

УДК 62-523.2

Михайлова Л.М.*канд. техн. наук, доцент***Камишлов В.Г.***канд. техн. наук, доцент***Дубік В.М.***канд. техн. наук, доцент***Горбовий О.В.***асистент***E-mail:** *vmdubick@gmail.com**Кафедра енергетики та електротехнічних систем в АПК
Подільський державний аграрно-технічний університет
Кам'янець-Подільський, Україна*

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В СИСТЕМАХ ПІДПОРЯДКОВАНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ (Е.Р.С.) ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ІЗ ЗАДАТЧИКАМИ ІНТЕНСИВНОСТІ

Анотація

В даній роботі надана методика розрахунку перехідних процесів в технічно оптимальних [2] за швидкістю (е.р.с.) системах із задатчиками інтенсивності при керуючих діях в електроприводах постійного струму. Всебічний аналіз динамічних систем приведений за допомогою диференційних рівнянь, порядок яких відповідає порядку диференційних рівнянь, якими описуються відповідні системи. Причому автори виходять з того, що аналітичні розрахунки систем автоматичного керування дозволяють читачам отримати більш повну інформацію про перехідні процеси в цих системах.

Приведені аналітичні залежності для всіх розглянутих в роботі систем керування електроприводами постійного струму. При дослідженні систем високого порядку по спрощеним диференційним рівнянням можуть бути допущені помилки при розрахунку таких параметрів системи як величина максимуму та швидкості наростання якорного струму, при виборі встановленої потужності перетворювачів і, зокрема, їх напруг. При більш поглиблених дослідженнях, пов'язаних із формуванням діаграм струму якоря, а також при розрахунку зрівнювального струму в залежних системах керування. Також похибки можуть досягнути великих величин, так як у цих випадках використовують похідні високих порядків від головної функції.

Ключові слова: *автоматичне керування; електропривод; перетворювач; регулятор; задатчик інтенсивності.*

Вступ. Велика кількість робочих механізмів, працюючих в повторно-короткочасному режимі, подають вимоги до електроприводу - малий час перехідних процесів. В таких випадках необхідно вибирати тип приводу, систему керування та параметри цієї системи так, щоб перехідні процеси були оптимальні по швидкодії з урахування вимог, що подаються як з боку електродвигуна, так і з боку робочого механізму. В даній роботі ставиться завдання обмежити струм якоря за час пуску та гальмування (реверсу) електродвигуна. З цією метою на вхід системи управління встановлюється задатчик інтенсивності. В зв'язку з цим в роботі показано порядок розрахунку перехідних процесів у вказаних режимах при наявності на вході задатчика інтенсивності. В статі також ставиться та розв'язується проблема, пов'язана з мінімізацією похибок при розрахунку перехідних процесів.

Аналіз останніх дослідження та публікацій. Багатоконтурні системи підпорядкованого управління електроприводами постійного струму живляться від електромеханічного генератора або тиристорного перетворювача.

Впровадження в виробництво систем підпорядкованого управління базується на використанні технічно-оптимальних структур. Недивлячись на те, що методика розрахунку статичних параметрів таких систем існує, але поглибленого аналітичного дослідження перехідних процесів в таких системах немає [6, 7, 8, 9, 18].

Ця проблема цікава та привабила увагу багатьох відомих вчених таких як Кесслер К., Фроєр Ф., Оскетер Р. та докторів технічних наук як Чилікін М.Г., Бичков В.П., Ключев В.І., Слежановський О.В., Ільніцький М.Ф. та багато інших дослідників [1, 2, 10, 11, 12, 16, 20]

Мета. На основі проведених нами досліджень з'явилась можливість розв'язати слідуєчі питання:

1. Досліджувати перехідні процеси в системах підпорядкованого управління електроприводами постійного струму при обмеженні похідних вихідної величини.
2. Розрахувати похибки, що припускаються при дослідженні систем високого порядку по спрощеним диференційним рівнянням.

Результати. Необхідність обмеження в системах підпорядкованого регулювання першої похідної вихідної величини швидкості (е.р.с.) двигуна, тобто динамічної складової струму якоря, виникає тоді, коли на систему подається великий сигнал керування (пуск, гальмування, реверс двигуна) [1, 13, 14, 15].

В цьому випадку при відсутності вказаного обмеження в розглянутих в статті системах керування струм двигуна досягає надмірно великих значення, що недопустимо за умови комутації. З вказаною методикою в системах керування необхідно застосувати пристрій, за допомогою якого можливо встановлювати потрібну величину динамічної складової струму двигуна, тобто потрібну інтенсивність перебігання перехідного процесу. Звичайно в якості такого пристрою застосовується задатчик інтенсивності, на вхід якого подається постійний за величиною сигнал $U_{вх}(t)$, а з виходу знімається сигнал $U_{зд.п}(t)$ (рис.1.), який змінюється по прямолінійно-зростаючому закону на протязі всього перехідного процесу, по закінченні якого сигнал з виходу задатчика залишається на постійному рівні. Вихідна напруга такого задатчика інтенсивності подається на вхід технічно-оптимізованих систем підпорядкованого регулювання, структурні схеми яких наведені на рис.2 та рис.3. На рис.2 наведені статична та астатична системи УТВ-Д, а на рис.3 - системи Г-Д.

Позначення на обох рисунках:

- постійні часу: T_r - обмотки збудження генератора, T_j - якірного кола перетворювач-якір двигуна, T_m - електромеханічна, T_1 - некомпенсована, мала;
- передаточні функції регуляторів: $F_{pm}(p)$ - напруги перетворювача, $F_{pt}(p)$ - регулятора струму, $F_{pc}(p)$ - швидкості двигуна, $F_{pc1}(p)$ - додаткового регулятора швидкості в астатичній системі керування;
- коефіцієнти: підсилювання тиристорного K_n та електромагнітного K_r перетворювачів, K_n , K_r , K_c - зворотних зв'язків по напрузі, струму та швидкості;
- сигнали, діючі на систему, зовнішні: по керуванню $U_{ax}(p)$ та збудженню $I_c R_0(p)$;
- сигнали, діючі на систему, внутрішні: із виходів задатчика інтенсивності $U_{zi}(p)$, регуляторів швидкості $U_{pc1}(p)$ та $U_{pc}(p)$, регулятора струму $U_{pm}(p)$, регулятора напруги $U_{pn}(p)$, падіння напруги у якірному колі $I_j R_0(p)$, е.р.с. двигуна $e_{de}(p)$, яка одночасно являється вихідним сигналом системи.

