

5. Верлань А. Ф. Интегральные уравнения: методы, алгоритмы, программы / А. Ф. Верлань, В. С. Сизиков. — К. : Наук. думка, 1986. — 544 с.
6. Сизиков В. С. Обратные прикладные задачи и MatLab / В. С. Сизиков. — СПб. : Лань, 2011. — 256 с.
7. Мосенцова Л. В. Реализация метода моделирования для решения уравнений Фредгольма I рода в системе MATLAB / Л. В. Мосенцова // Сб. тезисов конф. «Интегральные уравнения». — К. : Изд-во ИПМЭ, 2009. — С. 110–112.

Work is devoted to the features of solving of problem of interpretation of supervisions in the integral raising.

**Key words:** *problem of interpretation of supervisions, integral models, regularization methods, regularization parameter, incorrectness.*

Отримано: 10.03.2014

УДК 62-83

**М. С. Нікорюк\***, канд. техн. наук,

**В. М. Карпенко\*\***, канд. техн. наук

\*Донецький національний технічний університет, м. Донецьк,

\*\*ДП «Науканафтогаз» НАК «Нафтогаз України», м. Вишневе

### **РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ЗМІНИ НАПРУГИ ЗАДАТЧИКА ІНТЕНСИВНОСТІ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА БУРОВОЇ ЛЕБІДКИ ЛБ 650 Е**

У статті розглянуто замкнену систему автоматичного керування напруги живлення на затискачах двигунів постійного струму з послідовним збудженням у перехідних режимах пуску. Розроблено алгоритм формування напруги задатчика інтенсивності, що дає змогу забезпечити швидкодію й мінімум часу на підйом чи спуск колони, при наступних обмеженнях:

$$i \leq I_{\max} ; u \leq U_{\max} .$$

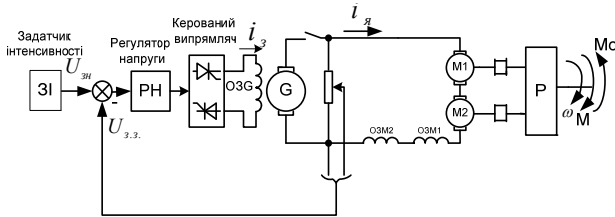
**Ключові слова:** *бурова установка, система підйимального агрегату, електропривод, система Г-Д, двигун, пуск, напруга на затискачах двигуна, керування зміною напруги, задатчик інтенсивності.*

**Постановка проблеми та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями.** Використання в якості виконавчих органів підйимального агрегату стаціонарних бурових установок високо обертових двигунів постійного струму з послідовним збудженням суттєво зменшує вагу агрегату. Для цих двигунів практично відсутні обґрунтовані методи їх керування, не розроблені алгоритми формування керуючого впливу — напруги живлення на затискачах двигунів у перехідних режи-

мах. При розгляді цих режимів не враховуються вихрові струми, що мають суттєвий вплив на динаміку перехідних процесів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сучасні концепції побудови бурових установок (БУ) ведучих їх виробників ґрунтуються на застосуванні індивідуального плавно регульованого електроприводу з двигунами постійного струму [1].

На рис. 1 показана спрощена структурна схема системи автоматичного керування напруги живлення силової частини перспективного електроприводу системи підйомного агрегату бурової установки [2]. Силова частина системи побудована по принципу Г-Д (використовується дизель-генераторна установка, що випускається в Україні і яка добре апробована часом) із двома двигунами послідовного збудження, які включені послідовно поміж собою та генератором. Двигуни працюють на загальний вал, що з'єднаний із барабаном лебідки.



