

РОЗРОБЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ДОПУСТИМИХ ПАРАМЕТРІВ РОБОЧИХ РЕЖИМІВ ЧАСТОТНО-КЕРОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ШТАНГОВОЇ НАФТОВИДОБУВНОЇ УСТАНОВКИ

А.В. Маляр*, докт.техн.наук, **А.С. Андрейшин**
Національний університет "Львівська політехніка",
вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна, e-mail: andrii.v.maliar@lpnu.ua

Розглядаються проблеми регулювання частоти гойдань балансира верстата-гойдалки малопродуктивних нафтовидобувних свердловин, в яких видобування нафти здійснюється за допомогою штангових глибинних помп, пов'язаних з їхнім переводом з періодичної експлуатації до неперервної. Розроблено математичну модель, яка дає можливість на основі комплексної моделі електроприводу, до якої входять математичні моделі верстата-гойдалки і приводного двигуна, вирішувати задачу регулювання частоти гойдань балансира у відповідності до зміни дебіту пласта. Від наповнення помпи рідиною залежить форма динамограми, а отже вона є основою для визначення закону зміни моменту навантаження. Запропоновано метод розрахунку статичних характеристик АД, який приводить в рух верстат-гойдалку, з урахуванням періодично-змінного моменту навантаження і моменту інерції рухомих частин. Розрахунок періодичних залежностей координат усталеного режиму електроприводу установки здійснюється шляхом розв'язування крайової задачі. Запропонована математична модель дає змогу визначати залежності струму, потужностей, електромагнітного моменту і інших важливих експлуатаційних параметрів від амплітуди і частоти напруги живлення АД з метою визначення гранично допустимих значень. Вона може бути використана для проектування та налагодження роботи частотно-регульованого електроприводу штангової глибинно-помпової установки, який забезпечує неперервну роботу малодебітної свердловини, узгоджену зі зміною дебіту пласта. Бібл. 11, рис. 5.

Ключові слова: нафтовидобувна установка, малодебітна свердловина, асинхронний електропривод, стаціонарний режим, крайова задача, статичні характеристики, регулювання частоти.

Вступ. Видобування нафти із свердловин здебільшого здійснюється за допомогою верстатів-гойдалок, які розміщені на поверхні землі і перетворюють обертальний рух кривошипного вала у зворотно-поступальний рух зв'язаної з плунжером помпи колони штанг. Для приводу верстатів-гойдалок переважно використовують трифазні асинхронні двигуни (АД) [1–5]. Ефективність експлуатації штангової глибинно-помпової нафтовидобувної установки (ШГПУ) в значній мірі залежить від раціонального вибору електроприводу та налагодження системи керування.

Значна частина нафтових свердловин вичерпала свій ресурс і працює в режимі періодичної експлуатації, для якої характерною є часті зупинки, необхідні для наповнення свердловини нафтою [1, 2]. Така технологія видобування нафти з малодебітних свердловин потребує значних енерговитрат [3, 11].

Вибір обладнання й режиму його роботи повинні відповідати продуктивності пласта свердловини, яка з плином часу зменшується [2, 3, 9], внаслідок чого заповнення циліндра плунжерної помпи знижується до 40-60% [3]. Невідповідність частоти гойдань балансира притоку рідини до свердловини призводить до роботи установки зі значним незаповненням циліндра помпи, що не тільки різко знижує ефективність за рахунок зменшення коефіцієнта корисної дії, але й зумовлює збільшення споживання реактивної потужності.

Інтенсивність відбору нафти із свердловини визначається з одного боку конструктивними чинниками (довжиною ходу полірованого штока, передавальним числом редуктора та пасової передачі), а з другого – кількістю гойдань за хвилину балансира верстата-гойдалки, яка визначається кутовою частотою обертання кривошипа. Проте частота гойдань балансира за незмінного передавального числа механічної передачі повністю визначається частотою обертання ротора АД, яку можна регулювати за допомогою частотного перетворювача без зупинки роботи ШГПУ, що відповідає сучасним вимогам щодо економічності системи електроприводу та ефективності роботи установки в цілому.