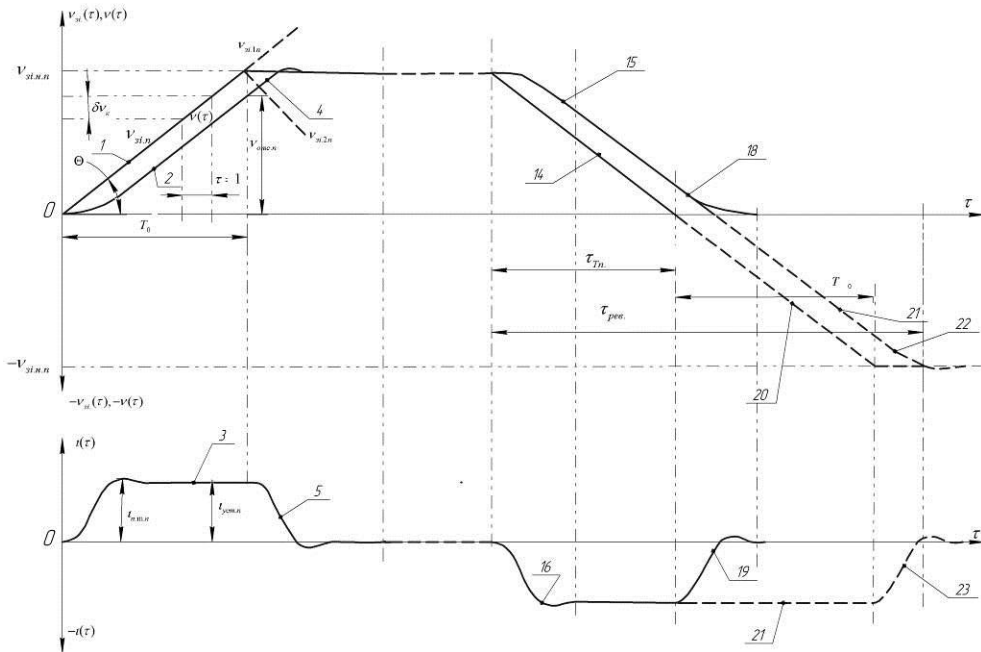


Рис. 1. Графіки перехідних процесів в системах підпорядкованого регулювання з задатчиком інтенсивності

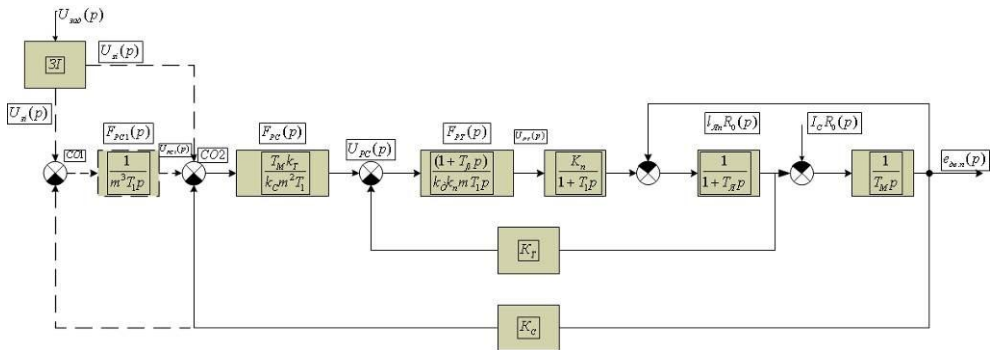


Рис. 2. Структурна схема системи підпорядкованого регулювання УТВ-Д

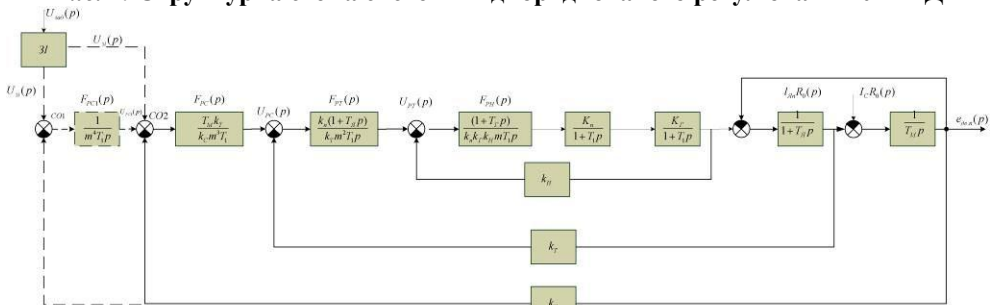


Рис. 3. Структурна схема системи підпорядкованого регулювання Г-Д

На рис.2 та 3 показано місце підключення задатчика інтенсивності ЗІ. При цьому, при аналізі роботи статичних систем сигнал $U_{zi}(p)$, що подається на вхід підсумовуючого органу CO2, а при аналізі роботи астатичних систем цей сигнал буде подаватись на вхід підсумовуючого органу CO1.

1. Пуск електродвигуна

Пуск електродвигуна здійснюється подачею на вхід ЗІ постійний за величиною сигнал $U_{вх}(p)$, що відповідає напрузі задатчика $U_{зад}(p)$, або у відносних одиницях

$$v_{зад}(p) = \frac{U_{зад}(p)}{K_c \square e_{об.н}}$$

де $e_{об.н}$ - номінальна е.р.с. двигуна.

Вихідна напруга ЗІ $U_{зи.н}(\tau)$ змінюється при цьому по лінійному закону з обмеженням по рівню сигналу завдання (рис.1, крива 1), або у відносних одиницях

$$v_{зи.н}(\tau) = \frac{U_{зи.н}(\tau)}{U_{зи.н.н}} = \frac{\tau}{T_0^*}, \text{ де}$$

$$\tau = \frac{t}{2^{n-1}T_1} - \text{відносний час; } T_1 - \text{мінімальна некомпенсована постійна часу; } n -$$

число постійних часу в системі регулювання, що, в свою чергу, визначають порядок диференційного рівняння системи;

$$T_0^* = \frac{T_0}{2^{n-1}T_1} - \text{відносний (} T_0 - \text{абсолютний) час зростання вихідної напруги } U_{зи.н}(\tau)$$

від нуля до номінального значення $U_{зи.н.н}(\tau)$, яка відповідає номінальній е.р.с. двигуна.