**Рис. 1.** Структурна схема системи автоматичного керування напруги живлення приводу бурової лебідки

Динамічний режим роботи двигуна постійного струму з послідовним збудженням описується відомими рівняннями [3; 4]:

$$\left. \begin{aligned} 0 &= i_{e.m.} R_{e.m.} + w_{e.m.} \frac{d\Phi}{dt}; \\ U_{я} &= k\Phi\omega + i_{я} R_{я\delta} + L_{я\delta} \frac{di_{я}}{dt} + w_e \frac{d\Phi}{dt}; \\ M - M_c &= J \frac{d\omega}{dt}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де  $i_{e.m.}$  — умовний вихровий струм;  $R_{e.m.}$  — опір короткозамкненої обмотки вихрових струмів;  $w_{e.m.}$  — умовна кількість витків короткозамкненої обмотки вихрових струмів,  $k = p_n \cdot N / 2\pi \cdot a$  — конструктивна стала двигуна;  $p_n$  — кількість пар полюсів обмотки збудження;  $N$  — кількість активних провідників якоря двигуна;  $a$  — кількість паралельних витків якорної обмотки;  $\omega$  — кутова швидкість,  $i_{я}$  — струм якійного кола двигуна,  $R_{я\delta}$  — опір якійного кола двигуна,  $L_{я\delta}$  — сумарна

індуктивність розсіювання якоря, додаткових полюсів і компенсаційної обмотки,  $w_g$  — кількість витків обмотки збудження,  $M$  — момент двигуна,  $M_c$  — момент сили опору,  $J$  — момент інерції двигуна.

В [5] було проведене дослідження динамічних параметрів системи підйимального агрегату бурової установки при подачі на затискачі двигунів напруги, що змінюється за лінійним законом. В механічній частині електроприводу, не залежно від процесу (підйом чи спуск), виникають перехідні процеси, у яких динамічні навантаження значно перевищують допустимі.

В роботі [1] розроблений алгоритм формування керуючого впливу — напруги на затискачах двигуна постійного струму з послідовним збудженням, що дозволяє забезпечити швидкодію й мінімум часу перехідного процесу пуску двигуна постійного струму з послідовним збудженням.

**Мета роботи.** Метою роботи є наступне:

1. Розробити принцип формування керуючого впливу — зміни напруги задатчика інтенсивності системи автоматичного керування напруги живлення на затискачах двигунів постійного струму з послідовним збудженням силового приводу бурової лебідки ЛБ 650 Е, що забезпечує швидкодію й мінімум часу на підйом чи спуск колони, при наступних обмеженнях:

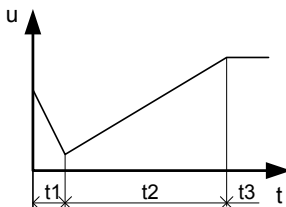
$$i \leq I_{\max}; u \leq U_{\max}.$$

2. Розробити MATLAB-модель дослідження перехідних процесів пуску двигунів постійного струму з послідовним збудженням з урахуванням нелінійності магнітної системи двигунів та вихрових струмів.
3. Провести дослідження перехідних процесів пуску двигунів бурової лебідки ЛБ 650 Е і визначити максимальні навантаження елементів силового електроприводу та напруги на затискачах керуючих приладів.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** У відповідності до принципу динамічного програмування, сформульованого Беллманом Р., для досягнення електродвигуном заданої швидкості  $\omega_c$  за мінімальний час необхідно, щоб в кожному наступному інтервалі розрахунку часу  $\Delta t$  швидкість отримувала максимально можливий приріст  $\Delta\omega_{\max}$ . Це реалізується, якщо струм двигуна  $I$  на кожному інтервалі  $\Delta t$  досягає максимального значення, а максимальне прискорення за обраний шаг розрахунку  $\Delta t$  стає обмеженою величиною. В роботі [1] запропонований наступний алгоритм зміни напруги живлення (рис. 2), що забезпечує формування належного керуючого впливу.

Для забезпечення бажаної зміни напруги генератора, що живить якірні кола двигунів, напруга задатчика інтенсивності повинна змінюватися за таким же алгоритмом. Його початкове значення визначає швид-

кості зростання струму, моменту двигунів, а швидкість зменшення напруги на першому проміжку часу  $t \leq t_1$  — амплітуду струму. Швидкість зростання напруги на другому інтервалі визначає динамічний момент розгону приводу. Стале значення напруги задатчика інтенсивності на третьому інтервалі визначає сталу швидкість руху приводу. Ця напруга обмежена максимальним значенням напруги генератора.



