

## РОЗШИРЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ ДІАГНОСТУВАННЯ НАФТОВИДОБУВНОГО ОБЛАДНАННЯ ЗА ШВИДКІСНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ПРИВОДНОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА

<sup>1</sup>В.А. Ровінський, <sup>2</sup>О.В. Євчук, <sup>2</sup>Ю.Й. Стрілецький

<sup>1</sup> Прикарпатський національний університет ім. В. Стефаника;  
76018, м. Івано-Франківськ, вул. Шевченка, 57, email: musicneutrino@gmail.com

<sup>2</sup>ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15,  
e-mail: olga.yevchuk@gmail.com

Запропоновано метод підвищення точності розрахунку гальмівного моменту на валу приводного електродвигуна, який використовується при ваттметрографічному методі діагностування штангових глибинно-насосних установок (ШГНУ), за допомогою додаткового вимірювання швидкості обертання його ротора. Встановлено, що оскільки швидкість обертання ротора залежить від навантаження на валу, то її можна використати в якості діагностичної ознаки замість ваттметрограми і тим самим конструктивно спростити систему діагностування.

На основі кінематичної схеми верстата-гойдалки отримано залежність зусилля в точці підвіски штанг від корисного гальмівного моменту на валу редуктора із врахуванням швидкості обертання ротора приводного електродвигуна.

Проведено моделювання в середовищі MatLab, результат якого підтверджує можливість використання сигналу, який пропорційний до швидкості обертання ротора, у якості діагностичної ознаки. Наведено алгоритм діагностування ШГНУ методом вимірювання швидкості обертання ротора приводного електродвигуна верстата-гойдалки, в якому використовується апроксимація робочої характеристики приводного електродвигуна поліномом другого порядку, коефіцієнти якого однократно визначаються при калібруванні системи діагностування ШГНУ.

Запропонований метод дає змогу проводити процедуру зрівноважування верстата-гойдалки та експрес-діагностику ШГНУ під час експлуатації нафтових свердловин.

Ключові слова: динамограма, моментограма, гальмівний момент, ШГНУ, кінематична модель

Предложен метод повышения точности расчета тормозного момента на валу приводного электродвигателя при ваттметрографическом методе диагностирования штанговых глубинно-насосных установок (ШГНУ) с помощью дополнительного измерения скорости вращения его ротора. Установлено, что так как скорость вращения ротора зависит от нагрузки на валу, ее можно использовать в качестве диагностического признака и тем самым конструктивно упростить систему диагностирования.

На основе кинематической схемы станка-качалки получена зависимость усилия в точке подвеса штанг от полезного тормозного момента на валу редуктора с учетом скорости вращения ротора приводного двигателя.

Проведено моделирование в среде MatLab, результат которого подтверждает возможность использования сигнала, пропорционального скорости вращения ротора, в качестве диагностического признака. Наведен алгоритм диагностирования ШГНУ методом измерения скорости вращения ротора приводного двигателя станка-качалки, в котором используется аппроксимация рабочей характеристики приводного электродвигателя полиномом второго порядка, коэффициенты которого однократно определяются при калибровании системы диагностирования ШГНУ.

Предложенный метод позволяет проводить процедуру уравнивания станка-качалки и экспрес-диагностику ШГНУ при эксплуатации нефтяных скважин.

Ключевые слова: динамограмма, моментограмма, тормозной момент, ШГНУ, кинематическая модель

The method for increasing the accuracy of the electric drive motor shaft brake torque calculation used in powermetering method for the sucker-rod pumping unit (SRPU) diagnostics with the help of additional measurement of its rotor rotational speed was developed. It was determined that due the fact that the rotor rotational speed depends on the shaft load there exists a possibility of using it as a diagnostics parameter instead of consumed power. This will allow to simplify the diagnostics system constructively.

Based on kinematic scheme of the beam-pumping unit, the dependence of the stress in the rod hanger center on the reductor shaft useful brake torque was defined with the account of the electric drive motor rotational speed.

Modeling with the help of the MatLab software was carried out and its results proved the possibility of using the signal, proportional to the rotor rotational speed, as a diagnostics parameter. In the article there is also an algorithm for the SRPU diagnostics with the help of the method for measuring the rotor rotational speed of the beam-pumping unit electric drive motor that uses approximation of the electric drive motor operating characteristic with the second-order polynomial whose coefficients are determined during the SRPU calibration procedure.

The developed method provides a possibility to conduct the beam-pumping unit balancing procedure and SRPU express diagnostics during oil well operation.