Відомо, що диференційне рівняння системи підпорядкованого регулювання $n^{\text{го}}$ порядку можемо записати у вигляді [8].

$$v_n(p) \square N_n(p) = v_{зи.н}(p), \quad (1)$$

де $N_n(p) = N_{n-1}(p) \square 2^{n-1} \square T_{np} + 1$ - характеристичний поліном $n^{\text{го}}$ порядку; (2)

$$v_n(p) = \frac{e_{дв.н}(p)}{e_{дв.н.н}} = \frac{\omega_n(p)}{\omega_{н.н}} - \text{е.р.с. (швидкість) двигуна у відносних одиницях.}$$

Підставляючи зображення по Лапласу

$$v_{зи.н}(p) = \frac{1}{T_0 p^2}$$

в рівняння (1), отримуємо для режиму пуску

$$v_{п.н}(p) = \frac{1}{T_0 p^2 \square N_n(p)}$$

де $v_{п.н}$ - е.р.с. (швидкість) двигуна при пуску.

Застосовуючи теорему про інтегрування оригіналу, будемо мати

$$v_{п.н}(\tau) = \frac{1}{T_0^*} \left[A_0 + \int F_n(\tau) d\tau \right], \quad (3)$$

де A_0 - постійна інтегрування;

$F_n(\tau)$ - перехідна функція системи.

Так як $F_n(\tau) = 1 + \Delta F_n(\tau)$,

де $\Delta F_n(\tau)$ - вільна складова перехідного процесу функції $F_n(\tau)$,

$$\text{то } v_{п.н}(\tau) = \frac{\tau + A_0}{T_0^*} + \frac{1}{T_0^*} \int \Delta F_n(\tau) d\tau \quad (4)$$

Із теорії лінійних диференційних рівнянь відомо, що частка виду $(\tau + A_0)/T_0^*$ визначається нульовим коренем кратності $K_i=2$ характеристичного рівняння. Тому застосовуючи теорему про вирахування, отримаємо

$$\lim_{p \rightarrow 0} \frac{d}{dp} \left[\frac{e^{pt}}{T_0 N_n(p)} \right] = \frac{t}{T_0} - \frac{2^{n-1} T_1}{T_0}$$

або у відносних одиницях

$$\lim_{q \rightarrow 0} \frac{d}{dq} \left[\frac{e^{qt}}{T_0^* N_n(q)} \right] = \frac{\tau}{T_0^*} - \frac{1}{T_0^*}$$

де $q=2^{n-1} T_1 p$ - нормований параметр.

Звідси слідує, що $A_0=-1$, а рівняння (4) приймає вигляд

$$v_{п.н}(\tau) = \frac{\tau - 1}{T_0^*} + \frac{1}{T_0^*} \int \Delta F_n(\tau) d\tau \quad (5)$$

Тоді перехідні функції зміни е.р.с. (швидкості) двигуна при розгоні із задатчиком інтенсивності (рис.1, крива 2), будуть визначені слідуючими рівняннями.

Для статичної системи УТВ-Д:

$$v_{п.з}(\tau) = \frac{1}{T_0^*} \left[\tau - 1 + \frac{1}{2} e^{-2\tau} + \frac{1}{2\sqrt{3}} e^{-\tau} (\sin \sqrt{3}\tau + \sqrt{3} \cos \sqrt{3}\tau) \right] \quad (6)$$

Для статичної системи Г-Д:

$$v_{п.а}(\tau) = \frac{1}{T_0^*} \left\{ \tau - 1 + \frac{1}{2} e^{-2\tau} [2 \cos 2\tau + (1 + 2\tau) \sin 2\tau] \right\} \quad (7)$$

Для астатичної системи УТВ-Д рівняння швидкості (е.р.с.) буде аналогічно рівнянню (7).

Для астатичної системи Г-Д:

$$v_{п.з}(\tau) = \frac{1}{T_0^*} \left[\tau - 1 + 0,25e^{-4\tau} + 0,712e^{-1,5\tau} (\sin 1,76\tau + 1,03 \cos 1,76\tau) + 0,011e^{-4,49\tau} (1,68 \cos 5,25\tau - \sin 5,22\tau) \right] \quad (8)$$

Рівняння для динамічної складової струму якоря двигуна буде мати вигляд:

$$i_{п.н}(\tau) = \frac{i_{к.н}}{T_0^*} \cdot \frac{T_M}{2^{n-1} \cdot T_1} \cdot \frac{dv_{п.н}}{d\tau}, \quad (9)$$

де $i_{п.н}(\tau) = \frac{i_{п.н}}{I_n}$ - відносна величина струму двигуна при пуску;

$i_{к.н} = \frac{E_{0н}}{R_0 I_{н.н}}$ - відносна величина струму короткого замикання;

R_0 - опір кола двигун-перетворювач;

$I_{н.н}$ - номінальний струм двигуна;

$E_{0н}$ - е.р.с. ідеального холостого ходу двигуна.

Тоді перехідні функції струму якорю двигуна при пуску $i_{п.н}(\tau)$ із задатчиком інтенсивності (рис.1) буде визначеним слідуючим рівнянням:

Для статичної системи УТВ-Д

$$i_{п.з}(\tau) = \frac{i_{к.з}}{T_0^*} \cdot \frac{T_M}{4T_1} \left(1 - e^{-2\tau} - \frac{2}{\sqrt{3}} e^{-\tau} \sin \sqrt{3}\tau \right) \quad (10)$$

Для статичної системи Г-Д

$$i_{П.А}(\tau) = \frac{i_{К.А}}{T_0^*} \cdot \frac{T_M}{8T_1} \left\{ 1 + e^{-2\tau} \left[(2\tau - 1) \cos 2\tau - 2(\tau + 1) \sin 2\tau \right] \right\} \quad (11)$$

Для астатичної системи УТВ-Д рівняння струму аналогічно (11).

Для астатичної системи Г-Д

$$i_{П.С}(\tau) = \frac{i_{К.С}}{T_0^*} \cdot \frac{T_M}{16T_1} \left[1 - e^{-4\tau} + 0,147e^{-1,51\tau} (\cos 1,76\tau - 16,1 \sin 1,76\tau) - 0,054e^{-4,49\tau} (2,72 \cos 5,22\tau + \sin 5,22\tau) \right] \quad (12)$$

Аналіз рівнянь (10), (11), (12) показує, що струм двигуна в системі із задатчиком інтенсивності змінюється за таким же законом, що і е.р.с. (швидкість) його в системі без задатчика інтенсивності [19], тобто він зростає до деякого встановленого значення, яке визначається із рівнянь (10), (11), (12).

При $\tau = \infty$

$$i_{П.н.уст} = \frac{i_{К.н}}{T_0^*} \cdot \frac{T_M}{2^{n-1} \cdot T_1} = i_{К.н} \frac{T_M}{T_0} \quad (13)$$

Коли усталене значення струму $i_{П.н.уст}$ задано, то час T_0 визначається як:

$$T_0 = \frac{i_{К.н}}{i_{П.н.уст}} \cdot T_M = \frac{E_{0n}}{i_{П.н.уст} \cdot R_{0n}} T_M \quad (14)$$

Заданому усталеному значенню динамічного струму відповідає визначений кут нахилу характеристики інтенсивності, який дорівнює (рис.1).

$$\Theta_n = \arctg \frac{U_{зи.н.н}}{T_0^*} = \arctg \left(i_{П.н.уст} \frac{I_{н.н} R_{0n} K_c}{T_M} \right), \quad (15)$$

Із рівнянь (6), (7), (8) слідує, що як статичні так і астатичні системи керування опрацюють керуючий сигнал з відставанням за часом, тобто мають усталену похибку від керуючої дії.

