

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

АЛГОРИТМ ФОРМУВАННЯ ПЕРЕХІДНОГО ПРОЦЕСУ ПУСКУ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ НЕЗАЛЕЖНОГО ЗБУДЖЕННЯ ДО КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ ВИЩЕ ОСНОВНОЇ

У роботі розглянутий алгоритм формування керуючого впливу — напруги живлення обмотки збудження двигуна постійного струму з незалежним збудженням у перехідних режимах пуску в верхній частині діапазону керування при значеннях куткової швидкості вище основної.

Розроблений алгоритм формування напруги дозволяє отримати перехідний процес пуску за умови підтримки постійного значення струму якоря двигуна.

Ключові слова: *двигун постійного струму, пуск, напруга обмотки збудження, керування зміною напруги збудження, підтримка постійного струму якоря при регулюванні напруги збудження.*

Постановка проблеми та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Проблемами математичного моделювання і оптимізації за допомогою засобів обчислювальної техніки дизель-генераторних електроприводів у всьому світі займаються вже майже півстоліття. Але далеко не всі задачі, що сформульовані десятиліттями до цього, вдалося вирішити з необхідною точністю навіть для тягових приводів постійного струму [1].

Процес спорудження свердловини обертальним способом складається з повторюваних операцій: спуску колони бурильних труб з долотом (інструментом) у свердловину; руйнування породи на вибої; нарощування колони труб у міру поглиблення свердловини; підйому колони труб для заміни зношеного долота. Операції спуску (підйому) колони бурильних труб виконується за рахунок циклічного повторення двох операцій: підйом (спуск) гаку з навантаженням та спуск (підйом) гаку без навантаження. Для збільшення ступеня завантаження двигунів приводу спуск чи підйом гаку без навантаження раціонально виконувати на збільшених швидкостях. При використанні в якості електропривода лебідки приводних двигунів постійного струму з незалежним збудженням використовується двозонне регулювання куткової швидкості [2, с. 64—72]. Частина повного діапазону регулювання до номінальної (основної) швидкості забезпечується за рахунок зміни напруги на якорі від нуля до номінального значення при

номінальному потоку збудження. Регулювання в верхній частині діапазону при значеннях швидкості вище основної здійснюється за рахунок впливу на потік при постійній напрузі на якорі двигуна або ЕРС двигуна. Використання двозонного керування доцільно у тих випадках, коли момент навантаження механізму на великих швидкостях менше ніж на швидкостях нижче основної. У цьому випадку встановлена потужність двигуна менше у порівнянні з потужністю двигуна, що забезпечує увесь діапазон регулювання кутової швидкості за рахунок зміни напруги при постійному потоку збудження.

В замкнених системах керування швидкості перехід від режиму регулювання напруги якоря до режиму регулювання потоку збудження забезпечується у наступний спосіб. На швидкостях вище основної за допомогою регулятора, що впливає на кепло збудження, підтримується рівність ЕРС двигуна номінальному значенню. Використовувані системи двозонного керування включають в себе дві взаємозалежні системи: регулювання напруги на затискачах якоря та регулювання напруги на затискачах обмотки збудження. Остання система регулювання є нелінійною з наступних причин: момент двигуна M_d визначається як добуток струму та потоку, ЕРС двигуна e_d визначається як добуток струму якоря та кутової швидкості, контур струму збудження є нелінійним в наслідок нелінійності кривої намагнічування. Для зменшення похибки регулювання струму збудження в цих системах є бажаним визначення закону зміни керуючого впливу — напруги на затискачах обмотки збудження при регулюванні кутової швидкості у другій зоні. Приблизно половину часу роботи приводу при спуску чи підйомі бурової колони складає робота без навантаження та випадкової його зміни. Для спрощення системи керування на цьому етапі взагалі може бути використана розімкнена система керування, вхідним завданням для якої є напруга регулятора обмотки збудження. Тому актуальною є проблема визначення алгоритму формування напруги живлення на затискачах обмотки збудження при регулюванні кутової швидкості у другій зоні з обмеженнями на струм якоря двигуна.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Формування перехідного процесу в системах високої керованості, заснованих на регулюванні напруги в колі якоря двигуна постійного струму, дозволяє формувати оптимальні перехідні процеси [3; 4]. Запропонований алгоритм формування керуючого впливу — зміни напруги на затискачах якоря двигуна не дозволяє формувати напругу обмотки збудження при керуванні процесом пуску в другій зоні.

