

## ДИНАМІЧНІ ТА СТАТИЧНІ РЕЖИМИ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ШТАНГОВИХ НАФТОВИДОБУВНИХ УСТАНОВОК

© Маляр А.В., Андрейшин А.С., 2013

Розглядається питання визначення меж застосування рівнянь статичної рівноваги для дослідження роботи нафтовидобувної установки. Виконано дослідження впливу частоти гойдань балансира на характер перебігу повного циклу роботи верстата-гойдалки і динамічну складову моменту. В основу алгоритму покладено математичну модель асинхронного двигуна та верстата-гойдалки.

**Ключові слова:** асинхронний двигун, нафтовидобувна установка, динамічний режим, статичний режим.

The paper considers boundaries of application of static equilibrium equations for exploring the oil pumping unit operation. The effect of crank counterbalance oscillation frequency on the character of the pumping unit full operation cycle and the dynamical component of the torque was studied. The algorithm relies on the mathematical model of the asynchronous motor and pumping unit.

**Key words:** asynchronous motor, pumping unit, dynamic mode, static mode.

### Вступ

На більшості нафтових родовищ видобування нафти здійснюється переважно за допомогою штангових нафтовидобувних установок (ШНВУ), в яких глибинна помпа приводиться в рух від верстата-гойдалки. Для приводу верстата-гойдалки використовують трифазні асинхронні двигуни (АД) з короткозамкненим ротором, а керування роботою установки здійснюється з центрального пункту за допомогою пуско-регулювальної апаратури. Нафтове родовище розробляється десятками, а то і сотнями таких верстатів, розсосереджених по всій території промислу, внаслідок чого керування їх роботою є складною задачею [1]. Основним напрямом забезпечення безаварійної роботи і підвищення ефективності нафтовидобування є комп'ютерне керування роботою кожної установки на основі розвинутого програмного забезпечення і надійних алгоритмів його реалізації [1, 4].

### Постановка проблеми

Створюване нафтовидобувною установкою навантаження є періодично змінним. Воно має два максимуми і два мінімуми за період, який визначається повним циклом роботи установки. Частота циклів роботи глибинної помпи і відповідно гойдань балансира верстата-гойдалки знаходиться здебільшого в межах 2–18 коливань за хвилину. Поза тим, в електроприводах ШНВУ використовують АД із синхронною швидкістю 1500 об/хв [2], і за один період зміни механічного навантаження двигун здійснює кілька сотень обертів. Необхідне передавальне число від АД до верстата-гойдалки забезпечується за допомогою клинопасової передачі і редуктора. Воно може регулюватись дискретно шляхом зміни шківів на валу АД.

Для надійної безперебійної роботи ШНВУ і встановлення економічно доцільної системи керування нею необхідно здійснювати постійний контроль і аналіз параметрів режиму роботи всього обладнання. Основою для отримання інформації про стан плунжерної глибинної помпи слугує динамограма. Під час проектування установки використовують динамограму теоретичного циклу роботи глибинної помпи, а визначення необхідної потужності АД здійснюється на підставі емпіричних формул. Однак під час експлуатації необхідно мати достовірну інформацію про реальне

навантаження на полірований шток, яке має стохастичний характер. Тому під час експлуатації ШНВУ за допомогою різних давачів знімають реальну динамограму, яка заноситься в комп'ютер і слугує інформацією для прийняття рішення про видачу сигналів на керування установкою.

Динамограма відображає залежність сили, що діє в точці підвішування штанг, від кута  $\alpha$  повороту кривошипа  $P = P(\alpha)$  або переміщення  $S$  плунжера помпи  $P = P(S)$ . Однак періодична залежність  $M(\alpha) = M(\alpha + 2\pi)$  моменту навантаження на валу АД визначається не тільки характером динамограми, але й кінематичною схемою верстата-гойдалки та трансмісією від двигуна до кривошипного вала. Розроблена в [4] математична модель верстата-гойдалки дає змогу за відомою залежністю сили  $P = P(\alpha)$  визначити періодичну залежність моменту  $M(\alpha)$  на валу привідного двигуна та залежність моменту інерції від кута повороту кривошипа і швидкості його обертання.