Використання частотно-керованого електроприводу передбачає наявність автоматичної системи керування. У більшості випадків такі системи працюють на основі наперед заданого алгоритму,

виходячи з умов, які існують на час введення свердловини в експлуатацію [2, 9]. Це може призвести не тільки до зниження техніко-економічних показників, але й до появи аварійних режимів. Особливо це стосується випадків, коли зміною частоти обертання приводного двигуна намагаються досягти максимального дебіту.

Тому актуальною задачею є оптимізація роботи малодебітних свердловин [1, 5], спрямована на встановлення відповідності між притоком рідини і темпом її відбору. Для цього необхідно регулювати режим роботи верстата-гойдалки так, щоб він відповідав темпові наповнення свердловини нафтою з врахуванням її особливостей. Для більшості малодебітних свердловин оптимальним є режим, за якого під час роботи коефіцієнт заповнення помпи становить не менше від $k_3=0,8$. Цього досягають шляхом регулювання частоти напруги живлення приводного АД. Причому, оскільки для забезпечення неперервної роботи електроприводу ШГПУ необхідний діапазон зміни частоти обертання ротора АД є порівняно невеликим, то для цього достатнім є скалярне регулювання частоти напруги живлення [4], яке простіше від векторного. Задача регулювання частоти обертання ротора приводного АД по суті зводиться до зменшення частоти напруги живлення у відповідності до коефіцієнта заповнення помпи, про який можна судити, виходячи з аналізу форми динамограми [5] – залежності $P_h^* = P_h^*(\alpha)$ – відносного значення сили, яка діє на балансір в точці підвішування штанг,

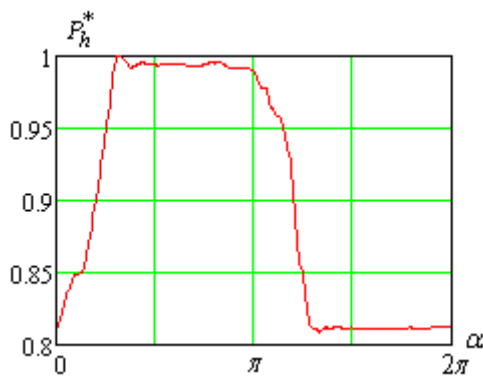


Рис. 1

від переміщення плунжера помпи або від кута (α) повороту кривошипного вала (рис. 1).

Однак для цього необхідно визначити обмеження, які накладаються на систему електроприводу. Сформулювати їх необхідно до вводу в експлуатацію установки за конкретних геологічних умов. Експериментально це здійснити неможливо через непомірні витрати. Найбільш доцільним і фактично єдино можливим є дослідження з використанням математичної моделі системи електроприводу ШГПУ, яка адекватно описує як механічну частину установки, так і електричний двигун і дає змогу виконати комплекс математичних експериментів з дослідження зміни моменту на валу АД, активної і реактивної потужностей, споживаного струму тощо. Зазначенні показники є основою для

автоматичного керування роботою ШГПУ і формування обмежень в регулюванні частоти за допомогою частотного перетворювача, які впливають з умов надійної роботи установки. Очевидно, що така модель має бути придатною для її використання в системах реального часу.

Метою роботи є розроблення математичної моделі, розрахунок допустимих параметрів робочих режимів електроприводу штангової нафтовидобувної установки та вирішення технічної задачі регулювання частоти гойдань балансира у відповідності до зміни дебіту свердловини.

Математична модель електроприводу ШГПУ. До математичної моделі електроприводу ШГПУ входять математичні моделі АД й верстата-гойдалки. Від їхньої адекватності залежить точність результатів розрахунку режимів роботи та характеристик електроприводу ШГПУ, а отже ефективність роботи системи керування. Оскільки розрахувати динамічний режим роботи АД з використанням класичних заступних схем неможливо, а польові математичні моделі потребують значних обчислювальних ресурсів, оптимальною є математична модель АД у вигляді диференціальних рівнянь (ДР), записаних з використанням теорії зображуючих векторів [10]. Математичну модель верстата-гойдалки, яка дає змогу однозначно визначити закони руху елементів верстата-гойдалки, зокрема, залежності їхніх лінійних та кутових переміщень від кута повороту кривошипа на підставі геометричних розмірів ланок перетворювального механізму, розроблено в [5]. В ній залежність кута повороту балансира від кута α повороту кривошипа, а отже і зв'язок між миттєвими значеннями частоти обертання ротора АД і частоти гойдань балансира визначаються на основі кінематичної схеми верстата-гойдалки.