Постановка завдання. В роботі поставлені наступні задачі.

1. Розробити принцип формування керуючого впливу — зміни напруги живлення на затискачах обмотки збудження двигунів пос-

тійного струму з незалежним збудженням при керуванні процесом пуску у верхній частині діапазону кутової швидкості з незмінними напругою та струмом якоря двигуна.

2. Розробити MATLAB — модель дослідження перехідних процесів пуску двигунів постійного струму з незалежним збудженням;
3. Провести дослідження перехідних процесів пуску двигунів і визначити навантаження елементів силового електроприводу.

Виклад основного матеріалу дослідження. На рис. 1 приведена схема увімкнення двигуна постійного струму з незалежним збудженням.

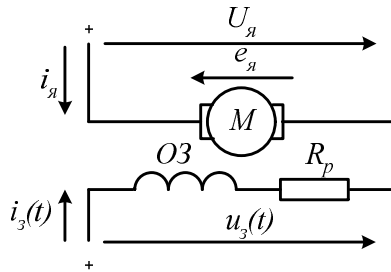


Рис. 1. Схема увімкнення двигуна постійного струму з незалежним збудженням

де M — двигун, $OЗ$ — обмотка збудження двигуна, R_p — додатковий опір обмотки збудження, $U_я$ — напруга живлення обмотки якоря, $e_я$ — ЕРС обмотки якоря, $u_3(t)$ — напруга живлення обмотки збудження, $i_я$ — струм якоря, $i_3(t)$ — струм обмотки збудження.

Рівняння, що визначають перехідні процеси пуску двигуна постійного струму з незалежним збудженням (1):

$$\begin{cases} U_я = k\Phi\omega + i_я R_я + L_я \frac{di_я}{dt}; \\ U_3 = i_3 R_3 + L_3 \frac{di_3}{dt}; \\ M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}, \end{cases} \quad (1)$$

де Φ — магнітний потік ω — кутова швидкість, k — конструктивна стала, $R_я$, R_3 — відповідно опори обмоток якоря та збудження, $L_я$, L_3 — індуктивності розсіювання обмоток якоря та збудження, J — сумарний момент інерції механічної частини приводу, M — момент двигуна постійного струму з незалежним збудженням, M_c — момент опору.

При розгляді перехідного процесу пуску насичення магнітної системи будемо рахувати у наступний спосіб (рис. 2).

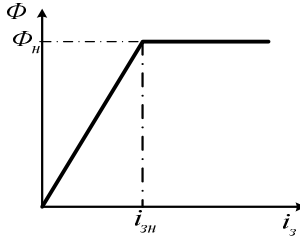


Рис. 2. Апроксимуюча крива намагнічування двигуна

де Φ_n — номінальний потік, i_{zn} — номінальний струм збудження двигуна.

Якщо кутова швидкість $\omega > \omega_0$ (ω_0 — кутова швидкість режиму ідеального холостого ходу), то в системі рівнянь (1) момент M та ЕРС двигуна e_y , визначаються за наступними формулами:

$$M = k\Phi i_y = kk_\Phi i_z i_y, \quad e_y = k\Phi\omega = kk_\Phi i_z \omega,$$

$$\text{де } k_\Phi = \frac{\Phi_n}{i_{zn}}.$$

Розглянемо умови пуску двигуна до кутової швидкості вище основної ($\omega \geq \omega_0$) з наступними початковими умовами: $t = 0_+$, $i_y = I_{noch}$,

$\omega = \omega_{noch}$. При пуску двигуна перша похідна струму якоря $\frac{di_y}{dt} = 0$,

тобто струм якоря повинен залишатися незмінним $i_y = I_{noch} = I_{const}$.