Зважаючи на широкий діапазон зміни швидкості гойдань балансира, постає задача визначення, які з цих режимів можна розглядати як квазістатичні, а для яких таке припущення призводить до значних похибок. Ця проблема має важливе практичне значення, тому що аналіз динамічних режимів роботи ШНВУ потребує використання достатньо складних математичних моделей, а у разі можливості розгляду задачі як статичної можна здійснювати моніторинг і керування роботою установки з використанням простих математичних моделей. Це дає змогу здійснювати індивідуальне мікропроцесорне керування роботою установки.

### Аналіз останніх досліджень та постановка задачі

Процеси в електроприводі ШНВУ надто складні і потребують детального опису як електричної частини установки, так і механічної. Поза тим в практиці експлуатації ШНВУ до них використовуються методи аналізу роботи установок та систем керування ними, засновані на експериментальних і напівекспериментальних даних [1] або такі, що мають в своїй основі низку допущень [2]: постійність швидкості обертання ротора АД упродовж подвійного ходу точки підвішування штанг, не враховується змінний момент інерції, явище витіснення струму в стержнях ротора АД, насичення магнітної системи двигуна, а тому не забезпечують достовірності отриманих результатів розрахунку і не задовольняють потреби практики щодо створення автоматизованих, а тим більше інтелектуальних систем керування процесом нафтовидобування. Отримати достовірні результати можна лише на підставі використання математичних моделей високого рівня адекватності [5].

**Динамічний усталений режим.** Особливістю електроприводу ШНВУ є значна інерційність рухомих мас, чим зумовлено використанням 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 усталених режимах роботи. Як відомо, перетворення рівнянь електричної рівноваги контурів АД до осей  $x, y$  дає змогу у разі постійної швидкості обертання ротора звести диференціальні рівняння (ДР) до алгебричних [6], однак момент  $M_c$  навантаження, який створює верстат-гойдалка, має періодично-змінний характер, а отже, стаціонарні режими електроприводу ШНВУ є динамічними. Отже, усталений процес навіть в системі ортогональних осей є динамічним, а електромагнітні процеси з урахуванням розбиття кожного стержня ротора АД по висоті разом з короткозамикаючими кільцями на  $n$  елементарних описуються системою ДР, яка в матрично-векторній формі має вигляд

$$L \frac{d\vec{i}}{dt} = D\vec{\psi} - R\vec{i} + \vec{u}, \quad (1)$$

де  $L = \partial\vec{\psi} / \partial\vec{i}$  – матриця диференціальних індуктивностей контурів АД [6];  $\vec{u} = (u_{sx}, u_{sy}, 0, 0, 0)^*$ ;

$\vec{\psi} = (\psi_{sx}, \psi_{sy}, \psi_{1x}, \psi_{1y}, \dots, \psi_{nx}, \psi_{ny})^*$ ;  $\vec{i} = (i_{sx}, i_{sy}, i_{1x}, i_{1y}, \dots, i_{nx}, i_{ny})^*$  – вектори прикладених напруг, потокозчеплень та струмів контурів АД (верхній індекс “т” означає транспонування);  $R = \text{diag}(r_s, r_s, r_1, r_1, \dots, r_n, r_n)$  – діагональна матриця активних опорів;

$$D = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|} \hline & \omega_0 & & & \dots & & \\ \hline -\omega_0 & & & & \dots & & \\ \hline & & & s\omega_0 & \dots & & \\ \hline & & -s\omega_0 & & \dots & & \\ \hline \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \hline & & & & \dots & & s\omega_0 \\ \hline & & & & \dots & -s\omega_0 & \\ \hline \end{array}$$

– квадратна матриця  $2(n+1)$ -го порядку;  $\omega_0$  – циклічна частота напруги живлення;  $s = (\omega_0 - \omega)/\omega_0$  – ковзання ротора, який обертається з кутовою швидкістю  $\omega$  електричних рад. за с.