Оскільки навантаження верстата-гойдалки є динамічним, то електромагнітні процеси в системі електроприводу ШГПУ як в перехідному режимі, так і в усталеному у будь-якій системі координат описуються системою ДР електричної і механічної рівноваги. Система ДР електричної рівноваги контурів статора АД в осях x, y , записана в функції часової координати в матрично-векторній формі має вигляд

$$\frac{d\bar{\Psi}_{sxy}}{dt} = \Omega_0 \bar{\Psi}_{sxy} - R_s \bar{i}_{sxy} + \bar{u}_{sxy}, \quad (1)$$

$$\frac{d\bar{\Psi}_{rxy}}{dt} = \Omega_0 \bar{\Psi}_{rxy} + \Omega \bar{\Psi}_{rxy} - R_r \bar{i}_{rxy}, \quad (2)$$

де $\bar{\Psi}_{sxy}$, $\bar{\Psi}_{rxy}$, \bar{i}_{sxy} , \bar{i}_{rxy} , \bar{u}_{sxy} , R_s , R_r – вектори потокозчеплень, струмів, напруг живлення контурів

статора (s) й ротора (r) та діагональні матриці активних опорів; $\Omega_0 = \begin{bmatrix} & -\omega_0 \\ \omega_0 & \end{bmatrix}$; $\Omega = \begin{bmatrix} & \omega \\ -\omega & \end{bmatrix}$ –

допоміжні матриці, в яких ω_0 – кутова частота напруги живлення, а ω – кутова частота обертання ротора.

Враховуючи змінний момент інерції рухомих частин системи електроприводу, рівняння механічної рівноваги має вигляд

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

де J – приведений до валу двигуна момент інерції рухомих частин; p_0 – кількість пар полюсів АД; $M_c(t)$ – часова залежність моменту навантаження на валу АД, а M_e – електромагнітний момент, який визначається на основі потокозчеплень та струмів за формулою

$$M_e = 1.5 p_0 (\psi_{sx} i_{sy} - \psi_{sy} i_{sx}).$$

Система ДР (1) – (3) дає змогу визначити миттєві значення векторів потокозчеплень та струмів контурів АД при заданому значенні вектора \bar{u}_{sxy} прикладених напруг і законі зміни моменту навантаження з урахуванням насичення магнітопроводу. Для цього при обчисленні потокозчеплень та матриці диференціальних індуктивностей контурів використовуються криві намагнічування основного магнітного шляху та шляхів потоків розсіювання контурів статора і ротора [10].

Інтегруючи нелінійну систему ДР (1) – (3) одним із числових методів, можна розрахувати усталений режим роботи системи електроприводу ШГПУ, розглядаючи його як результат закінчення перехідного процесу. Однак такий шлях розрахунку усталеного режиму з метою частотного регулювання [4] непридатний як з причини витрат машинного часу, так і неможливості аналізу та оптимізації енергетичних показників з метою формування керуючих впливів.

Основою визначення закону зміни моменту $M_c(\alpha)$ навантаження на валу АД від кута α є динамограма. Однак прикладений до валу АД момент M_c визначається не тільки динамограмою, але й кінематичною схемою верстата-гойдалки, масою та місцем розміщення на ньому зрівноважувальних вантажів [5], а також передавальним числом k_i від АД до кривошипа, яке визначається добутком передавальних чисел пасової передачі та редуктора

$$M_c(\alpha) = M_c(P_h^*(\alpha), k_i, k_\eta), \quad (4)$$

де k_η – коефіцієнт, який враховує механічні втрати в трансмісії.

Внаслідок періодичної залежності $P_h^*(\alpha)$ функція (4) є також періодичною. Отже розрахунок усталеного режиму установки полягає у визначенні функціональних періодичних залежностей координат впродовж періоду роботи верстата-гойдалки при заданих періодичних законах зміни моменту навантаження $M_c(\alpha) = M_c(\alpha + 2\pi)$ та моменту інерції $J(\alpha) = J(\alpha + 2\pi)$.