З урахуванням цих умов пуску останнє рівняння системи рівнянь (1) можливо записати у такий спосіб:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} \left(\frac{U_y - I_{const} R_y}{\omega} I_{const} - M_c \right) = \frac{1}{J} \left(\frac{C}{\omega} - M_c \right), \quad (2)$$

де $C = (U - I_{const} R_y) I_{const}$ — електромагнітна потужність енергії, що передається до якоря двигуна. За допомогою цього рівняння з'являється можливість визначити кутову швидкість ω , момент $M = \frac{C}{\omega}$ та струм обмотки збудження $i_z = \frac{M}{kk_\Phi I_{const}}$ двигуна за умови пуску двигуна, коли струм якоря двигуна залишається незмінним. Таким чином, може бути запропонований наступний алгоритм рішення цієї задачі.

1. Вирішити рівняння (2);

2. Визначити струм обмотки збудження $i_z = \frac{M}{kk_\Phi I_{const}} = B \cdot M$, де

1. Вирішити рівняння (2);

2. Визначити струм обмотки збудження $i_z = \frac{M}{kk_\Phi I_{const}} = B \cdot M$, де

$$B = \frac{1}{kk_\Phi I_{const}};$$

3. За допомогою другого рівняння системи рівнянь (1) визначити напругу на обмотці збудження

$$U_3 = i_3 R_3 + L_3 \frac{di_3}{dt}.$$

На рис. 3 зображена блок-схема алгоритму рішення цієї задачі.

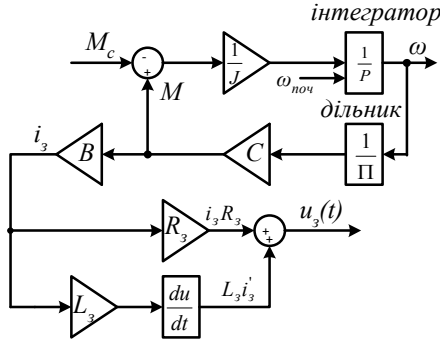


Рис. 3. Блок-схема алгоритму рішення задачі визначення напруги збудження двигуна постійного струму з незалежним збудженням при пуску двигуна до кутової швидкості вище основної ($\omega \geq \omega_0$)

Для апробації розробленого алгоритму формування перехідного процесу пуску двигунів постійного струму з незалежним збудженням була розроблена MATLAB-модель дослідження цього процесу. В моделі були використані параметри двигуна Д 818 з наступними номінальними даними: потужність $P_n = 185$ кВт, напруга живлення якоря $U_n = 440$ В, кутова швидкість $n_n = 440$ об/хв., струм якоря $I_n = 460$ А, струм збудження $I_{3n} = 10,2$ А, момент інерції механічної частини електроприводу $J = 40$ кг·м², індуктивність якірного кола двигуна $L_{я} = 0,00127$ Гн, індуктивність обмотки збудження $L_3 = 43,73$ Гн. На рис. 4 приведені розраховані у відносних одиницях криві залежності струму збудження $i_{3*} = \frac{i_3}{I_{3n}}$ (крива 1) та напруги

живлення обмотки збудження $u_{3*} = \frac{u_3}{U_{3n}}$ (крива 2).

Для підтримки бажаного характеру зміни струму якоря двигуна на другому етапі розгону ($\omega \geq \omega_0$) напруга живлення обмотки збудження повинна практично стрибком змінитися від номінального значення ($U_{3n} = 440$ В) до 275 В. Для живлення обмотки збудження потрібно використовувати практично безінерційний керований випрямляч.