Динамічний режим роботи електроприводу ШНВУ описується системою ДР, яка складається із системи ДР (1) електричної рівноваги та рівняння руху ротора

$$\dot{I}_e - M_c = M_{\ddot{\alpha}}, \quad (2)$$

в якому:  $M_e = 1,5 p_0 (\psi_{sx} i_{sy} - \psi_{sy} i_{sx})$  – електромагнітний момент АД в осях  $x, y$ , де  $p_0$  – кількість пар полюсів;  $M_c = M_c(t) = M_c(t + T_i)$  – періодичний момент навантаження на валу АД, де  $T_m$  – часовий період зміни навантаження, тривалість якого визначається повним циклом роботи помпи;

$$M_{\ddot{\alpha}} = J(\gamma) \frac{d\omega_{\ddot{\alpha}}}{dt} + \frac{\omega_{\ddot{\alpha}}}{2} \frac{dJ(\gamma)}{dt} \quad (3)$$

– прикладений до ротора АД динамічний момент всієї електромеханічної системи, де  $\omega_{\ddot{\alpha}} = \omega/p_0$  – кутова швидкість обертання ротора;  $J(\gamma)$  – момент інерції установки, який залежить від кута  $\gamma$  повороту ротора двигуна, а також лінійної швидкості руху точки підвішування штанг, і визначається у відповідності до викладеного [4] як сума приведених до вала АД моментів інерції всіх елементів електроприводу ШНВУ.

Відзначимо, що залежності координат режиму роботи електроприводу від часу є незручними для використання у відповідних розрахунках, оскільки період їх зміни визначається одним оборотом повороту кривошипа  $\alpha$ , тому необхідно перейти до залежностей від цього кута. Часова координата  $t$  зв'язана з кутовою координатою  $\alpha$  повороту кривошипа залежністю  $dt = p_0 k_i / (\omega_0(1-s)) d\alpha$ .

Здійснивши перехід від похідних по  $t$  до похідних по кутові  $\alpha$  повороту кривошипа та від кутової швидкості  $\omega$  обертання ротора двигуна до ковзання, отримаємо

$$\frac{ds}{dt} = \frac{p_0}{J\omega_0} (M_c - M_e) + \frac{\omega_0(1-s)^2}{2Jp_0k_i} \frac{dJ}{d\alpha}, \quad (4)$$

де  $\alpha = \gamma/p_0 k_i$  ( $k_i$  – передавальне число від вала двигуна до осі обертання кривошипа,  $p_0$  – кількість пар полюсів АД).

Стационарний 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. Такі періодичні залежності є результатом розрахунку за розробленими в [3] алгоритмом. З його використанням виконані розрахунки стаціонарних режимів роботи ШНВУ при різних значеннях частоти обертання кривошипного вала. Приклад періодичної залежності статичного моменту навантаження, який створює верстат-гойдалка на валу АД, і електромагнітного моменту при різних частотах гойдань балансира наведено на рис. 1. Як видно з рисунка, зі збільшенням швидкості обертання кривошипного вала різниця між зазначеними моментами зростає. Постає задача: за якої швидкості можна користуватись рівняннями статички, а за якої таке припущення призводить до значних похибок, а отже, потребує використання рівнянь динаміки.