Періодичний розв'язок системи ДР (1) – (3) у вигляді законів зміни координат на періоді з найменшим обсягом обчислень і відповідно мінімально можливими затратами часу можна отримати методом розв'язування крайової задачі [6 – 8]. А оскільки внаслідок залежності частоти обертання ротора АД від миттєвого значення величини прикладеного моменту тривалість часового періоду циклу роботи верстата-гойдалки наперед невідома, необхідно перейти до кутової координати – кута повороту кривошипа α ($0 \leq \alpha \leq 2\pi$). Система ДР (1) – (3) в функції кута α має вигляд

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{\Psi}_{sxy}}{d\alpha} &= \frac{k_i p_0}{\omega} (\Omega_0 \bar{\Psi}_{sxy} - R_s \bar{i}_{sxy} + \bar{u}_{sxy}); \\ \frac{d\bar{\Psi}_{rxy}}{d\alpha} &= \frac{k_i p_0}{\omega} (\Omega_0 \bar{\Psi}_{rxy} + \Omega \bar{\Psi}_{rxy} - R_r \bar{i}_{rxy}); \end{aligned} \quad (5)$$

$$\frac{d\omega}{d\alpha} = \frac{k_i p_0}{\omega} \frac{p_0}{J(\alpha)} (M_e - M_c(\alpha)) - \frac{\omega}{2J(\alpha)} \frac{dJ(\alpha)}{d\alpha}.$$

Запишемо систему ДР (5) одним векторним рівнянням вигляду

$$\frac{d\vec{y}(\vec{x})}{d\alpha} = \vec{z}(\vec{y}, \vec{x}, \vec{u}, M_c, \alpha), \quad (6)$$

де $\vec{y} = \text{colon}(\psi_{sx}, \psi_{sy}, \psi_{rx}, \psi_{ry}, \omega)$; $\vec{x} = \text{colon}(i_{sx}, i_{sy}, i_{rx}, i_{ry}, \omega)$; $\vec{u} = \text{colon}(u_{sx}, u_{sy}, 0, 0)$; \vec{z} – вектор правих частин системи ДР (5).

Для визначення функціональних залежностей компонент вектора \vec{x} на періоді шляхом розв'язування крайової задачі систему ДР (6) алгебризуємо, використовуючи апроксимацію координат на сітці вузлів періоду. Це дає змогу перейти від неперервних часових їхніх залежностей на періоді до дискретних значень. Здійснивши сплайн-апроксимацію координат на сітці n вузлів періоду у відповідності з викладеним в [8], отримаємо алгебричний аналог системи (6) у вигляді алгебричного рівняння, в якому компонентами векторів є вузлові значення координат на періоді

$$H\vec{Y} - \vec{Z} = 0, \quad (7)$$

де H – блочно-діагональна матриця, елементи якої визначаються віддалами між вузлами [8];

$\vec{Y} = \text{colon}(\vec{y}_1, \dots, \vec{y}_n)$; $\vec{Z} = \text{colon}(\vec{z}_1, \dots, \vec{z}_n)$ – вектори, кожен з яких складений з n векторів вузлових значень відповідних змінних.

Розв'язком системи (7) є значення вектора $\vec{X} = \text{colon}(\vec{x}_1, \dots, \vec{x}_n)$, компонентами якого є вектори значень струмів контурів та частоти обертання ротора АД у вузлах періоду. Оскільки система алгебричних рівнянь (7) нелінійна, її розв'язування може бути здійснено одним із ітераційних методів, з яких найбільш ефективним є метод Ньютона. Однак він є локально збіжним, тому існує проблема збіжності ітераційного процесу. Для забезпечення його збіжності скористаємось методом продовження по параметру, суть якого у даному випадку полягає в дискретному нарощуванні вимушуючих сил. Проте до системи ДР (5) входять дві збурюючі дії: вектор прикладених напруг і зумовлений дією сили $P_h^*(\alpha)$ момент $M_c(\alpha)$ опору на валу АД. Очевидно, що одночасно нарощувати напругу живлення та момент навантаження пропорційно до деякої координати неможливо, оскільки ці величини зв'язані між собою нелінійно. Це, як правило, призводить до розбіжності ітераційного процесу. Тому задачу розрахунку стаціонарного періодичного режиму необхідно розв'язувати у два етапи [7]. На першому з них нарощуємо вектор $\vec{U} = \text{colon}(\vec{u}_1, \dots, \vec{u}_n)$ вузлових значень прикладених напруг від нуля до номінального значення за умови близького до нуля постійного ковзання, якому відповідає усталений режим роботи АД за відсутності навантаження. Отримане значення вектора $\vec{X}^{(0)} = \text{colon}(\vec{x}_1, \dots, \vec{x}_n)$ є початковою умовою для визначення координат режиму при заданому періодичному законі зміни моменту навантаження, тобто на другому етапі здійснюється розв'язування нелінійної системи (7) алгебричних рівнянь, суть якого полягає в наступному.