Коли керуючий сигнал з виходу задатчика інтенсивності має перехідну функцію

$$\frac{U_{зи.н}}{U_{зи.н.н}}(\tau) = \frac{\tau}{T_0^*},$$

а усталений сигнал на вході:

$$v_{П.н}(\tau) = \frac{\tau - 1}{T_0^*},$$

то статична похибка при керуючій дії

$$\delta v_{П.н} = \frac{\tau}{T_0^*} - \frac{\tau - 1}{T_0^*} = \frac{1}{T_0^*} = \frac{2^{n-1} T_1}{T_0} \quad (16)$$

В момент часу T_0^* зупиняється зріст напруги задатчика інтенсивності. При цьому е.р.с. (швидкість) відсічки двигуна при пуску $v_{омс.П.н}(\tau)$ згідно рівнянь (6), (7), (8) буде дорівнювати

$$v_{омс.П.н} = 1 - \frac{1}{T_0^*} \quad (17)$$

З моменту часу $\tau = T_0^*$ швидкість (е.р.с.) двигуна буде змінюватись по іншому рівнянню. На ділянці обмеження вихідної напруги задатчика інтенсивності $v_{зи.н}(\tau)$ представимо як суму двох напруг $v_{зи.1.н}(\tau)$ та $v_{зи.2.н}(\tau)$ (рис.1, штрих-пунктирні лінії) з похідними:

$$\frac{\Delta v_{зи.1.н}(\tau)}{d\tau} = \frac{1}{T_0^*}; \quad \frac{\Delta v_{зи.2.н}(\tau)}{d\tau} = -\frac{1}{T_0^*}.$$

З моменту часу прикладання дії $v_{зи.2.н}(\tau)$ всі експоненціальні складові від дії $v_{зи.1.н}(\tau)$ практично затухли і тому можливо записати:

$$v_{п.о.н}(\tau) = v_{зи.н}(\tau) - \frac{1}{T_0^*} \int \Delta F_n(\tau) d\tau, \quad (18)$$

де $v_{п.о.н}(\tau)$ - швидкість (е.р.с.) двигуна на ділянці обмеження вихідної напруги задатчика інтенсивності при пуску двигуна.

З урахуванням того, що в момент часу T_0^* величина $v_{зи.н}=1$ швидкість (е.р.с.) двигуна $v_{п.о.н}(\tau)$ на ділянці обмеження вихідної напруги задатчика буде визначатися як:

$$v_{п.о.н}(\tau) = 1 - \frac{1}{T_0^*} \int \Delta F_n(\tau) d\tau, \quad (19)$$

Порівняння функції (5) та (19) показує, що для побудови кривих зміни швидкості (е.р.с.) двигуна на ділянці обмеження вихідної напруги $U_{зи.н}(\tau)$ достатньо підрахувати інтеграл від прирощення перехідної функції $\Delta F_n(\tau)$.

З урахуванням (19) перехідної функції $v_{п.о.н}(\tau)$ на ділянці обмеження напруги задатчика інтенсивності (рис. 1, крива 4), будуть визначені наступними рівняннями:

Для статичної системи УТВ-Д

$$v_{п.о.3}(\tau) = 1 - \frac{1}{2T_0^*} \left[e^{-2\tau} + e^{-\tau} \left(\cos \sqrt{3}\tau + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \sqrt{3}\tau \right) \right]. \quad (20)$$

Для статичної системи Г-Д

$$v_{п.о.4}(\tau) = 1 - \frac{1}{2T_0^*} \cdot e^{-2\tau} [2 \cos 2\tau + (1 + 2\tau) \sin 2\tau]. \quad (21)$$

Для астатичної системи УТВ-Д розрахунок кривої швидкості після відсічки можливо провести, використовуючи формулу (21).

Для астатичної системи Г-Д

$$v_{п.о.5}(\tau) = 1 - \frac{1}{2T_0^*} [0,25e^{-4\tau} + 0,712e^{-1,51\tau} (\sin 1,76\tau + 1,03 \cos 1,76\tau) + 0,011e^{-4,49\tau} (1,68 \cos 5,22\tau - \sin 5,22\tau)] \quad (22)$$

Рівняння швидкості (е.р.с.) на ділянці обмеження вихідної напруги задатчика інтенсивності можливо отримати також при розв'язанні диференційного рівняння $N_n(p)$ при початкових умовах:

$$v_{п.о.н}(\tau) = 1 - \frac{1}{T_0^*}; \quad \frac{dv_{п.о.н}(\tau)}{d\tau} = \frac{1}{T_0^*}; \quad \frac{d^2v_{п.о.н}(\tau)}{d\tau^2} = \frac{d^3v_{п.о.н}(\tau)}{d\tau^3} = 0.$$

Динамічна складова струму якоря двигуна на ділянці обмеження напруги задатчика інтенсивності $i_{п.о.н}(\tau)$ буде рівна:

$$i_{п.о.н}(\tau) = \frac{i_{к.н} T_M}{T_0^* 2^{n-1} T_1} \cdot \frac{dv_{п.о.н}(\tau)}{d\tau}, \quad (23)$$

Тоді з урахуванням (23) на ділянці обмеження напруги задатчика інтенсивності (рис. 1, крива 5), поведінка струму $i_{п.о.н}(\tau)$ буде визначена наступними рівняннями:

Для статичної системи УТВ-Д

$$i_{п.о.3}(\tau) = \frac{i_{к.3} T_M}{T_0^* 4T_1} \cdot \left(e^{-2\tau} + \frac{2}{\sqrt{3}} e^{-\tau} \sin \sqrt{3}\tau \right), \quad (24)$$

Для статичної системи Г-Д

$$i_{п.о.4}(\tau) = \frac{i_{к.4} T_M}{T_0^* 8T_1} \cdot e^{-2\tau} \cdot [2(\tau+1) \sin 2\tau - (2\tau-1) \cos 2\tau], \quad (25)$$

Для астатичної системи УТВ-Д можливо динамічну складову струму двигуна розрахувати використовуючи формулу (25). Для астатичної системи Г-Д

$$i_{п.о.5}(\tau) = \frac{i_{к.5} T_M}{T_0^* 16T_1} \cdot [e^{-4\tau} - 0,147e^{-1,51\tau} (\cos 1,76\tau - 1,61 \sin 1,76\tau) + 0,054e^{-4,49\tau} (2,72 \cos 5,22\tau + \sin 5,22\tau)] \quad (26)$$

Із формул (24) ÷ (26) бачимо, що розрахунок динамічного струму після відсічки також визначається перехідною функцією $\Delta F_n(\tau)$.