**Рис. 2.** Графік зміни напруги задатчика інтенсивності

Параметри механічної частини приводу, що приведені до кутової швидкості двигунів, надаються в таблиці 1.

Коефіцієнт корисної дії лебідки  $\eta_n = 0,96$ , коефіцієнт корисної дії редуктора  $\eta_p = 0,95$  (приймаємо рівними). Розподіленою масою канату зневажаємо, а його жорсткість приймаємо нескінченною, а момент механічних втрат у двигуні дорівнює

$$\Delta M = 0.02M_n = 0,02 \cdot 5200 = 104 \text{ Нм.}$$

Таблиця 1

*Параметри механічної частини приводу*

№	Вага вантажу, кН	Момент опору, приведений до кутової швидкості двигуна, кНм	Сумарний момент опору, кНм	Момент інерції, кг·м <sup>2</sup>
1	2000 (підйом вантажу)	16,5	16,71	313,5
2	2000 (спуск вантажу)	13,73	13,52	313,5
3	0 (підйом гаку)	1,36	1,57	302,6
4	0 (спуск гаку)	0,2	0	302,6

Параметри контуру регулювання напруги надані в таблиці 2.

Таблиця 2

*Параметри контуру регулювання напруги електроприводу бурової лебідки ЛБ-650 Е*

Індуктивність головних полюсів $L_{eng}$ , Гн	Електричний опір збудження $R_{z2}$ , Ом	Стала часу $T_{z2}$ , сек.	Напруга живлення збудження $U$ , В	Напруга живлення / максимальна якіра генератора $U_c$ , В	Коефіцієнт підсилення генератора $K_c$ , В/А
0,1304	0.82	0.159	85	636/870	13,3

Генератор розглядається як лінійна ланка, а насичення магнітної системи враховується обмеженням вихідної напруги її максимальним значенням. Тому коефіцієнт підсилення генератора рахується незмінним.

Передавальна функція генератора

$$W_g = \frac{K_g}{T_{32}p + 1}.$$

Для компенсації інерційності обмотки збудження генератора в системах підпорядкованого регулювання використовуються регулятори напруги, передавальна функція якого визначається формулою:

$$W_{pn} = \frac{T_3 p + 1}{T_\mu p},$$

де  $T_\mu = 0,05$  сек. — мала стала часу. Визначення  $T_\mu$  є попереднім.

Для живлення обмотки збудження генератора використовується керований випрямляч, який при моделюванні рахуємо безінерційним. Тому його передавальна функція

$$W_{kv} = K,$$

де  $K = \frac{U_{zg,max}}{U_{vx,zg,max}} = \frac{100}{10} = 10$  — коефіцієнт підсилення керованого випрямляча,  $U_{zg,max}$ ,  $U_{vx,zg,max}$  максимальні вихідна та вхідна напруги випрямляча.

Коефіцієнт зворотного зв'язку  $K_{3,3} = \frac{U_{vx,zg,max}}{U_{z,max}} = \frac{10}{1000} = 0,01$ .

Для практичного використання системи рівнянь (1) виключаємо вихровий струм  $i_{в.м.}$  і вирішуємо цю систему відносно перших похідних змінних. Після перетворень отримаємо систему рівнянь (2):

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\Phi}{dt} &= \frac{1}{T_{в.м.}} (k_\Phi \cdot i_\gamma - \Phi); \\ \frac{di_\gamma}{dt} &= \frac{E_g}{L_{\gamma\Sigma}} - i_\gamma \frac{T_{в.м.} + T_{в.}}{T_{в.м.} \cdot T_{\gamma\Sigma}} - \frac{2 \cdot k \cdot \Phi \cdot \omega}{L_{\gamma\Sigma}} + \frac{2 \cdot T_{в.} \cdot R_{\gamma\delta}}{T_{в.м.} \cdot L_{\gamma\Sigma}} \cdot \frac{\Phi}{k_\Phi}; \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{M - Mc}{J} = \frac{2 \cdot k \cdot \Phi \cdot i_\gamma - Mc}{J}; \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