За визначеними з першого етапу розрахунку координат обчислюємо вектор нев'язок системи (7) при значенні вектора $\vec{X} = \vec{X}^{(0)}$ й утворимо нелінійну систему рівнянь вигляду

$$H\vec{Y} - \vec{Z} = (1 - \lambda)\vec{Q}^{(0)}.$$

Зміна параметра λ від $\lambda = 1$ до $\lambda = 0$ еквівалентна зменшенню вектора нев'язок $\vec{Q}^{(0)}$ до нуля, а вектор \vec{X} при цьому прямує від $\vec{X} = \vec{X}^{(0)}$ до значення, що відповідає розв'язку векторного рівняння (7), який уточнюємо методом Ньютона.

Активна та реактивна потужності для j -го вузла періоду визначаються за формулами [6]

$$P_j = 1.5(u_{sxj}i_{sxj} + u_{syj}i_{syj}); \quad Q_j = 1.5(u_{syj}i_{sxj} - u_{sxj}i_{syj}).$$

Регулювання частоти гойдань балансира зміною частоти напруги живлення АД електроприводу ШГПУ потребує визначення електричних величин (струму, електромагнітного моменту, потужності тощо), які змінюються з частотою гойдань балансира. Очевидно, що формування обмежень за величиною струму потребує визначення його середньоквадратичного значення за період, а за моментом – максимального значення на періоді.

Нижче наведено результати виконаних за розробленою програмою розрахунку для електроприводу ШГПУ на основі АД з номінальними даними: $P_n=15$ кВт; $I_n=29,9$ А; $M_n=97$ Нм, $p_0=2$. Зокрема, динамограми рис. 2 відповідають наведені на рис. 3, а залежності відносних значень струму та електромагнітного моменту АД, а на рис. 3, б – кутової частоти обертання кривошипного вала ($n_{kp}=10.4$ об/хв.).

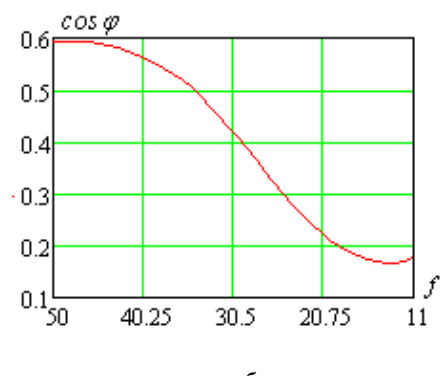
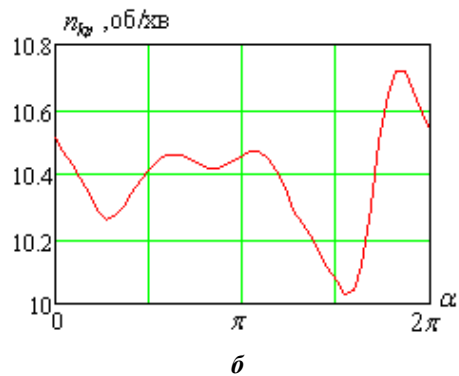
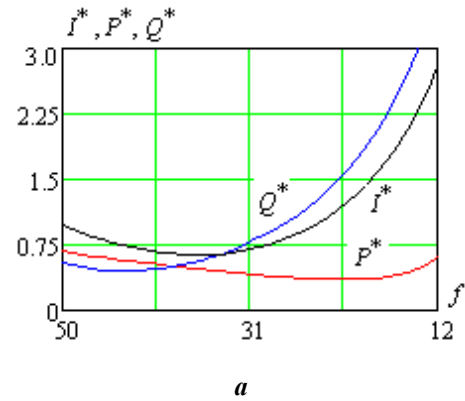
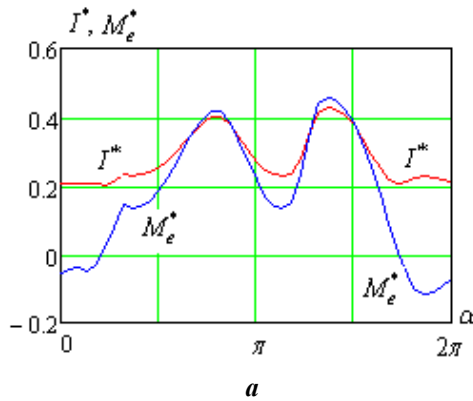