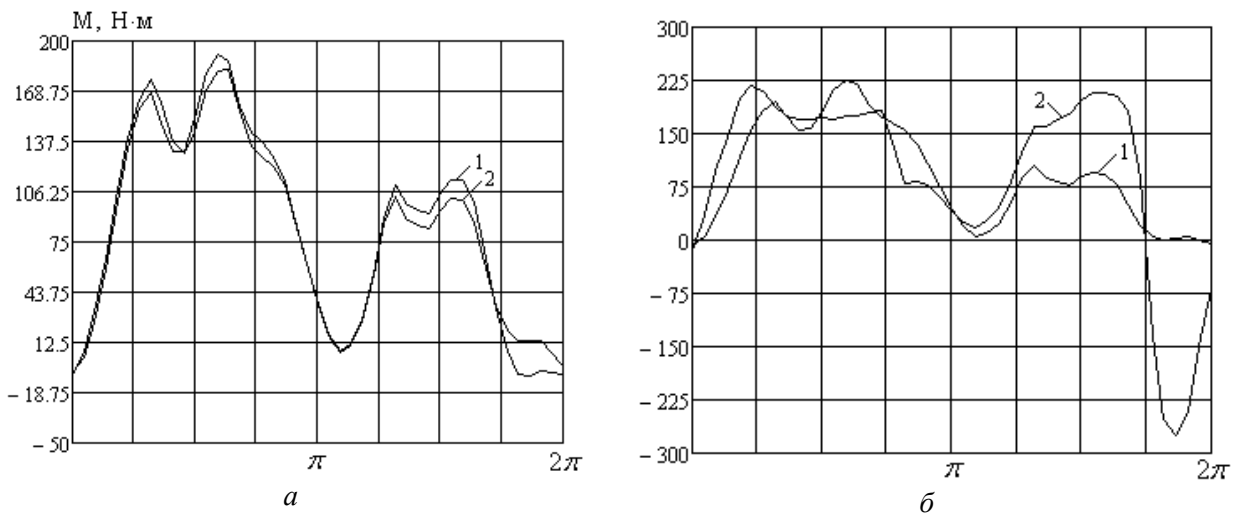


Рис. 1. Залежності відносних значень статичного (1) та електромагнітного (2) моментів при різних частотах обертання кривошипного вала

Про допустимість використовувати рівняння статички можна судити на підставі середньокваратичного відхилення між моментом навантаження і електромагнітним

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (M_c(\alpha) - M_e(\alpha))^2 d\alpha}. \quad (5)$$

На рис. 2, а зображена залежність вираженої в процентах величини  $\delta$  від швидкості обертання кривошипного вала для режиму роботи установки, при якій навантаження в точці підвішування штанг змінюється згідно з наведеною на рис. 2б розгорнутою динамограмою.

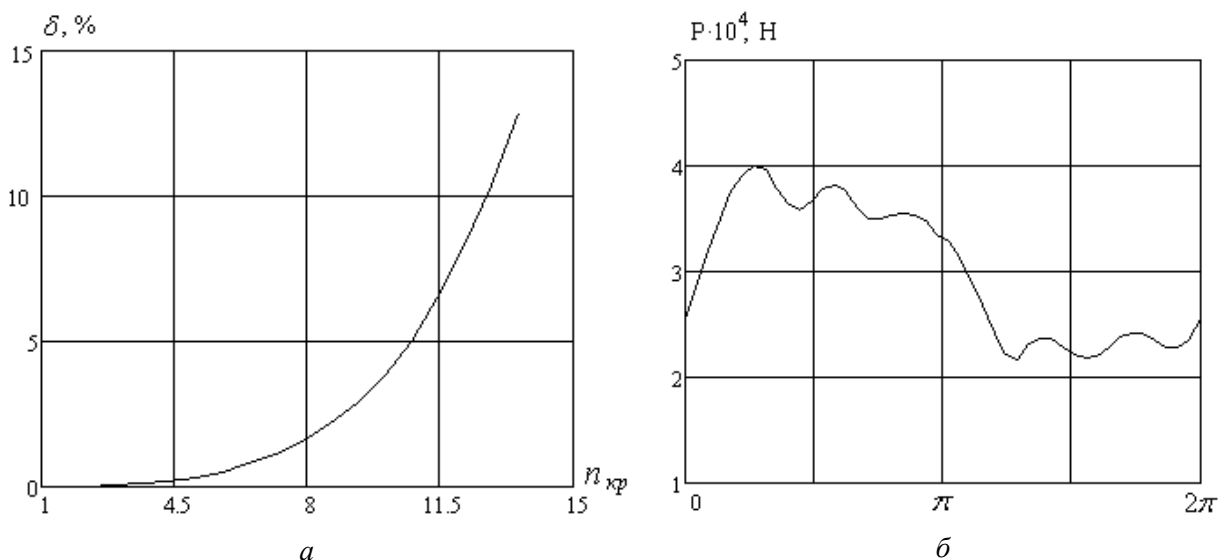


Рис. 2. Залежність середньоквадратичного значення різниці між моментом навантаження і електромагнітним моментом привідного двигуна від швидкості обертання кривошипного вала (а) в режимі роботи із зображеною на рис. (б) динамограмою