2. Гальмування та реверс електродвигуна.

Процес гальмування двигуна здійснюється шляхом зняття, або зміни знака (при реверсі) сигналу завдання. Вихідна напруга задатчика інтенсивності при цьому спадає по лінійному закону (рис.1, крива 4),

$$v_{3i.n}(\tau) = v_{3ад.н} - \frac{\tau}{T_0^*} \cdot \quad (27)$$

Зображення швидкості (е.р.с.) двигуна $v_{T.n}(p)$ з урахуванням (1) та (2) нульових початкових умов можливо отримати з наступного виразу:

$$v_{T.n}(p) \cdot N_n(p) = v_{3i.n}(p) - \frac{\tau}{T_0^*}(p) + v(0) \cdot 2^{n-1} \cdot T_{II} \cdot N_{n-1}(p), \quad (28)$$

де $v_{T.n}(p)$ зображення швидкості (е.р.с.) двигуна при гальмуванні на ділянці лінійного спадання вихідної напруги задатчика інтенсивності в системі $n^{\text{го}}$ порядку; $v(0)$ - початкове значення швидкості (е.р.с.).

Так як $v_{3i.n} = v(0)$, а $v_{3i.n}(p) = v(0)/p$, то із (2) слідує що:

$$2^{n-1} \cdot T_1 \cdot N_{n-1}(p) = \frac{N_n(p) - 1}{p},$$

$$\text{то } v_{T.n}(p) \cdot N_n(p) = \frac{v(0)}{p} N_{n-1} - \frac{\tau}{T_0^*}$$

звідки

$$v_{T.n}(\tau) = v(0) - \left[\frac{\tau - 1}{T_0^*} + \frac{1}{T_0^*} \int \Delta F_n(\tau) d\tau \right], \quad (29)$$

Коли розгін двигуна здійснюється до номінальної швидкості (е.р.с.), то $v(0) = 1$, тоді:

$$v_{T.n}(\tau) = 1 - \left[\frac{\tau - 1}{T_0^*} + \frac{1}{T_0^*} \int \Delta F_n(\tau) d\tau \right], \quad (30)$$

Цим рівнянням скористуємось для визначення перехідних процесів гальмування при зниженні напруги задатчика інтенсивності (рис.1, крива 15 суцільна), для систем $n^{\text{го}}$ порядку.

Для статичної системи УТВ-Д

$$v_{T.3}(\tau) = 1 - v_{п.3}(\tau) = 1 - \frac{1}{T_0^*} \left[\tau - 1 + \frac{1}{2} e^{-2\tau} + \frac{1}{2\sqrt{3}} e^{-\tau} (\sin \sqrt{3}\tau + \sqrt{3} \cos \sqrt{3}\tau) \right], \quad (31)$$

Для статичної системи Г-Д

$$v_{T.4}(\tau) = 1 - v_{п.4}(\tau) = 1 - \frac{1}{T_0^*} \left\{ \tau - 1 + \frac{1}{2} e^{-2\tau} [2 \cos 2\tau + (1 + 2\tau) \sin^2 \tau] \right\}, \quad (32)$$

Для астатичної системи УТВ-Д рівняння швидкості (е.р.с.) двигуна аналогічно до (32).

Для астатичної системи Г-Д

$$v_{T.5}(\tau) = 1 - v_{п.5}(\tau) = 1 - \frac{1}{T_0^*} \left[\tau - 1 + 0,25e^{-4\tau} + 0,712e^{-1,5\tau} (\sin 1,76\tau + 1,03 \cos 1,76\tau) + 0,011e^{-4,49\tau} (1,68 \cos 5,22\tau - \sin 5,22\tau) \right] \quad (33)$$

Динамічна складова струму $i_{T.n}(\tau)$ (рис.1, крива 16), визначається аналогічно з режимом пуску двигуна, але знак (напрямок) струму змінюється на зворотній.

$$i_{T.n}(\tau) = \frac{l_{К.н} T_M}{2^{n-1} T_0^*} \cdot \frac{dv_{T.n}(\tau)}{d\tau} = -\frac{l_{К.н} T_M}{2^{n-1} T_0^*} \cdot F_n(\tau), \quad (34)$$

Для статичної системи УТВ-Д

$$i_{T.3}(\tau) = -\frac{i_{K.3}T_M}{4T_0^*} \left(1 - e^{-2\tau} - \frac{2}{\sqrt{3}} e^{-\tau} \cdot \sin \sqrt{3}\tau \right), \quad (35)$$

Для статичної системи Г-Д

$$i_{T.4}(\tau) = -\frac{i_{K.4}T_M}{8T_0^*} \left\{ 1 + e^{-2\tau} \left[(2\tau - 1) \cos 2\tau - 2(\tau + 1) \sin 2\tau \right] \right\}, \quad (36)$$

Для астатичної системи УТВ-Д рівняння струму аналогічно до (35).

Для астатичної системи Г-Д

$$i_{T.4}(\tau) = -\frac{i_{K.5}T_M}{16T_0^*} \left[1 - e^{-4\tau} + 0,147e^{-1,51\tau} (\cos 1,76\tau - 1,61 \sin 1,76\tau) - 0,054e^{-1,5\tau} (2,72 \cos 5,22\tau + \sin 5,22\tau) \right] \quad (37)$$

Після зниження напруги з виходу задатчика інтенсивності до нуля швидкість (е.р.с.) двигуна $v_{T.0.n}(\tau)$ продовжує знижуватись до нуля (рис.1, крива 18).

Цей режим аналогічний відсічки напруги задатчика інтенсивності при пуску двигуна (рис.1), тому:

$$v_{T.0.n}(\tau) = \frac{1}{T_0^*} \int \Delta F_n(\tau) d\tau = 1 - v_{n.0.n}(\tau), \quad (38)$$

Для статичної системи УТВ-Д

$$v_{T.0.3}(\tau) = \frac{1}{2T_0^*} \left[e^{-2\tau} + e^{-\tau} \left(\cos \sqrt{3}\tau + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \sqrt{3}\tau \right) \right], \quad (39)$$

Для статичної системи Г-Д

$$v_{T.0.4}(\tau) = \frac{1}{2T_0^*} \cdot e^{-2\tau} \left[2 \cos 2\tau + (1 + 2\tau) \sin 2\tau \right], \quad (40)$$

Для астатичної системи УТВ-Д розрахунок кривої швидкості (е.р.с.) двигуна проводиться з використанням формули (40).