Рис. 2

Рис. 3

Використовуючи ці залежності, можна визначити середні за один цикл роботи верстата-гойдалки значення активної та реактивної потужностей, коефіцієнта потужності та середньоквадратичного значення струму статора двигуна та закони їхньої зміни в функції частоти (рис. 4, 5). Як видно з рис. 4, зменшення частоти до 25 Гц за незмінної напруги живлення призводить до недопустимого щодо нагрівання зростання струму обмотки статора, а також суттєвого зменшення коефіцієнта потужності.

За умови регулювання амплітуди напруги за законом $U/f = \text{const}$ (рис. 4) відбувається зменшення струму обмотки статора, активної і реактивної потужностей, що призводить до зростання коефіцієнта потужності. Середнє за період значення електромагнітного моменту при цьому незмінне.

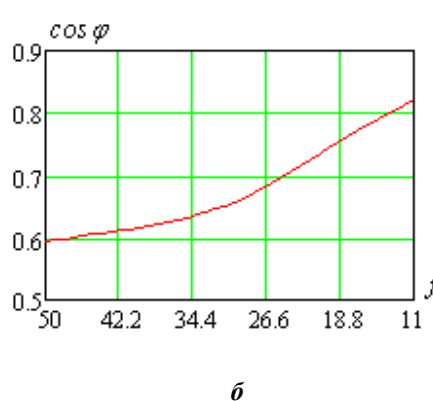
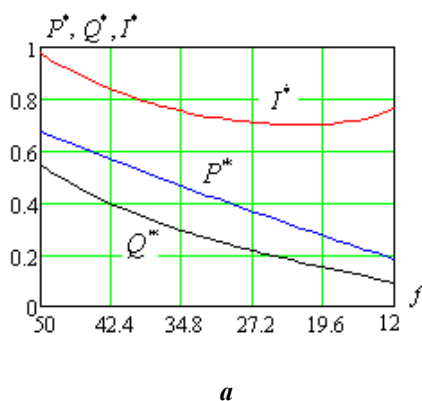


Рис. 4

Насамкінець зазначимо, що розроблена математична модель дає змогу виконувати розрахунки режимів і характеристик системи електроприводу ШГПУ і при інших законах регулювання напруги живлення та її частоти.

Висновки. В основу розрахунку граничних значень параметрів покладено математичну модель АД, в якій враховується насичення магнітопроводу й витіснення струму в стержнях обмотки ротора, а також розроблену на основі аналітичної геометрії динамічну математичну модель верстата-гойдалки.

Розроблена математична модель дає змогу визначити залежності від частоти експлуатаційних параметрів частотно-керованого електроприводу штангової нафтовидобувної установки з урахуванням періодично-змінного моменту навантаження та моменту інерції з метою визначення їхніх гранично допустимих значень. До таких параметрів належать струм, електромагнітний момент двигуна, частота обертання вала двигуна, коефіцієнт потужності тощо.

Система диференціальних рівнянь, яка описує динаміку електроприводу нафтовидобувної установки, розв'язується шляхом рішення крайової задачі для системи ДР першого порядку з періодичними крайовими умовами. Для розрахунку статичних характеристик використовується метод продовження по параметру.

На практиці розроблена математична модель може використовуватись для оперативного аналізу режимів роботи нафтовидобувної установки з метою формування керуючих впливів на електропривод, спрямованих на зміну продуктивності глибинної помпи відповідно до дебіту свердловини.