Keywords: dynagraph, momentograph, brake torque, sucker rod pumping unit, kinematic model

**Вступ.** Видобуток нафти на Україні, як і в більшості держав СНД, і до цього часу здійснюється за допомогою штангових глибинно-насосних установок (ШГНУ), за допомогою яких видобувається близько половини всієї нафти з родовищ. Це пояснюється експлуатаційною простотою ШГНУ, яка забезпечує зручність їх експлуатації. Відмови ШГНУ призводять до необхідності проведення ремонту свердловини, що вимагає значного часу та коштів.

**Аналіз стану проблеми дослідження.** Аналіз сучасного стану методів діагностування ШГНУ свідчить, що найбільш розповсюдженим залишається динамографічний метод [1,2]. Попри беззаперечні переваги (простота, оперативність, точність), динамографічному методу притаманний ряд недоліків, пов'язаних із неможливістю діагностування стану наземного обладнання та визначенням ступеня зрівноваженості верстата-гойдалки (ВГ). Ватметрографічні методи діагностування, початок розробки яких припав на 60-і роки ХХ століття, не набули поширення через низьку точність виділення діагностичної інформації про стан підземного устаткування та необхідність використання складного на той час обчислювального обладнання. В ватметрографічних методах використовується або прямий аналіз стану ШГНУ за формою ватметрограми, або здійснюється перетворення ватметрограми в динамограму. Останній метод більш практичний, оскільки більшість фахівців, які займаються діагностуванням ШГНУ, можуть безпосередньо визначати технічний стан ШГНУ за формою динамограми. Побудова динамограми з ватметрограми вимагає розрахунку моментограми - залежності гальмівного моменту на валу привідного електродвигуна від часу. З використанням моментограми здійснюється перехід від електричної потужності двигуна до крутного моменту на його валу. Зазвичай, при розрахунках приймається, що швидкість обертання ротора двигуна постійна і не змінюється при динамічній зміні навантаження ШГНУ.

**Метою дослідження** є підвищення точності розрахунку динамограми ШГНУ з використанням результатів вимірювання кутової швидкості обертання ротора привідного електродвигуна і його ватметрограми.

**Викладення основного матеріалу.** Підвищити точність розрахунку моментограми при ватметрографічному методі можна за допомогою додаткового вимірювання швидкості обертання ротора привідного двигуна. Крім того, оскільки швидкість обертання ротора залежить від навантаження на валу, то її можна використати в якості діагностичної ознаки замість ватметрограми і тим самим конструктивно спростити систему діагностування. Аналізуючи форму кривої швидкості обертання ротора асинхронного двигуна, можна також проводити зрівноваження верстата-гойдалки.

Для розрахунку корисного гальмівного моменту та визначення взаємозалежностей динамо- та моментограм із врахуванням швидкості обертання ротора привідного двигуна розглянемо кінематичну схему верстата-гойдалки (рис. 1) [3]. Тут точка  $O_2$  – ведений вал редуктора,  $m_1$  – маса компенсаційного вантажу (проти ваги) на балансірі (якщо такий вантаж відсутній, то ця маса враховує різні маси плеч балансиру),  $m_2$  – маса компенсаційного вантажу на кривошипі,  $F$  – сила, що діє на полірований шток. Кут  $\Psi$  описує відхилення балансиру від горизонтального положення, і в реальній діагностичній системі може вимірюватись. Кут  $\varphi$  описує обертання кривошипа відносно осі  $O_2$  (в реальній системі також може вимірюватись). Звичайно, вимірювати обидва кути не обов'язково. Достатньо виміряти хоча б один із них, і, оскільки між ними існує однозначний зв'язок, він може бути аналітично визначений. Відстань між точкою підвісу балансира та вихідним валом редуктора  $O_1O_2$  визначається із залежності:

$$L = \sqrt{a^2 + b^2} . \quad (1)$$

Кут  $\theta$  визначається відповідно:

$$\theta = \cos \frac{b}{L} . \quad (2)$$

кут  $\Psi$  може бути визначений наступним чином:

$$\psi(\varphi) = \arcsin \left[ \left\{ 2r_2 L \left( (\sin \varphi \cdot \sin \theta - \cos \varphi \cdot \cos \theta) - r_2^2 - L^2 - \rho_1^2 + lm^2 \right) \right\} \cdot \left\{ 4\rho_1^2 \times \left( (-r_2 \cdot \cos \varphi - L \cdot \cos \theta)^2 + (r_2 \cdot \sin \varphi - L \cdot \sin \theta)^2 \right) \right\}^{\frac{1}{2}} \right] - \arctan \left[ \frac{r_2 \cdot \cos \varphi - L \cdot \cos \theta}{r_2 \cdot \sin \varphi - L \cdot \sin \theta} \right] . \quad (3)$$