Як видно з рисунка, середньоквадратичне відхилення перевищує 5 % при швидкості обертання кривошипа  $n \geq 10$  об/хв. Очевидно, що це значення для різних динамограм роботи верстатогойдалки і різних зрівноважень буде відрізнятись. Тому, перш ніж налаштувати систему керування установкою, необхідно за рівняннями (1), (4) електромеханічної рівноваги згідно з викладеним в [3] алгоритмом розрахунку динамічних режимів розрахувати зображену на рис. 2, а залежність

$\delta = \delta(n_{kp})$ , яка слугуватиме основою для визначення припустимості використання рівнянь статички для аналізу роботи ШНВУ.

**Усталений статичний режим.** За умови постійної швидкості обертання рівняння електромагнітної рівноваги перетворених до осей  $x, y$  контурів статора є нелінійними алгебричними, причому нелінійність зумовлена винятково насиченням магнітопроводу. Зважаючи на те, що витіснення струму в стержнях фактично відсутнє внаслідок малих значень ковзання, немає необхідності розбивати стержні на елементи, а рівняння електричної рівноваги (1) при постійному ковзанні  $s$  мають вигляд

$$\Omega \vec{\Psi} + R \vec{i} = \vec{u}, \quad (6)$$

де

$$\vec{\Psi} = \begin{bmatrix} \psi_{sx} \\ \psi_{sy} \\ \psi_{rx} \\ \psi_{ry} \end{bmatrix}, \quad \vec{i}_s = \begin{bmatrix} i_{sx} \\ i_{sy} \\ i_{rx} \\ i_{ry} \end{bmatrix}, \quad \vec{u} = \begin{bmatrix} u_{sx} \\ u_{sy} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} r_{sx} & & & \\ & r_{sx} & & \\ & & r_{sy} & \\ & & & r_{sy} \end{bmatrix}, \quad \Omega = \begin{bmatrix} & -\omega_0 & & \\ \omega_0 & & & \\ & & & s\omega_0 \\ & & -s\omega_0 & \end{bmatrix}$$

– вектори потокозчеплень, струмів, прикладених напруг контурів АД та матриці активних опорів і допоміжна, в якій  $\omega_0, \omega$ , – частота напруги живлення та обертання ротора.

Розв'язком нелінійної системи рівнянь (6) при заданому значенні ковзання  $s = s_0$  є вектор струмів контурів АД, які дають змогу визначити значення потокозчеплення та електромагнітного моменту. Отримати залежності струмів контурів та електромагнітного моменту в інтервалі зміни зусилля в точці підвішування штанг згідно із динамограмою роботи верстата-гойдалки можна за таким алгоритмом:

а) використовуючи динамограму роботи ШНВУ у вигляді залежності сили  $P = P(\alpha)$ , яка діє в точці підвішування штанг, визначити періодичну залежність моменту на валу АД  $M(\alpha)$  на основі математичної моделі верстата-гойдалки [3];

б) за статичною механічною характеристикою АД, приймаючи, що визначений момент  $M(\alpha)$  дорівнює електромагнітному, визначаємо ковзання  $s$ ;

в) для кожного значення ковзання з системи (6) визначаємо струми і на їх основі потокозчеплення та інші величини, як-то активну та реактивну потужності тощо.

## Висновки

У створенні автоматизованих систем керування роботою нафтових родовищ основними вимогами є швидкість опрацювання інформації і її достовірність. Очевидно, що ці вимоги суперечливі, оскільки математичні моделі ШНВУ високої адекватності є достатньо складні.

В усталеному режимі роботи електроприводу ШНВУ внаслідок періодичної зміни моменту навантаження процеси є динамічними і описуються диференціальними рівняннями у будь-якій системі координат. Однак для малодобітних свердловин частота гойдань балансира порівняно невелика, а отже, у кожній точці динамограми процес можна вважати квазіусталеним і розраховувати режим роботи установки як статичний, що значно скорочує час на опрацювання інформації. Для цього необхідно для кожної свердловини попередньо визначити межу допустимості використання рівнянь статички залежно від частоти гойдань балансира, що дає змогу під час автоматизованого керування роботою вибрати відповідне математичне забезпечення..