1. Акульшин О.О. Про встановлення режимів експлуатації свердловин установками штангових глибинних насосів за умови $P_{\text{виб}} < P_{\text{нас}}$. *Нафтова і газова промисловість*. 2004. № 5. С. 20-31.
2. Бойко В.С. Розробка та експлуатація нафтових родовищ. К.: Реал Прінт, 2004. 695с.
3. Беляев Е.Ф., Ташкинов А.А., Цылёв П.Н. Совершенствование электропривода станков-качалок нефтяных скважин с малым дебитом. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета (ПНИПУ). Геология. Нефтегазовое и горное дело*. 2012. № 4. С. 91-102.
4. Волков А.В., Скалько Ю.С. Цифровая модель частотно-регулируемого электропривода со скалярным управлением. *Электротехника та електроенергетика*. 2005. № 2. С. 75-81.
5. Маляр А.В., Калужний Б.С. Системы автоматизованого керування і моніторингу процесом видобування нафти. Львів: Національний університет "Львівська політехніка", 2012. 272 с.
6. Маляр А.В. Динаміка електроприводу штангової нафтовидобувної установки. *Технічна електродинаміка*. 2007. № 2. С. 50-54.
7. Malyar V.S., Malyar A.V., Andreishyn A.S. A method for calculating mechanical characteristics of induction motors with squirrel-cage rotor. *Electrical engineering & electromechanics*. 2019. No 2. Pp. 9-13. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2019.2.02>
8. Маляр В.С., Маляр А.В. Математическое моделирование периодических режимов работы электротехнических устройств. *Электронное моделирование*. 2005. Т. 27. № 3. С. 39-53.
9. Файзуллин И.К., Киселев В.В., Елдашев Д.А., Прошкальников Д.В., Гурьянов А.И., Фассахов Р.Х. Энергоресурсосберегающий режим эксплуатации малодебитных нефтяных скважин. *Нефтяное хозяйство*. 2007. № 1. С. 66-67.
10. Фильц Р.В. Математические основы теории электромеханических преобразователей. К.: Наукова думка, 1979. 208 с.
11. Чаронов В.Я. Экономичные электроприводы для станков-качалок малодебитных скважин. *Нефтяное хозяйство*. 1996. № 12. С. 46-48.

УДК: 62–83–52:622.276.53

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ РАСЧЕТА ДОПУСТИМЫХ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧИХ РЕЖИМОВ ЧАСТОТНО-УПРАВЛЯЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ШТАНГОВОЙ НЕФТЕДОБЫВАЮЩЕЙ УСТАНОВКИ

А.В. Маляр, докт.техн.наук, А.С. Андреишин

Национальный университет "Львовская политехника",

ул. С. Бандеры, 12, Львов, 79013, Украина.

E-mail: andrii.v.maliar@lpnu.ua

Рассматриваются проблемы регулирования частоты качаний балансира станка-качалки малопроизводительных нефтедобывающих скважин, из которых добыча нефти осуществляется с помощью штанговых глубинных насосов, связанные с переводом периодической эксплуатации на непрерывную. Разработана математическая модель, дающая возможность на основе комплексной модели электропривода, в которую входят математические модели станка-качалки и приводного двигателя, решать вопросы регулирования частоты качаний балансира в соответствии с изменением дебита пласта. От наполнения полости насоса жидкостью зависит форма динамограммы, а значит она служит основой для определения закона изменения момента

нагрузки. Предложен метод расчета статических характеристик АД, который приводит в действие станок-качалку, с учетом периодически-изменяющегося момента нагрузки и момента инерции движущихся частей. Расчет периодических зависимостей координат установившегося режима электропривода установки осуществляется путем решения краевой задачи. Предложенная математическая модель позволяет определять зависимости токов, мощностей, электромагнитного момента и других важных эксплуатационных параметров от амплитуды и частоты напряжения питания АД с целью нахождения предельно допустимых значений. Ее можно использовать для проектирования и наладки работы частотно-регулируемого электропривода штанговой нефтедобывающей установки, которая обеспечивает непрерывную работу малodeбитной скважины, согласованную с изменением дебита пласта. Библ. 13, рис. 5.