Для астатичної системи Г-Д

$$v_{T.0.5}(\tau) = \frac{1}{T_0^*} \left[0,25e^{-4\tau} + 0,712e^{-1,51\tau} (\sin 1,76\tau + 1,03 \cos 1,76\tau) + 0,011e^{-4,49\tau} (1,68 \cos 5,22\tau - \sin 5,22\tau) \right] \quad (41)$$

Динамічна складова струму $i_{T.0.n}(\tau)$ в даному режимі по аналогії з режимом після відсічки при пуску двигуна змінюється згідно рівнянню (рис.1, крива 19).

$$i_{T.0.n}(\tau) = -\frac{i_{K.n}T_M}{T_0^* 2^{n-1} T_n} \left[1 - F_n(\tau) \right], \quad (42)$$

Для статичної системи УТВ-Д

$$i_{T.0.3}(\tau) = -\frac{i_{K.3}T_M}{T_0^* 4T_n} \left(e^{-2\tau} + \frac{2}{\sqrt{3}} e^{-\tau} \sin \sqrt{3}\tau \right), \quad (43)$$

Для статичної системи Г-Д

$$i_{T.0.4}(\tau) = -\frac{i_{K.4}T_M}{T_0^* 8T_n} \cdot e^{-2\tau} \left[(2\tau + 2) \sin 2\tau - (2\tau - 1) \cos 2\tau \right], \quad (44)$$

Для астатичної системи УТВ-Д динамічна складова струму змінюється аналогічно (44).

Для астатичної системи Г-Д

$$i_{T.0.5}(\tau) = -\frac{i_{K.5}T_M}{T_0^* 16T_n} \left[e^{-4\tau} - 0,147e^{-1,51\tau} (\cos 1,76\tau - 1,61 \sin 1,76\tau) + 0,054e^{-4,49\tau} (2,72 \cos 5,22\tau + \sin 5,22\tau) \right] \quad (45)$$

Коли замість режиму гальмування здійснюється реверс двигуна, то вихідна напруга задатчика інтенсивності, знизившись до нуля, продовжує зростати (рис.1, крива 20) по тому же закону, з тим же темпом, але з протилежним знаком.

Е.Р.С. (швидкість) двигуна продовжує змінюватись згідно рівнянню (29) до нуля

(рис.1, крива 21). За час $\tau_{T,n}=T_0^*+1$ величина $v_{T,n}(\tau)=0$.

При дальшому збільшенні часу $\tau > \tau_{T,n}$ е.р.с. (швидкість) двигуна змінює свій напрям (реверс $v_{P,n}(\tau)$). Так як темп наростання е.р.с. (швидкості) двигуна не змінюється, то динамічна складова струму якоря продовжує залишатись постійною ($i_{P,n}(\tau)$) (штрих-пунктирні криві на рис.1. В кінці реверсу при досягненні задатчиком напруги відсічки (рис.1), починаючи з $\tau = 2T_0^*$, е.р.с. (швидкість) двигуна буде змінюватись згідно рівнянню (18) з урахуванням знаку (рис.1, крива 22, пунктир).

Динамічна складова струму $i_{P,n}(\tau)$ (рис.1, крива 23, пунктир) буде знижуватись до нуля згідно рівнянню (23) також з урахуванням знаку.

3. Про похибки, що припускаються при дослідженні систем високого порядку по спрощеним диференціальним рівнянням.

Синтез складних систем підпорядкованого регулювання зводиться до послідовного синтезу одноконтурних систем, якщо кожний внутрішній контур складної системи подати у вигляді аперіодичної ланки з постійною часу $m^{n-1}T_1$ (1 - номер контуру багатоконтурної системи починаючи із зовнішнього), яка приймається за некомпенсовану "малу" постійну часу наступного контуру.

В цьому випадку системі керування відповідає вироджений характеристичний поліном.

$$m^{n-1}T_1 p (m^{n-1}T_1 p + 1) + 1 = 0, \quad (47)$$

який легко отримується із повного

$$Nn(p) = \left\{ \left[(T_1 p + 1) m T_1 p + 1 \right] m T_1 p + 1 \right\} \dots m^{n-2} T_1 p + 1 \left\} m^{n-1} T_1 p + 1, \quad (48)$$

характеристичного поліному, якщо в останньому покласти

$$\left\{ \left[(T_1 p + 1) m T_1 p + 1 \right] \dots \right\} m^{n-3} T_1 p = 0, \quad (49)$$

Враховуючи, що вплив доданків характеристичного поліному (48), що вміщує ступінь P вище другої, незначне, дуже часто аналіз синтезуємої системи виконується за виродженим характеристичним рівнянням (47), корені якого

$$P_{1,2} = \frac{1}{m^{n-1}} \left[-\frac{1}{2T_1} \pm \sqrt{\frac{m-4}{m}} \right], \quad (50)$$

відрізняється від коренів характеристичного рівняння системи другого порядку на множник $\frac{1}{m^{n-2}}$. Якщо покласти $P = \frac{q}{m^{n-2}}$, то (50) перетвориться у вид:

$$q_{1,2} = -\frac{1}{2T_1} \pm \sqrt{\frac{m-4}{m}}, \quad (51)$$

звідки слідує, що множення коренів характеристичного рівняння на постійний множник рівнозначно зміні масштабу часу на величину, кратну цьому множнику.

Таким чином, про величину похибок, що припускається при дослідженні систем високих порядків по спрощеним диференціальним рівнянням (нищого порядку) можливо скласти уявлення завдяки порівнянню функції реальної системи з відповідними функціями системи другого порядку.

На рис. (4а, б) приведені криві похибок перерегулювання швидкості (е.р.с) двигуна $\delta \Delta v_{\text{макс}}$, струму якоря $\delta \Delta i_{\text{я,макс}}$, та максимального значення його похідної $\delta \Delta i'_{\text{я,макс}}$ в функції m , при заміні диференційного рівняння п'ятого порядку астатичної системи Г-Д із задатчиком інтенсивності диференціальним рівнянням другого порядку. При цьому криві рис.(4, а) відповідають керуючої дії, криві рис.(4, б) - режиму прикладання навантаження.