Водночас:

$$\varphi(\psi) = \begin{cases} \varphi_1(\psi) + 2\pi \Rightarrow \text{if } \frac{d\psi}{dt} > 0 ; \\ \varphi_2(\psi) \Rightarrow \text{if } \frac{d\psi}{dt} \leq 0 , \end{cases} \quad (4)$$

де додаткові функції  $\varphi_1, \varphi_2$  визначаються як:

$$\begin{aligned} \varphi_1(\psi) &= \arcsin(A(\psi) + Atn(\psi)) , \\ \varphi_2(\psi) &= \pi - \arcsin(A(\psi) + Atn(\psi)) . \end{aligned} \quad (5)$$

При цьому :

$$A(\psi) = \frac{1}{2r_2} \left[ \left\{ 2\rho_1 L (\cos \theta \cdot \cos \psi + \sin \theta \cdot \sin \psi) - r_2^2 - L^2 + lm^2 - \rho_1^2 \right\} \times \left\{ (L \cdot \cos \theta - \rho_1 \cdot \cos \psi)^2 + (-L \cdot \sin \theta + \rho_1 \cdot \sin \psi)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \right] , \quad (6)$$

$$Atn(\psi) = \arctan \left( \frac{L \cdot \cos \theta - \rho_1 \cdot \cos \psi}{-L \cdot \sin \theta + \rho_1 \cdot \sin \psi} \right) . \quad (7)$$

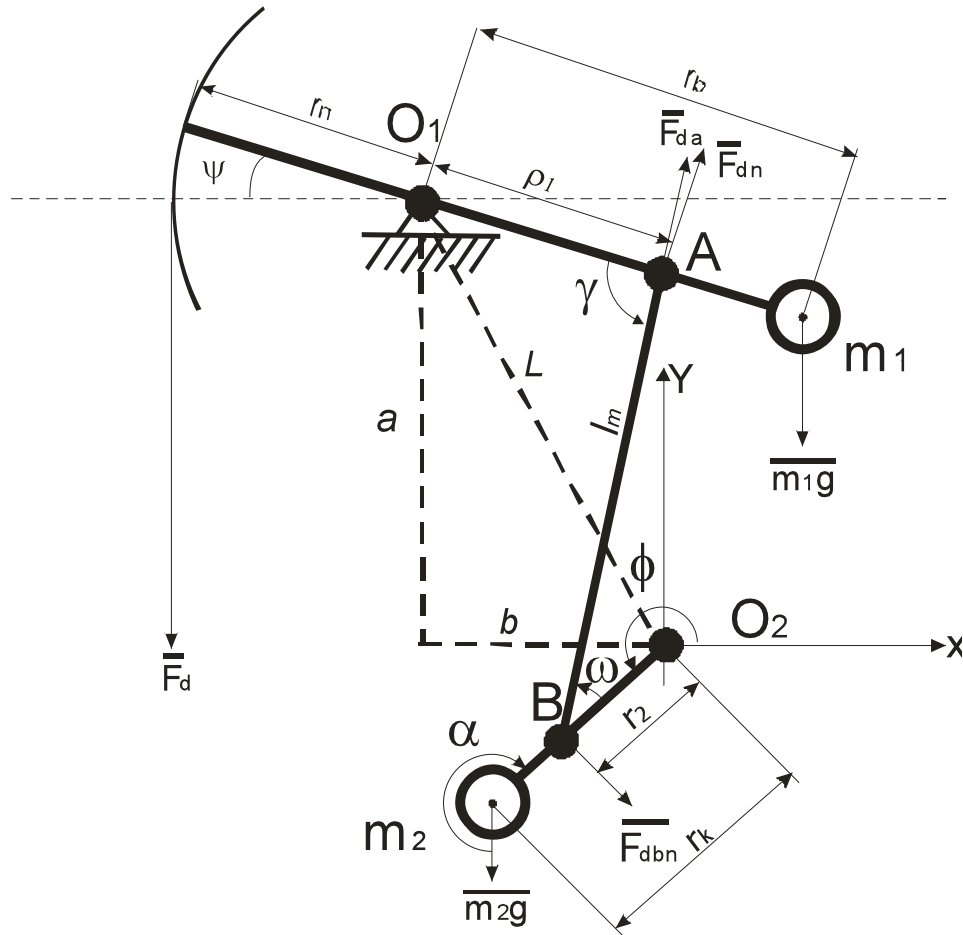


Рисунок 1 – Кінематична модель верстата-гойдалки

Слід зауважити, що в загальному  $\varphi$  та  $\psi$  є функціями від часу ( $\varphi(\psi(t)), \psi(\varphi(t))$ ), які для випадку застосування цифрових вимірювальних систем є табульованими величинами.