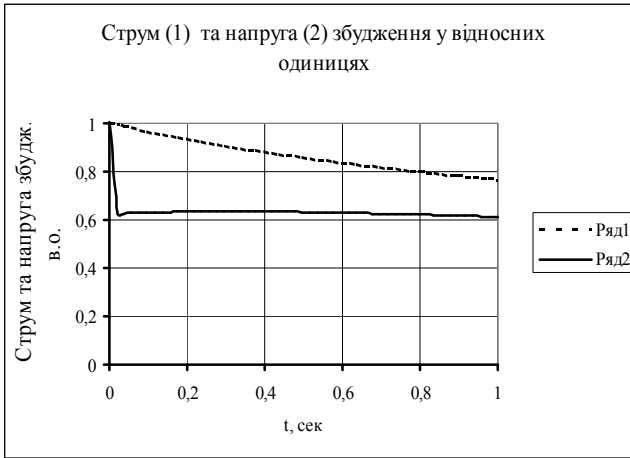


Рис. 4. Криві залежності струму збудження i_{3*} та напруги живлення обмотки збудження u_{3*} у відносних одиницях

Система диференціальних рівнянь пуску двигуна (3):

$$\begin{cases} \frac{di_y}{dt} = \frac{u_y}{L_y} - \frac{i_y R_y}{L_y} - \frac{kk_\phi i_z \omega}{L_y}, \\ \frac{di_z}{dt} = \frac{u_z(t)}{L_z} - i_z \frac{R_z}{L_z}, \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{kk_\phi}{J} i_z i_y - \frac{M_c}{J}. \end{cases} \quad (3)$$

Для розрахунку перехідних процесів пуску на другому етапі розгону двигуна розроблена MATLAB-модель дослідження цього процесу при наступних початкових умовах:

$$i_y(0_+) = i_{поч}, \quad i_z(0_+) = I_{зн}, \quad \omega(0_+) = \omega_{поч},$$

що визначаються струмом якоря, струмом збудження, кутовою швидкістю двигуна в кінці розгону двигуна в першій зоні.

На рис. 5, а приведені залежності струму якоря двигуна, що розраховані за допомогою цієї моделі. На першому етапі розгону в другій зоні (приблизно на протязі часу $0 \leq t \leq 0,35$ с) має місце коливальний перехідний процес. Максимальне перерегулювання складає приблизно 2,5%. Причому на початку цього процесу має місце зменшення струму якоря двигуна, що обумовлене лише за рахунок недостатнього зменшення противо-ЕРС якоря двигуна. А це, у свою чергу, можливо лише за рахунок неправильного розрахунку першої похідної струму збудження в момент часу $t = 0_+$.

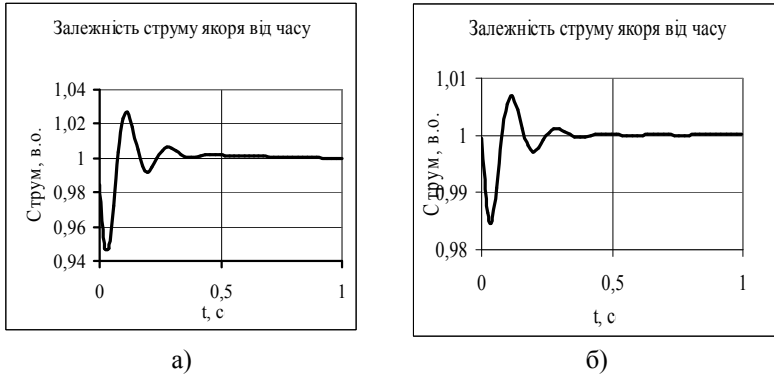


Рис. 5. Криві залежності струму якоря двигуна при пуску в верхній частині діапазону керування: а) за блок-схемою рис. 3, б) за блок-схемою рис. 6

Розглянемо алгоритм визначення напруги збудження, що виключає операцію диференціювання струму збудження. Перше рівняння системи (1) з урахуванням умов пуску ($i_a = I_{const}$, $\frac{di_a}{dt} = 0$) можливо записати

$$u_a = I_{const} R_a + k k_\phi i_z \omega.$$

Перетворення цього рівняння дозволяє отримати формулу для визначення струму збудження

$$i_z = \frac{u_a - I_{const} R_a}{k k_\phi} \cdot \frac{1}{\omega}.$$

Диференціювання останнього рівняння дозволяє отримати першу похідну струму збудження (4)

$$\frac{di_z}{dt} = -\frac{u_a - I_{const} R_a}{k k_\phi} \cdot \frac{1}{\omega^2} \cdot \frac{d\omega}{dt}. \quad (4)$$