де  $T_{в.} = k_\Phi \cdot w_\delta / R_{\gamma\delta}$  — стала часу обмотки збудження двигуна;  $T_{в.м.}$  —

стала часу кола вихрових струмів,  $k_\Phi = \frac{\Phi}{i_\gamma + i_{в.м.}}$  — коефіцієнт, що від-

повідає кривій намагнічування двигуна,  $T_{\gamma\Sigma} = \frac{L_{\gamma\Sigma}}{R_{\gamma\Sigma}}$  — стала часу якірного

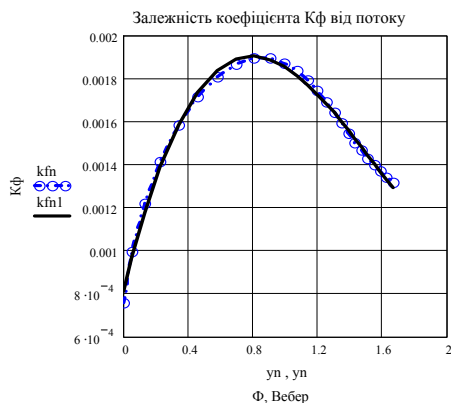
кола двигунів,  $L_{\gamma\Sigma}$  — сумарна індуктивність якірного кола двигунів;  $J$  — сумарний момент інерції механічної частини електроприводу.

Отримана система рівнянь (2) є нелінійною у зв'язку з наявністю добутку змінних  $e = k\Phi\omega$  і  $M = k\Phi i_{я}$ , а також нелінійної залежності потоку двигуна від м.р.с. збудження. Основна проблема, що виникає при розв'язуванні системи рівнянь (2), пов'язана з урахуванням нелінійної залежності потоку від м.р.с. збудження. При розв'язуванні цієї задачі нелінійна залежність враховується за допомогою коефіцієнта  $k_{\Phi}$ , який є функцією сумарного струму  $i_{я} + i_{в.м.}$ .

Для розв'язування цієї задачі може бути запропонований наступний алгоритм. На кожному кроці чисельного розв'язання системи диференціальних рівнянь (2) визначається потік  $\Phi$ , струм якоря  $i_{я}$ , кутова швидкість  $\omega$  двигуна. Для врахування сумарного струму  $i_{я} + i_{в.м.}$  необхідно визначити вихровий струм  $i_{в.м.}$  і його знак. Але зробити це неможливо. Параметри контуру вихрових струмів невідомі. На наш погляд визначити коефіцієнт  $k_{\Phi}$  можливо інакше. А саме, використовуючи криву намагнічування, визначаємо залежність коефіцієнта  $k_{\Phi}$  від магнітного потоку  $\Phi$ . В подальшому на кожному кроці чисельного розв'язання системи рівнянь (2) використовуємо цю функціональну залежність для визначення коефіцієнта  $k_{\Phi}$  за відомими значеннями магнітного потоку  $\Phi$ .

На рис. 3 приведена розрахована за допомогою загальної кривої намагнічування двигуна ЕД 118 АУ2 функція  $k_{\Phi} = f(\Phi)$ , що обрахована в 24 точках розподілених рівномірно (крива *kfn*). Ця функція, яка задана таблицею, була апроксимована поліномом третього порядку

$$k_{\Phi} = 7,977 \cdot 10^{-4} + 3,145 \cdot 10^{-3} \Phi - 2,662 \cdot 10^{-3} \Phi^2 + 5,723 \cdot 10^{-4} \Phi^3. \quad (3)$$