Розподіл робочих сил на кінематичній схемі також представлено на рис. 1.

Корисний гальмівний момент на валу редуктора, без врахування явищ інерційності, в такому разі можна представити в наступному вигляді:

$$Mr(t) = r_2 \cdot (F_{dbn}(t) + F_{am2n}(t)), \quad (8)$$

де додаткові функції визначені як: нормальна складова сили від навантаженого полірованого штока та противаги  $m_1$ , прикладена до кривошипа в точці з'єднання з шатуном (B):

$$F_{dbn}(t) = -F_{da}(t) \sin(\omega(\varphi(t))), \quad (9)$$

нормальна складова сили від зрівноважуючого вантажу  $m_2$ , прикладена до кривошипа в точці (B):

$$F_{am2n}(t) = \frac{r_k m_2 g}{r_2} \sin(\alpha(\varphi(t))), \quad (10)$$

сила, напрям якої збігається з віссю шатуна, утворена від корисного навантаження на полірований шток та зрівноважуючого вантажу  $m_1$ :

$$F_{da}(t) = \frac{g}{\sin(\gamma(\varphi(t)))} \times \left[ \frac{F_d(t)r_n}{\rho_1} - \left( \frac{r_b m_1}{\rho} \cos(\psi(\varphi(t))) \right) \right]. \quad (11)$$

Виразивши зусилля в точці підвіски штанги як  $F_d(t) = f(Mr(t))$ , одержимо:

$$F_d(t) = \frac{1}{r_k g} \times \left[ \frac{F_{am2n} - \frac{Mr(t)}{r_2}}{\sin(\omega(\varphi(t)))} \rho_1 \sin \gamma(\varphi(t)) + r_b m_1 g \cos \psi(\varphi(t)) \right]. \quad (12)$$

Для одержання кутових залежностей  $\gamma(\varphi), \omega(\varphi)$  зробимо додатковий аналітико-геометричний опис кінематичної схеми. Траєкторії точок A і B описуються наступними системами рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} xA(\varphi) &= -b + \rho_1 \cos \psi(\varphi) \\ yA(\varphi) &= a - \rho_1 \sin \psi(\varphi) \end{aligned} \right\}, \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} xB(\varphi) &= r_2 \sin \varphi \\ yB(\varphi) &= r_2 \cos \varphi \end{aligned} \right\}. \quad (14)$$

Кутові коефіцієнти прямих:

$$\begin{aligned} k_{O_2 B(\varphi)} &= \frac{yB(\varphi)}{xB(\varphi)}; \\ k_{O_1 A(\varphi)} &= \frac{a - yA(\varphi)}{-b - xA(\varphi)}; \\ k_{AB(\varphi)} &= \frac{yB(\varphi) - yA(\varphi)}{xB(\varphi) - xA(\varphi)}. \end{aligned} \quad (15)$$

Кут між кривошипом і шатуном:

$$\omega(\varphi) = \arctan \left( \frac{k_{AB(\varphi)} - k_{O_2 B(\varphi)}}{1 + k_{O_2 B(\varphi)} k_{AB(\varphi)}} \right). \quad (16)$$

Кут між балансиrom і шатуном:

$$\gamma(\varphi) = \begin{cases} \pi - \arctan \left( \frac{k_{O_1 A(\varphi)} - k_{AB(\varphi)}}{1 + k_{O_1 A(\varphi)} k_{AB(\varphi)}} \right) \Rightarrow \\ \Rightarrow \text{if } \arctan \left( \frac{k_{O_1 A(\varphi)} - k_{AB(\varphi)}}{1 + k_{O_1 A(\varphi)} k_{AB(\varphi)}} \right) > 0 \\ - \arctan \left( \frac{k_{O_1 A(\varphi)} - k_{AB(\varphi)}}{1 + k_{O_1 A(\varphi)} k_{AB(\varphi)}} \right) \Rightarrow \\ \Rightarrow \text{if } \arctan \left( \frac{k_{O_1 A(\varphi)} - k_{AB(\varphi)}}{1 + k_{O_1 A(\varphi)} k_{AB(\varphi)}} \right) \leq 0 \end{cases}. \quad (17)$$

Гальмівний момент на валу двигуна може бути представлений як:

$$M_2(t) = k_r \cdot Mr(t), \quad (18)$$

де  $k_r$  – загальний коефіцієнт передачі системи "редуктор-клинопасова передача" верстата-гойдалки.

Наведені вище залежності не враховують інерційних явищ при роботі ШГНУ, проте в більшості випадків можуть бути застосовані, внаслідок того, що переважна більшість ВК працюють з невеликим числом робочих ходів за хвилину при незначній глибині свердловини. Врахування інерційних явищ дозволяє підвищити точність розрахунку динамограми на 1-5% [3], проте підвищує складність самої моделі. За необхідності залежності (1-18) можуть бути замінені на модель ШГНУ в якій враховані інерційні явища, наведені в [3].