Ключевые слова: нефтедобывающая установка, малodeбитная скважина, асинхронный электропривод, стационарный режим, краевая задача, статические характеристики, регулирование частоты.

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL FOR COMPUTATION OF PERMISSIBLE OPERATING PARAMETERS OF THE SUCKER-ROD PUMP VARIABLE-FREQUENCY DRIVE

A.V. Malyar, A.S. Andreishyn

Lviv Polytechnic National University

S. Bandera str., 12, Lviv, 79013, Ukraine,

e-mail: andrii.v.maliar@lpnu.ua

The paper discusses the issues of regulating the swing frequency of the pump jack balance beam of marginal wells, from which oil is produced using sucker rod pumps, associated with switching the wells from intermittent to continued operation. A mathematical model, which comprises the mathematical models of the pump jack and driving motor, allowing solving the problems of regulating the balance beam swings frequency according to the flow rate variation on the basis of the electric drive complex model, was developed. The filling of the pump with liquid defines the shape of the load curve, and therefore it is the basis for determining the law of load torque variation. There was proposed a method of computing the static characteristics of the induction motor driving the pump jack, taking into consideration the periodically variable load torque and moment of inertia of the working parts. The periodic dependencies of the coordinates of the steady-state mode of the electric drive are computed by solving a boundary-value problem. The proposed mathematical model makes it possible to determine the dependencies of the current, power, electromagnetic torque and other significant operation parameters on the amplitude and frequency of the induction motor supply voltage in order to estimate the maximum permissible values. It can be used for designing and adjustment of the variable frequency drive of the sucker-rod pumping unit, which ensures the continuous operation of the marginal well consistent with the flow rate variation. References 13, figures 5.

Key words: sucker-rod pumping unit, marginal well, asynchronous electric drive, steady-state mode, boundary-value problem, static characteristics, frequency regulation.

1. Akulshyn O.O. About establish modes of operation well rod deep pumping unit provided $P_v < P_n$. *Naftova i gazova promyslovist*. 2004. No 5. Pp. 20-31. (Rus)
2. Boyko V.S. Development and exploitation of oil fields. Kyiv: Real Print, 2004. 695 p. (Ukr)
3. Beliaev E.F., Tashkinov A.A., Tsyliov P.N. Improvements of the beam pumping unitelectrical drive of the dripper. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo polytechnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftgazovoe i gornoe delo*. 2012. No 4. Pp. 91-102. (Rus)
4. Volkov A.V., Skalko Yu.S. Digital model of frequency-regulated electric drive with scalar control. *Elektrotehnika ta elektroenergetyka*. 2005. No 2. Pp. 75-81. (Rus)
5. Malyar A.V., Kaluzhnyi B.S. Automatic control and monitoring system of oil extraction process. Lviv: Lvivska Politehnika, 2012. 272 p. (Ukr)
6. Malyar A.V. Dynamics of the electric drive of the deep-well oil pumping unit. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2007. No 2. Pp. 50-54. (Ukr)
7. Malyar V.S., Malyar A.V., Andreishyn A.S. A method for calculating mechanical characteristics of induction motors with squirrel-cage rotor. *Electrical engineering & electromechanics*. 2019. No 2. Pp. 9-13. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2019.2.02>
8. Malyar V.S., Malyar A.V. Mathematical modeling of periodic modes of electrotechnical devices. *Elektronnoe modelirovanie*. 2005. Vol. 27. No 3. Pp. 39-53. (Rus)
9. Fayzullin I.K., Kiselyov V.V., Eldashev D.A., Proshchekalnikov D.V., Guryanov A.I., Fassakhov R.Kh. Energy resource saving mode of operation of stripped oil wells. *Neftyanoe khozyaystvo*. 2007. No 1. Pp. 66-67. (Rus)
10. Filts R.V. Mathematical foundations of the theory of electromechanical transducers. Kyiv: Naukova dumka, 1979. 208 p. (Rus)
11. Charonov V.Ya. Economical electric drives for sucker-rod pump of the marginal well. *Neftyanoe khozyaystvo*. 1996. No 12. Pp. 46-48. (Rus)

Надійшла 20.09.2019

Остаточний варіант 20.01.2020