На рис. 6 приведена блок-схема розрахунку напруги збудження двигуна постійного струму з незалежним збудженням, у якій розрахунок першої похідної виконується за допомогою формули (4), тобто виключається операція диференціювання. В цій блок-схемі коефіцієнтом підсилення D визначається наступною формулою

$$D = -L_3 \cdot \frac{u_a - I_{const} R_a}{k k_\phi}.$$

На рис. 5, б приведені розраховані криві залежності струму якоря двигуна при пуску, коли напруга збудження розрахована за допомогою алгоритму, що виключає диференціювання залежності струму збудження від часу. Характер перехідного процесу пуску практично не змінився.

Він має коливальний характер, але із суттєво меншим перерегулюванням. Максимальне перерегулювання складає приблизно 0,65 %.

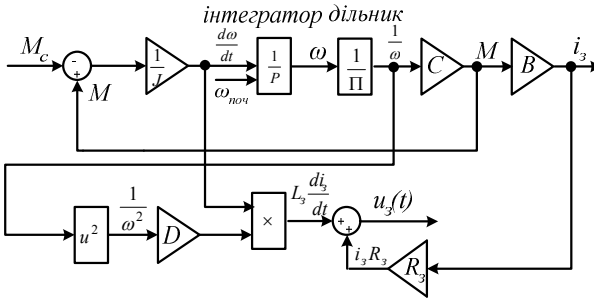


Рис. 6. Блок-схема алгоритму рішення задачі визначення напруги збудження, що виключає операцію диференціювання струму збудження

На рис. 7 приведені результати розрахунку залежності ЕРС самозбудження двигуна $L_3 \frac{di_3}{dt}$, що отримані: а) за допомогою диференціювання залежності струму збудження від часу, б) за алгоритмом, що запропонований формулою (4) і виключає операцію диференціювання.

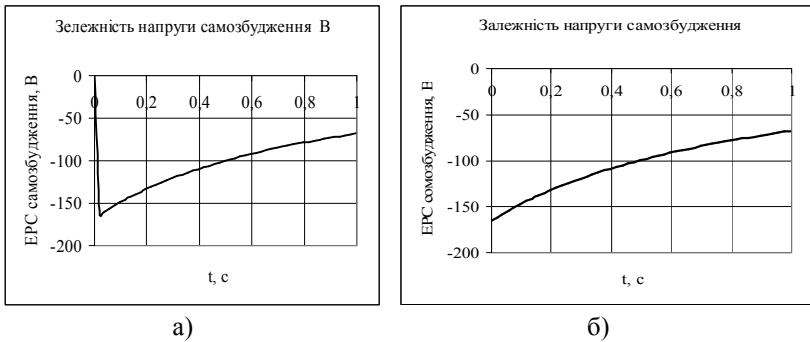


Рис. 7. Криві залежності ЕРС самозбудження $L_3 \frac{di_3}{dt}$:

а) за блок-схемою рис. 3, б) за блок-схемою рис. 6.

Порівняння цих залежностей свідчить, що ці розрахунки практично не відрізняються за виключенням єдиної точки для обох графіків, а саме, моменту часу $t_{0+} = 0$. Для цього моменту за алгоритмом

блок-схеми рис. 3 $L_3 \frac{di_3}{dt} = 0$, для рис. 6 — $L_3 \frac{di_3}{dt} = 165,8$ В. В усіх інших точках цих графіків для одного моменту часу різниця не пере-

вищує 1 В, тобто розрахунки не відрізняються. Це важливо з точки зору можливості реалізувати стрибок напруги при переході до формування перехідного процесу в другій зоні. Практично безінерційні регулятори напруги не дозволять миттєво змінити напругу збудження. Тобто, затримка в часі з визначенням напруги збудження, як і затримка у формуванні напруги керованими випрямлячами не приводить до суттєвого збільшення перерегулювання.