Вимірювання швидкості ротора привідного електродвигуна може також використовуватися як самостійний метод оцінки стану заглибного обладнання і найголовніше - для контролю зрівноваженості ШГНУ.

Вимірювання швидкості обертання ротора привідного електродвигуна – технічно нескладна задача, яка може бути вирішена з точністю до 0,1% за допомогою оптичних вимірювальних перетворювачів. Залежність між швидкістю обертання і моментом на валу встановлюється на основі аналізу характеристик асинхронних електродвигунів, які використовуються в приводі ШГНУ [4,5]. При цьому приймаються наступні положення:

- 1) клинопасова передача повністю робото-здатна;
- 2) явища ковзання відсутні;

3) підведена електроенергія відповідає всім технічним вимогам за рівнем напруги та значенням частоти;

4) приводний електродвигун повністю працездатний.

Основною перевагою такого методу діагностування є принципова відсутність погіршення метрологічних характеристик у часі – внаслідок відсутності механічних мірних вузлів, які сприймають велике циклічне навантаження, як це відбувається при динамографуванні. Такий метод є зручним у випадку побудови стаціонарних систем контролю за технічним станом ШГНУ, оскільки не містить елементів, деформація яких призводить до втрати точності вимірювань навантаження.

Основним положенням цього методу є виділення діагностичної інформації про момент на валу привідного двигуна з функції його частоти обертання.

Виявлення можливості виділення моменту навантаження із швидкісних характеристик ротора привідного електродвигуна можливо здійснити, провівши числове моделювання за допомогою стандартного програмного забезпечення. Для цього вибрано програму MatLab як таку, що має широкі можливості щодо розрахунку трифазних мереж та асинхронних електродвигунів. При цьому (згідно довідково-інформаційної документації програми) модель асинхронного двигуна в MatLab не враховує тільки явища перемагнічування в сталі, вплив якого на загальну динаміку процесів незначний. Для уникнення можливих помилок при описі електродвигуна (оскільки повна модель заміщення вимагає відомих параметрів, які не наводяться в технічній документації на електродвигуни), використано одну із стандартних моделей, яка найбільш підходить за структурою та своєю потужністю. Проведення моделювання цього процесу в середовищі MatLab (Simulink) дозволить виявити, чи дійсно сигнал, пропорційний до швидкості обертання ротора, може бути використаний у якості діагностичної ознаки при діагностуванні ШГНУ. На рис. 2 наведено імітаційну модель в середовищі MatLab (Simulink).

В такий спосіб моделюється поведінка електродвигуна, до валу якого прикладається змінний момент деякої форми. Форма вхідної функції моменту розрахована з динамограми, експериментально одержаної на свердловині Б-320 (Битківське родовище, Надвірнянське НГВУ) на основі залежностей (2-18). Величина моменту приймає як позитивні, так і негативні значення (внаслідок незрівноваженості верстата-гойдалки), що дозволяє досліджувати поведінку електродвигуна в нормальному та генераторному режимах. На рис. 3 наведено графічні результати такого моделювання.

Модель електродвигуна вибрано зі стандартної бібліотеки MatLab. Потужність модельованого асинхронного двигуна  $\approx 2,2$  кВт. Візуально форма кривої швидкості обертання ротора, форма кривої навантаження та форма кривої потужності споживання збігаються.