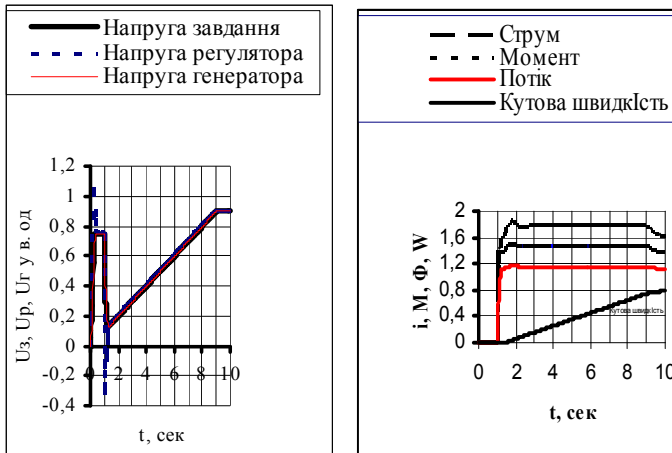


**Рис. 3.** Залежність коефіцієнта  $k_{\Phi}$  від потоку

*kfn* — розрахована і побудована за даними загальної кривої намагнічування; *kfn1* — за рівнянням апроксимуючого полінома.

Для чисельного розв'язання системи диференціальних рівнянь (2) потрібно проінтегрувати кожне із цих рівнянь, тобто Matlab-модель двигуна постійного струму з послідовним збудженням повинна мати три інтегратори. На вході кожного з них сума вхідних змінних, що відповідають доданкам правих частин кожного рівняння. Вихідною змінною кожного інтегратора, відповідно системі рівнянь (2), є потік  $\Phi$ , струм якоря  $i_a$ , кутова швидкість  $\omega$ . Для визначення коефіцієнта  $k_\Phi$  використовується блок обчислення математичних функцій Math Function. Вхідною змінною цього блоку є магнітний потік  $\Phi$ , вихідною —  $k_\Phi$ .

На рис. 4 приведено результати розрахунку перехідних процесів в контурі регулювання напруги генератора. Зміна напруги задатчика інтенсивності відбувається в три етапи. На першому етапі ( $0 \leq t \leq 1$  сек.) формуються напруги на затискачах генератора в режимі роботи без навантаження. Протягом часу  $0 \leq t \leq 0,3$  сек. напруга задатчика зростає за лінійним законом:  $u_{zi} = 25 \cdot t$ . В кінці цього проміжку часу його напруга досягає значення 7,5 В, напруга на затискачах регулятора — 80 В, а генератора — 750 В. На цьому інтервалі не має значення швидкість зростання напруги на всіх елементах. Для будь-яких навантажень двигунів потрібно, щоб в кінці цього інтервалу напруга генератора була 750 В. В подальшому ( $0,3 \leq t \leq 1$  сек.) напруга задатчика є незмінною.



**Рис. 4.** Результати розрахунків перехідних процесів пуску двигуна ЕД-118АУ2 з максимальним навантаженням  $G = 2000$  Нм

На другому етапі ( $1 \leq t \leq 1,2$  сек.) формується електромагнітний перехідний процес, на якому кутова швидкість двигуна практично дорівнює нулю. Формування перехідного процесу на цьому проміжку

часу не залежить від навантаження. На цьому етапі струм якірного кола досягає максимального значення. Протягом часу  $1 \leq t \leq 1,04$  сек. напруга задатчика інтенсивності зменшується за лінійним законом:  $u_{zi} = -90 \cdot t$  (відлік часу починається з початку цього інтервалу) від 7,5 В до 3,9 В. Напруга регулятора з великою швидкістю змінюється від 56 В до 24 В, а генератора — від 750 В до 620 В. Протягом часу  $1,04 \leq t \leq 1,2$  сек. напруги задатчика зменшується за лінійним законом:  $u_{zi} = -17 \cdot t$  від 3,9 В до 1,18 В, а регулятора зростає від -24 В до -7 В, а генератора — від 620 В до 180 В. Таким чином, навантаження всіх елементів контуру регулювання напруги залишаються в межах припустимих значень.

На третьому інтервалі ( $t \geq 1,2$  сек.) швидкість зростання напруги задатчика інтенсивності визначається динамічним моментом двигунів при пуску, і вона обмежена припустимим струмом двигунів. Тривалість цього процесу обмежена або завданням на кутову швидкість, або максимальною напругою.