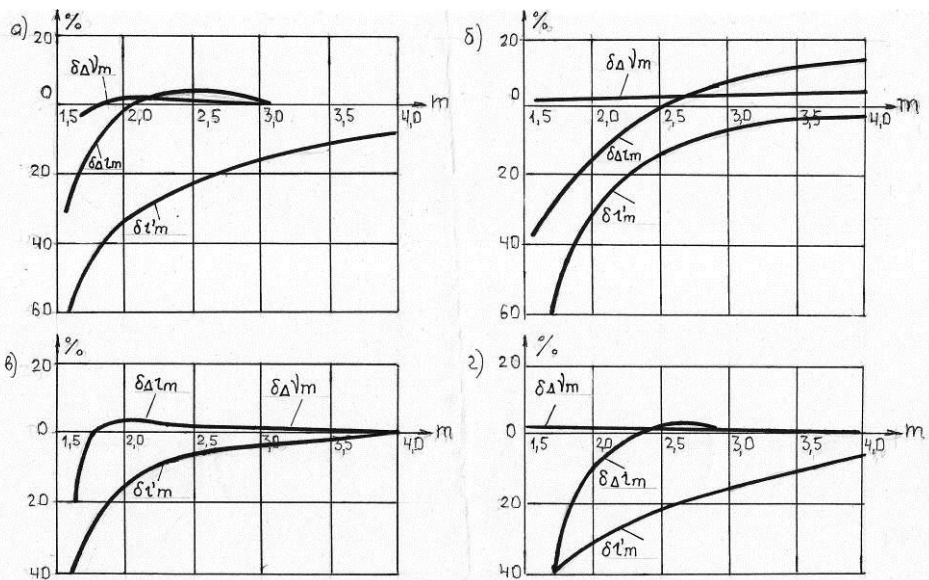


Рис. 4. Криві похибок при розрахунку системи вищого порядку диференційними рівняннями нижчого порядку

При побудові залежностей рис. 4а, б значення похибок вказаних координат визначились за слідуючими формулами:

$$\delta \Delta v_{\max} = \frac{\Delta v_{2\max} - \Delta v_{5\max}}{v_H} 100\% , \quad (52)$$

$$\delta \Delta i_{\text{я.макс}} = \frac{\Delta i_{\text{я.2макс}} - \Delta i_{\text{я.5макс}}}{i_{\text{я.уст.}}} 100\% , \quad (53)$$

$$\delta \Delta i'_{\text{я.макс}} = \frac{i'_{\text{я.2макс}} - i'_{\text{я.5макс}}}{i'_{\text{я.5макс}}} 100\% , \quad (54)$$

Із рис. 4а, б слідує, що похибка в перерегулюванні швидкості $\delta \Delta v_{\max}$ та струму якоря $\delta \Delta i_{\text{я.макс}}$ в режимі керування (рис. 4, а) та похибки в розрахунку максимального значення струму якоря при прикладанні навантаження (рис. 4, б) може досягати при досягненні декількох десятків відсотків. Похибка у визначенні максимального значення темпу зростання струму якоря $\delta \Delta i'_{\text{я.макс}}$ як при керуючій дії так і при збурюючій дії досягає особливо великих значень і навіть при $m=2$ і складає 30%, а зменшення m приводить до ще більшого її зростання.

Функція струму якоря двигуна та темп його зростання входять як складові частини в функцію напруги на вході перетворювача в системі УТВ-Д та в функцію напруги збудження генератора в системі Г-Д. При цьому в останньому випадку розрахунки по спрощеним диференційним рівнянням приводять до похибки, яка досягає при визначених співвідношеннях параметрів приводу 100% і більше. При аналогічних умовах великі помилки мають місце при дослідженні перехідних процесів в зрівнювальному контурі в реверсивних системах із узгодженим керуванням тиристорними групами. З подібними проблемами дослідник зустрічається при розв'язанні питань, пов'язаних з удосконаленням форми якірного струму, коли замість інтегрального задатчика інтенсивності застосовують задатчик типу ІІІ та ІІД.

Аналіз можливості вивчення динаміки складних систем по диференційним

рівнянням добре вивчених систем третього порядку показує, що й в цьому випадку, як це бачимо із рис. (4в, г), аналогічно на рис. (4а, б), похибка у визначенні темпу зростання струму якоря досягає значних величин. Так в режимі прикладання навантаження (рис. 4г) для випадку $m=2$ похибка складає 30%. Таким чином, коли динаміка вихідної координати складної системи з достатньою ступеню може бути досліджена по спрощеним диференціальним рівнянням, то похибка у визначенні динамічних параметрів систем, може досягати недопустимих, з точки зору раціонального вибору параметрів системи управління, значень.

Висновки і перспективи.

1. На основі даних з літературних джерел та знову отриманих висновків розроблена узагальнена методика аналізу перехідних процесів в системах технічно-оптимальної структури із задатчиком інтенсивності на вході.

2. В якості вихідної величини прийнята перехідна функція систем що досліджуються. Методика дозволяє на базі аналітичних розрахунків перехідних процесів під впливом, близьким до реального, проводити всебічний аналіз динамічних процесів системи.

3. Знайдені у загальному вигляді розв'язування характеристичних рівнянь для системи четвертого та п'ятого порядків є технічно-оптимальними перехідними процесами дозволили розробити методику, яка забезпечує достатню точність дослідження динаміки цих систем і дозволяє врахувати особливості технологічних процесів.

4. Аналіз складних систем автоматичного управління швидкодіючими електроприводами по спрощеним передавальним функціям або диференціальним рівнянням забезпечує необхідну точність дослідження динаміки внутрішніх координат систем.

Список використаних джерел

1. Kessler C. Regelungstechnik. *Heft*. 1960. № 6. P. 235-241.
2. Fröhr F. *Automatik*. 1967: Januar, P. 9-14.
3. Лернер А.Я., Розенман Е.А. Оптимальное управление. Москва : Энергия, 1970. 245 с.
4. Чистов В.П. Оптимальное управление электрическими приводами. Москва : Энергия, 1968. 240 с.
5. Пышкало В.Д. Оптимальные по быстродействию промышленные электроприводы. Москва : «Энергия», 1967. 200 с.
6. Фишбеин В.Г. Расчёт систем подчиненного регулирования вентиляного электропривода постоянного тока. Москва : «Энергия», 1972. 260 с.
7. Гарнов В.К., Рабинович В.Б., Вишневецкий Л.М. Унифицированные системы автоуправления электроприводами в металлургии. Москва : Металлургия, 1971. 345с.
8. Камышлов В.Г., Горбовой О.В., Камышлов В.В., Кунінін П.М. Техническая оптимизация переходных процессов в системах автоматического управления. *Збірник наукових праць ПДАТУ*. 2009. Вип.17, С. 245-247.
9. Чиликин М.Г., Бычков В.П., Камышлов В.Г., Полищук В.И., Масленников А.Р. Системы управления электроприводами постоянного тока с последовательной коррекцией : инструктивные указания по проектированию электротехнических установок. ГПИ «Тяжпромэлектропроект», 1967. № 11. 350 с.
10. Oekter R. Fortschritte bei der automatisierung mit einfachen Mitteln. *Regelungstechnik*, 1966. № 3, 15
11. Лебедев Е.Д., Неймарк В.Е., Пистрак М.Я., Слежановский О.В. Управление вентилями электроприводами постоянного тока. Москва : «Энергия», 1970. 149 с.
12. Frohr F. *Orttenburger. Technische regelstreckeng lieder Gleichstomantrieben*, Siemens A.G., 1971. 250 с.
13. De Voung D.R., Dolphin T.V. Recent Trends in Gold Mill Elektrikal Drive Systems. *Iron and steel Engineering*, 1966. № 9. С. 127.

