation well rod deep pumping unit provided  $P_v < P_n$ ”, *Naftova i Gazova Promyslovist*, no.5, pp. 20–31.

3. Барский В.А. Опыт применения автоматизированного регулируемого электропривода штанговой глубинно-насосной установки РЭН2Н в полевых условиях / В.А. Барский, Д.С. Курдюмов, А.А. Колесник // Вестн. НТУ ХПИ “Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика”. – 2002. – Вып 12. – Т.1. – С. 206–209.

Barsky, V.A., Kurdyumov, D.S., Kolesnyk, A.A. (2002), “Application experience automated electric drive in the control station of deep-well rod pumping unit REN2N in the field”, *Vestnik NTU KhPI “Problemy Avtomatizirovannoho Elektroprivoda. Teoriya i Praktika”*, no.12, vol.1, pp. 206–209.

4. Оптимізація тривалості часу роботи нафтових свердловин між повторними тепловими обробленнями / В.С. Бойко, С.П. Поліщук, А.І. Піта, В.С. Орлів // Розробка та експлуатація нафтових і газових родовищ. – 2005. – № 3(12). – С. 67–77.

Boyko, V.S., Polishchuk, S.P., Pita, A.I. and Orliv, V.S. (2005), “Optimization operation time of oil wells between repeated heat treatment”, *Rozrobka i Eksploatatsiya Naftovykh i Gazovykh Rodovyshch*, no.3(12), pp. 67–77.

5. Маляр А.В. Динаміка електропривода штангової нафтовидобувної установки / А.В. Маляр // Технічна електродинаміка. – 2007. – № 2. – С. 50–54.

Malyar, A.V. “Dynamics of the electric drive of the deep-well oil pumping unit”, *Tekhnichna Elektrodynamika*, (2007), no.2, pp. 50–54.

6. Маляр В.С. Основные положения сплайн-метода расчета периодических режимов работы электрических цепей / В.С. Маляр // Электроника и связь. – 1998. – Вып. 5. – С. 11–14.

Malyar, V.S. “Main theses of spline-method of calculating periodic working modes of electric circuits”, *Elektronika i Svyaz*, (1998), no.5, pp. 11–14.

7. Тагирова Л.Ф. Автоматизация управления технологическим процессом добычи нефти из малодебитных скважин на основе динамических моделей: автореф. дис. на соискан. научн. степени докт. техн. наук: спец. 05.13.06 / Тагирова Л.Ф. – Уфа, 2008. – 35 с.

Tagirova, L.F. (2008), “Automation of control process of oil production from marginal wells based on dynamic models”, Abstract of Dr. Sci. (Tech.) dissertation, spec. 05.13.06, Ufa, Russia.

8. Маляр В.С. Математическое моделирование периодических режимов работы электротехнических устройств / В.С. Маляр, А.В. Маляр // Электронное моделирование. – 2005. – Т. 27. – № 3. – С. 39–53.

Malyar, V.S. and Malyar, A.V. “Mathematic modeling of periodic regimes in electrical engineering devices”, *Elektronnoe Modelirovanie*, Vol.27, (2005), no. 3, pp. 39–53.

**Цель.** Изложение метода расчета скорости качания балансира станка-качалки штанговой нефтяной скважины

рая обеспечивает бесперебойную работу с максимальным наполнением насоса.

**Методика.** В основу алгоритма расчета положены высокой адекватности математические модели станка-качалки, приводного двигателя и метод расчета периодических зависимостей координат стационарного режима работы электропривода установки на основе решения краевой задачи для системы дифференциальных уравнений, описывающих динамику системы электропривода.

**Результаты.** Разработанная математическая модель для расчета координат режима работы электропривода штанговой глубинно-насосной установки в зависимости от изменения дебита пласта позволяет определять частоту качаний балансира, соответствующую непрерывной работе установки с максимально возможным заполнением насоса в течение всего межремонтного периода.

**Научная новизна.** Заключается в адекватном описании электропривода нефтедобывающей установки на основе полной системы дифференциальных уравнений, описывающих динамику электропривода, и расчете периодических зависимостей координат во вневременной области, что обеспечивает высокое быстродействие алгоритма управления.

**Практическая значимость.** Созданная на основе разработанного алгоритма программа обеспечивает анализ работы нефтедобывающей установки в реальном времени протекания процессов, позволяет прогнозировать работу установки и формировать управляющие воздействия на основании полученной в процессе работы установки информации с целью обеспечения сбалансированности между отбором нефти и поступлением жидкости в скважину, что исключает режим периодической эксплуатации.

**Ключевые слова:** *нефтедобывающая установка, асинхронный электропривод, малodeбитная скважина, частота качаний*

**Objectives.** Description of the method of calculating swing frequency of the balance beam of the sucker rod

pump of the rod oil-pumping unit for a marginal well which ensures continuous operation with maximum filling of the pump.

**Methodology.** The calculation algorithm relies on high-adequacy mathematical models of the sucker-rod pump and pumping power, and on the method of calculating periodic dependences of stationary mode coordinates for the electric drive of the unit on the basis of solving a boundary problem for a system of differential equations describing electric drive system dynamics.

**Findings.** The developed mathematical model for calculating the operational mode coordinates of the sucker rod pump as a function of the flow rate change allows determining the swing frequency of the balance beam corresponding to the continuous operation of the pump unit with the probable maximum filling of the pump during the whole maintenance-free period.

**Originality.** We gave adequate description of the electric drive of the oil pumping unit based on the closed system of differential equations describing dynamics of the electric drive and calculation of periodic dependencies of coordinates versus angle of rotation, which ensures high-speed operation of the control algorithm.

**Practical value.** The software program developed on the basis of the devised algorithm enables real-time analysis of the sucker rod pump operation, which makes it possible to forecast the pump work and form controlling impacts relying on the information obtained in the course of the unit operation with a view to ensuring balance between oil withdrawal and inflow into the well, which renders periodic operation unnecessary.

**Keywords:** *oil pumping unit, asynchronous electric drive, marginal well, swing frequency*

*Рекомендовано до публікації докт. техн. наук О.Ю. Лозинським. Дата надходження рукопису 05.09.13.*