Висновки

1. Розроблений алгоритм формування керуючого впливу (напруги на затискачах обмотки збудження двигунів постійного струму з незалежним збудженням), що забезпечує перехідний процес пуску двигуна в другій зоні (зоні послаблення магнітного потоку) із заданим струмом якорного кола і практично без перерегулювання. Перерегулювання по струму якоря двигуна не перевищує 1%.
2. Розроблена MATLAB-модель дослідження перехідних процесів пуску двигунів постійного струму з незалежним збудженням у другій зоні.
3. Проведені дослідження перехідних процесів пуску двигуна.

Список використаних джерел:

1. Коропец П. А. К вопросу оценки тяговых свойств привода локомотива. Повышение эффективности и качества работы электроподвижного локомотива / П. А. Коропец, Н. И. Горбунов // Межвузовский тематический сборник Ростовского института инженеров жел.-дор. тр-та. — 1984. — Вып. 176. — С. 21–29.
2. Башарин А. В. Управление электроприводами : учебное пособие для вузов / А. В. Башарин, В. А. Новиков, Г. Г. Соколовский. — Л. : Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. — 392 с.
3. Карпенко В. М. Формування керуючого впливу пуску двигуна постійного струму з послідовним збудженням / В. М. Карпенко, М. С. Нікорюк // Збір. наук. праць. Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки. — Кам'янець-Подільський : Кам'янець-Подільський національний університет ім. Івана Огієнка, 2011. — Вип. 5 — С. 99–108.
4. Нікорюк М. С. Розробка алгоритму формування керуючого впливу системи автоматичного керування електропривода бурової лебідки ЛБ 650 Е / М. С. Нікорюк, В. О. Есауленко, В. М. Карпенко // Збір. наук. праць. Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки. — Кам'янець-Подільський : Кам'янець-Подільський національний університет ім. Івана Огієнка, 2012. — Випуск 7. — С. 155–165.

In article is considered the algorithm of forming of control action — field voltage of motor of direct-current with independent excitement in transient behaviors of starting in overhead part of management range at the values of speed higher basic.

The worked out algorithm of forming of voltage allows to get the transient of starting on condition of support of permanent value of current of anchor of motor.

Key words: *motor of direct current, start, electric voltage of excitation winding, controlled voltage start, voltage control, field current regulation.*

Отримано: 27.03.2013

УДК 519.6

О. О. Ситник*, канд. техн. наук,
С. Ю. Протасов*, канд. техн. наук,
В. А. Федорчук**, д-р техн. наук

* Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси,

** Кам'янець-Подільський національний університет
імені Івана Огієнка, м. Кам'янець-Подільський

ІНТЕГРАЛЬНІ МАКРОМОДЕЛІ ДИНАМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

У статті розглядаються питання науково-технічної задачі розвитку методу моделювання динамічних об'єктів на основі інтегральних макромоделей.

Ключові слова: *інтегральна макромодел, диференціальне рівняння, динамічні характеристики.*

Вступ та постановка задачі. Дослідження багатьох явищ і об'єктів шляхом побудови і вивчення їх математичних моделей набуло все більшого розповсюдження, охоплюючи різноманітні напрямки в технічних науках таких, як електротехніка, зв'язок, будівельна механіка, акустика, гідравліка, пневматика, пневмоніка, автоматика, теплотехніка тощо. Характерною особливістю сучасних динамічних об'єктів у техніці є висока складність, внаслідок чого їх математичні моделі, як правило, мають високу розмірність, що в багатьох випадках розв'язування практичних задач призводить до труднощів отримання якісних і кількісних результатів [1]. Ці труднощі найбільш притаманні задачам моделювання об'єктів з розподіленими параметрами, для математичного опису яких застосовуються диференціальні рівняння з частинними похідними, які відносяться до найбільш складних видів математичних моделей [2]. Задача побудови та числової реалізації ефективних динамічних моделей об'єктів з розподіленими параметрами додатково ускладнюється в тих розповсюджених випадках, коли модель «вбудовується» в діючі системи керування, контролю або діагностування і повинна враховувати необхідність функціонування в реальному часі.