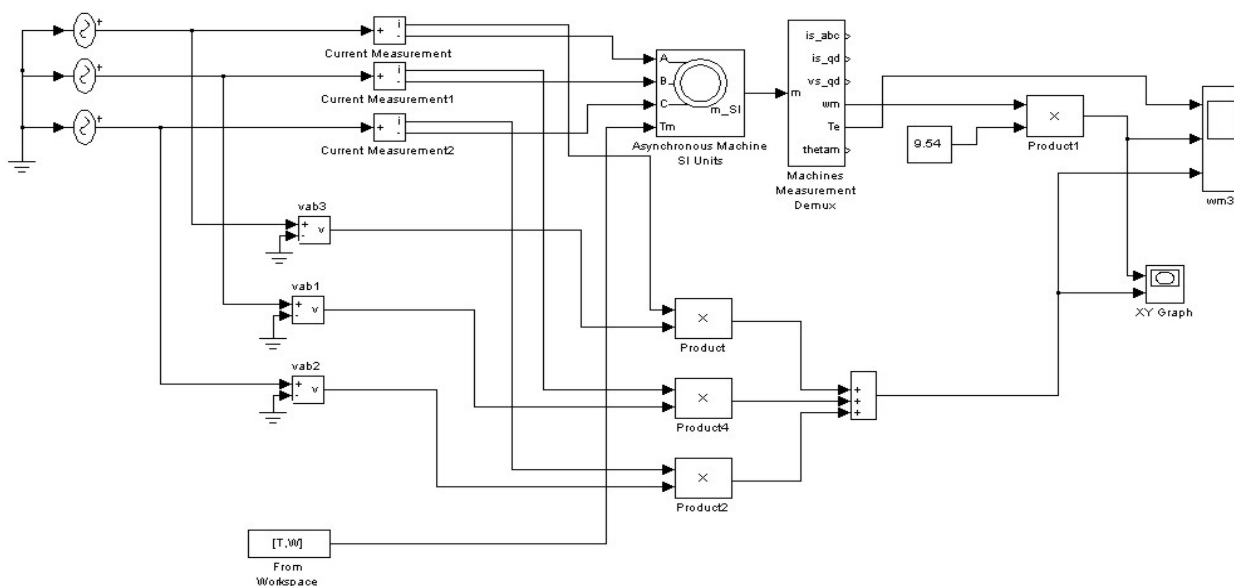
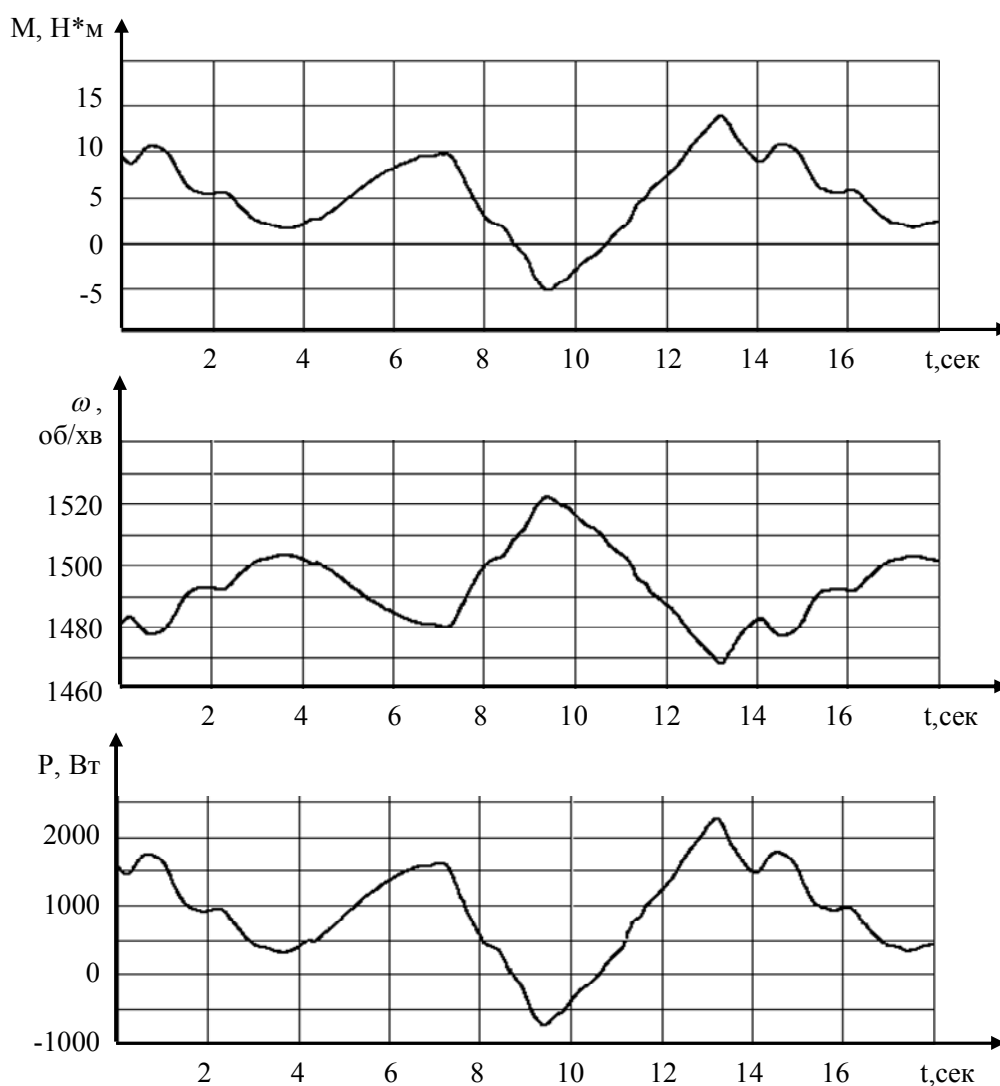