1. Барский В.А. Проблемы построения системы управления параметрами станков-качалок с регулируемым приводом / В.А. Барский // Вестн. НТУ ХПИ Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика". – 2001. – Вып. 9. – С. 470–471. 2. Бойко В.С. Розробка та експлуатація нафтових родовищ / В.С. Бойко. – К.: РеалПрінт, 2004. – 695 с. 3. Маляр А.В. Алгоритм розрахунку стаціонарних режимів електроприводу штангових нафтовидобувних установок / А.В. Маляр // Технічна електродинаміка. – 2009. – № 4. – С. 40–44. 4. Маляр А.В. Математичне

моделивання роботи верстата-гойдалки штангової нафтовидобувної установки / А.В. Маляр // *Нафтова і газова промисловість*. – 2008. – № 3. – С. 34–35. 5. Маляр А.В. Системи автоматизованого керування і моніторингу процесом видобування нафти: Монографія /А.В. Маляр, Б.С. Калужний. – Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2012. – 272 с. 6. Фильц Р.В. Математические основы теории электромеханических преобразователей / Р.В. Фильц. – К.: Наук. думка, 1979. – 208 с.

УДК 621.313.3

В.С. Маляр, І.Р. Гавдьо

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра ЕМА

## ГАРМОНІЧНИЙ АНАЛІЗ КРИВОЇ ПОЛЯ В ПОВІТРЯНОМУ ПРОМІЖКУ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З ЕКРАНОВАНИМИ ПОЛЮСАМИ

© Маляр В.С., Гавдьо І.Р., 2013

**Розглянуто гармонічний склад кривої поля в повітряному проміжку асинхронного двигуна з екранованими полюсами на основі використання математичної моделі двигуна, в якій магнітопровід представлений розгалуженою заступною схемою.**

**Ключові слова:** асинхронний двигун, екрановані полюси, крива поля, гармонічний аналіз.

**The harmonic field effects in shaded-pole induction motor has been considered. The motor magnetic circuit is presented by the ramified equivalent circuit.**

**Key words:** induction motor, shaded-pole, harmonic field effects.

### Вступ

Однофазні асинхронні двигуни з екранованими полюсами (АДЕП) – дуже поширені асинхронні двигуни малої потужності. Їх застосовують у приводах приладів мікроклімату, особистої гігієни та інших приводах потужністю до 200 Вт, для яких основними є вимоги низької собівартості і надійності. Магнітна система АДЕП виконується здебільшого дво- або чотириполюсною. Статор має явновиражені полюси з зосередженою обмоткою збудження, яка живиться синусоїдною напругою, а частина кожного полюса охоплена екрануючою обмоткою – короткозамкненим (КЗ) витком. Ротор – циліндричний, з шихтованим магнітопроводом та короткозамкненою обмоткою. Для покращання форми магнітного поля між полюсними наконечниками розташовані магнітні шунти з листової сталі.

Незважаючи на простоту конструкції, АДЕП є складним об'єктом для теоретичного аналізу, тому що цьому двигуну властива електрична та магнітна несиметрія і значні насичення окремих ділянок магнітопроводу. Електрична несиметрія АДЕП зумовлена різною кількістю витків і неоднаковим перерізом провідників обмоток збудження і екрануючої, зміщенням обмоток статора на просторовий кут, менший за 90 електричних градусів, магнітна – зумовлена явнополюсною конфігурацією магнітопроводу статора. Тому форма кривої просторового розподілу магнітної індукції у повітряному проміжку значно відрізняється від синусоїди.

### Суть проблеми

Розроблені на основі лінійної теорії електричних машин моделі АДЕП використовують фундаментальні методи (симетричних складових, обертових полів, двох реакцій), які передбачають принцип накладання магнітних полів окремих обмоток та гармонічну зміну в часі струмів обмоток