Механічний перехідний процес пуску двигуна з навантаженням 2000 Нм. (рис. 4) триває 9 сек. Електромагнітний перехідний процес практично завершується через 0,06 сек. Струм, потік, момент двигунів, починаючи з цього часу, практично дорівнюють їх сталим значенням (відхилення не перевищують 5%). Максимальне перерегулювання для струму, потоку не перевищує 3%, для моменту — 4%.

Процес пуску двигунів без навантаження в системі без контурів регулювання кутової швидкості триває значно довше. Але при обмеженні динамічної складової струму (моменту) двигунів на рівні 800 А вже через три секунди кутова швидкість досягає значення 60 1/сек., що значно більше сталої швидкості двигунів при максимальному навантаженні у 2000 Нм. Через 10 сек. після початку пуску кутова швидкість складає 116 1/сек.

**Висновки:** 1. Розроблено алгоритм формування керуючого впливу — напруги задатчика інтенсивності, що дає змогу забезпечити швидкодію і мінімум часу на підйом чи спуск колони при наступних обмеженнях:  $i \leq I_{\max}$ ;  $u \leq U_{\max}$ .

Струм якоря при пуску зростає до сталого значення за 0,06 с. Перерегулювання струму та моменту не перевищують 4%.

2. Розроблено MATLAB-модель дослідження перехідних процесів пуску двигунів постійного струму з послідовним збудженням з урахуванням нелінійності магнітної системи двигунів та вихрових струмів.

3. Проведені дослідження перехідних процесів пуску двигунів бурової лебідки ЛБ 630 Е з максимальним навантаженням  $G = 2000$  Нм дозволили визначити максимальні навантаження елементів силового



електроприводу та напруги на затискачах керуючих приладів. Тривалість перехідного процесу пуску не перевищує 9 с. Максимальні струм, момент двигуна при пуску не досягають максимально припустимих значень. Швидкодія приводу досягається при зміні напруги керуючих елементів в межах припустимих значень.

### Список використаних джерел:

1. Карпенко В. Н. Концепция построения главного привода подъемного агрегата буровой установки 6 класса с лебедкой ЛБ-650Е / В. Н. Карпенко, В. А. Эсауленко, Н. С. Никорюк // Збірник наукових праць ДонНТУ. Серія «Електротехніка і енергетика». — Донецьк : ДонНТУ, 2007. — Випуск 7/128. — С. 279–284.
2. Карпенко В. М. Підіймальний агрегат бурової установки (винахід). — № 20610.
3. Карпенко В. Н. Формування керуючого впливу пуску двигуна постійного струму з послідовним збудженням / В. Н. Карпенко, Н. С. Никорюк // Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки : зб. наук. праць. — Кам'янець-Подільський : Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка, 2011. — Вип. 5. — С. 99–108.
4. Эсауленко В. А. Методика и алгоритм расчета переходных процессов в двигателе постоянного тока с последовательным возбуждением / В. А. Эсауленко, Н. С. Никорюк, А. И. Пурис // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. — КДПУ, 2006. — Ч. 2. — С. 137–139.
5. Стасенко В. М. Дослідження динамічних параметрів елементів талевої системи підіймального агрегату бурової установки 6 класу з лебідкою ЛБ-650Е / В. М. Стасенко, В. М. Карпенко, О. В. Карпенко // Проблеми нафтогазової промисловості : зб. наук. праць. — К., 2006. — Вип. 3. — С. 174–189.

A closed system of automatic control of voltage on the terminals of the DC motor with series excitation in transient modes of start is considered in the work. The developed algorithm of forming voltage Adjuster intensity, which allows to provide the performance and minimum time to climb or descend column, with the following restrictions

$$i \leq I_{\max} ; u \leq U_{\max} .$$

**Key words:** *drilling rig, the system of lifting the unit, the drive, the system of G-D, engine start, the voltage at the motor terminals control of voltage changes, intensity control device.*

Отримано: 14.02.2014