Рисунок 2 – Схема проведення імітаційного експерименту в середовищі MatLab



$\omega$  – швидкість обертання ротора,  $M$  – крутний момент на валу двигуна,  
 $P$  – споживана потужність

Рисунок 3 – Результати моделювання асинхронного електродвигуна в середовищі MatLab

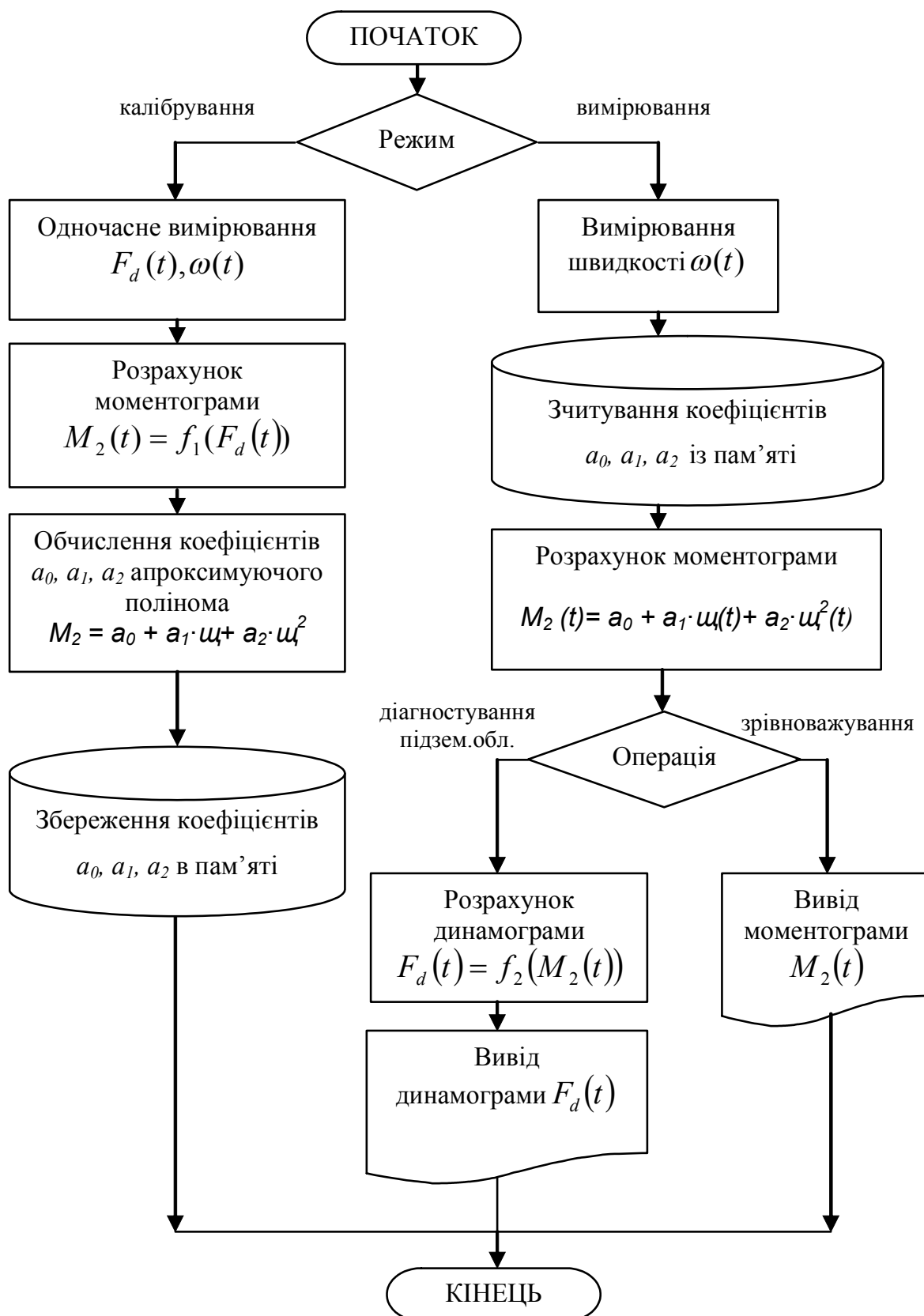


Рисунок 4 – Алгоритм діагностування ШГНУ методом швидкісних характеристик

Використовуючи відомий різницевої метод діагностування [6], за формою кривої швидкості обертання ротора електродвигуна можна оцінювати стан обладнання ШГНУ.

Алгоритм діагностування ШГНУ шляхом вимірювання швидкості обертання ротора привідного двигуна верстата-гойдалки полягає в наступному (рис. 4).

1. Початок етапу калібрування, під час якого одночасно вимірюються швидкість обертання ротора двигуна  $\omega(t)$  та динамограма  $F_d(t)$  за цикл качання ШГНУ. Запис  $\omega(t)$  здійснюється за допомогою стаціонарно закріпленого за верстатом-гойдалкою контролера спостереження, а запис сигналу навантаження  $F_d(t)$  – за допомогою переносного електронного динамографа, під'єданого до додаткового входу цього контролера.

2. За відомою математичною моделлю верстата-гойдалки обчислюється значення корисного гальмівного моменту на валу двигуна  $M_2(t) = f_1(F_d(t))$ ,  $t=0\dots T$ , де  $T$  – період качання.

Обчислюються коефіцієнти функції, що апроксимує співвідношення між швидкістю обертання ротора  $\omega$  та корисним гальмівним моментом на валу двигуна  $M_2$ . Залежність між цими величинами є близькою до лінійної [4] і з достатньою ступінню точності може бути апроксимована поліномом другого порядку. Для визначення коефіцієнтів доцільно використати метод найменших квадратів. Обчислені коефіцієнти запам'ятовуються в енергонезалежній пам'яті ЕОМ з можливістю подальшого багатократного зчитування. На цьому етапі калібрування слід вважати завершеним.

Етап вимірювань. Обчислення часової залежності корисного гальмівного моменту на валу двигуна  $M_2(t)$  здійснюється стаціонарно і автономно шляхом розрахунку  $M_2(t) = a_0 + a_1 \omega(t) + a_2 \omega^2(t)$ , де  $t=0\dots T$ , без застосування прямого динамометрування. В залежності від типу операції виводиться або моментограма  $M_2(t)$ , або розрахована з неї динамограма  $F_d(t) = f_2(M_2(t))$ , де  $f_2$  – функція, обернена до  $f_1$ . Далі аналіз даних може бути здійснений оператором візуально. При цьому за моментограмою оцінюється зрівноважування ВК, а за динамограмою – стан заглибного обладнання.

### Висновки

Використання інформації про швидкість обертання привідного електродвигуна дозволяє підвищити точність розрахунку моментограми, а, отже, і динамограм, за допомогою яких проводиться остаточна оцінка робочого стану ШГНУ. До складу комплексної системи діагностування ШГНУ повинен входити ватметрограф та вимірювач кутової швидкості.

Запропонований метод діагностування дозволяє проводити процедуру зрівноважування верстата-гойдалки та експрес-діагностику ШГНУ і може бути застосований під час експлуатації нафтових свердловин. Апроксимація робочої частини характеристики привідного електродвигуна поліномом другого порядку, коефіцієнти якого однократно визначаються при калібруванні системи діагностування ШГНУ, дає можливість уникнути процесу пря-

мого розрахунку механічної характеристики електродвигуна.

### Література

- 1 Хакимьянов М.И. Функциональные возможности современного контроллера автоматизации штанговых глубиннонасосных установок [Текст] / М.И. Хакимьянов // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2011. – №2. – С. 19-34. Режим доступа: [www.orgbus.ru](http://www.orgbus.ru)
- 2 Садов В.Б. Оценка параметров нефтесодержащих и управление насосной установкой с использованием динамограмм [Текст] / В.Б. Садов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2013. – № 2, том 13. – С. 33-41.
- 3 Ровінський В.А. Вдосконалення ватметрографічних методів діагностування штангових глибинно-насосних установок для видобутку нафти та розробка технічних засобів для їх реалізації [Текст]: Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук / В.А. Ровінський. – Івано-Франківськ, 2003. – 128 с.
- 4 Бойко Е.П. Асинхронные двигатели общего назначения [Бойко] / Е.П. Бойко, Ю.В. Гаинцев, Ю.М. Ковалев и др.; под ред. В.М. Петрова и А.Э. Кравчика. – М.: Энергия, 1980. – 488 с.
- 5 Костенко М.П. Электрические машины. В 2-х ч. Ч.2. Машины переменного тока [Текст] / М.П. Костенко, Л.М. Пиотровский – М.: Энергия, 1965. – 648 с.
- 6 Алиев Т.М. Автоматический контроль и диагностика скважинных штанговых насосных установок / Т.М. Алиев, А.А. Тер-Хачатуров. – М.: Недра, 1988. – 232 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії  
12.02.15

Рекомендована до друку  
професором **Тарком Я.Б.**  
(ФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)  
професором **Пилипівим В.М.**  
(Прикарпатський національний університет  
ім. В. Стефаника, м. Івано-Франківськ)