14. Ruhe G, Spiegel W, Norutich R. Feldspeisungen mit Thyristoren in kontinuierlichen Walzenstrassen. *Walzenstrassen VEM. Energieelectronic und Antrieben*, 1966 8, 14-18.

15. Рудаков В.В., Мартикайнен Р.П. Синтез электроприводов с последовательной коррекцией. Москва : Энергия, 1972. 251 с.

16. Капунцов Ю.Д., Елисеев В.А., Ильяшенко Л.А. Электрооборудование и электропривод промышленных установок : учебник для энергетических специальностей вузов / Общ. ред. М.М.Соколов. Москва : Высшая школа, 1979. 359 с.

17. Шрейнер Р.Т. Системы подчиненного регулирования электроприводом. Часть 1, Екатеринбург : Урал гас. проф.-пед. ун-та, 1997. 279 с.

18. Воронин С.Г. Электропривод летательных аппаратов. Часть 2. Челябинск : ЮУр.ГУ, 2008, 115 с.

19. Камышлов В.Г., Дубик В.Н., Горбовой О.В., Кунинин П.М., Бобровский М.В. Подчиненные системы автоматического управления эл.движущей силой (скорости) эл. приводов постоянного тока. Lublin, RZESZOW, 2016. Vol. 18, № 5.

20. Булгаков В.М., Войтюк Д.Г., Адамчук В.В., Іванишин В.В. Науково-технічна політика в сільському господарстві. *Вісник аграрної науки*. 2007. № 3. С. 5-10.

21. Дубровін В.О. Войтюк Д.Г., Іванишин В.В. Ринок сільськогосподарської техніки в Україні. *Науковий вісник Національного аграрного університету*. Київ : НАУ. 2005. Вип. 80, ч. 1. С. 13–28.

22. Адамчук В.В., Булгаков В.М., Іванишин В.В. Про розробку і створення в Україні сільськогосподарських машин сучасного рівня. *Зб. наук. праць Вінницького націон. аграрн. ун-ту. Серія: Технічні науки*. 2012. Вип. 11. Т. 2 (66). С. 8–14.

23. Іванишин В.В. Розвиток та функціонування ринку технічних засобів для сільського господарства в Україні. *Економіка АПК*. 2011. № 3. С. 78-82.

Дата надходження статті до редакції: 16.03.2019

Рецензування 11.04.2019 Прийняття в друк: 27.06.2019

Myhailova L. M.

Associate Professor

Kamyshlov V. H.

Associate Professor

Dubik V. M.

Associate Professor

Horbovyi O. V.

Assistant Professor

E-mail: vmdubick@gmail.com

¹*State Agrarian and Engineering University in Podilya*

Kamianets-Podilskyi, Ukraine

INVESTIGATION OF TRANSIENTS IN SYSTEMS OF SUBORDINATE REGULATION OF SPEED OF AN ENGINE OF A DIRECT CURRENT WITH INTENSITY DETECTOR

Abstract

The study presents the method of calculation of transients in the technically optimal [2] at speed (e.m.f.) systems with intensity detectors for controlling actions in the direct current drives

A comprehensive analysis of the dynamical systems is given by differential equations, the order of which corresponds to the order of differential equations, which describe the corresponding systems.

Moreover, the authors proceed from the assumption that the analytical calculations of automatic control systems allow readers to get more complete information on the transients in these systems.

The analytical dependencies for all the DC drives considered in the work are provided.

In the study of high order systems, a simplified differential equation may allow errors in the calculation of such parameters of the system as the magnitude of the maximum and the rate of increase of anchor current, when selecting the installed power of the converters and, in particular, their voltages.

In more in-depth studies related to the formation of current diagrams of the anchor current, as well as in the calculation of the equalization current in dependent control systems.

Also, errors can reach large values, since in these cases derivatives of high orders from the main function are used.

Keywords: automatic control; electric drive; converter; regulator; intensity detector.

References

1. Kessler C. (1960). Regelungstechnik. *Heft*. № 6. P. 235-241.
2. Fröhr F. *Automatik* (1967). Januar, P. 9-14.
3. Lerner, A.Ja., Rozenman, E.A. (1970). *Optimal'noe upravlenie [Optimal management]*. Moskow : Jenergija. [in Russ.]
4. Chistov, V.P. (1968). *Optimal'noe upravlenie jelektricheskimi privodami [Optimum control of electric drives]*. Moskow : Jenergija. [in Russ.]
5. Pyskhalo, V.D. (1967). *Optimal'nye po bystrodejstviju promyshlennye jelektroprivody [Optimum speed industrial electric drives]*. Moskow : Jenergija. [in Russ.]
6. Fishbejn, V.G. (1972). *Raschjot sistem podchinennogo regulirovanija ventil'nogo jelektroprivoda postojannogo toka [Calculation of systems for subordinate regulation of a DC valve]*. Moskow : Jenergija. [in Russ.]
7. Garnov, V.K., Rabinovich, V.B., Vishneveckij, L.M. (1971). *Unificirovannye sistemy avtoupavljenija jelektroprivodami v metallurgii [Unified systems of automatic control of electric drives in metallurgy]*. Moskow : Metallurgija. [in Russ.]
8. Kamyshlov, V.G., Gorbovoj, O.V., Kamyshlov, V.V., & Kuninin, P.M. (2009). Tehniceskaja optimizacija perehodnyh processov v sistemah avtomaticheskogo upravlenija [Technical optimization of transients in automatic control systems]. *Zbirnik naukovih prac' PDATU, 17*, 245-247. [in Russ.]
9. Chilikin, M.G., Bychkov, V.P., Kamyshlov, V.G., Polishhuk, V.I., & Maslennikov, A.R. (1967). *Sistemy upravlenija jelektroprivodami postojannogo toka s posledovatel'noj korrekciej : Instruktivnye ukazanija po proektirovaniju jelektrotehniceskih ustanovok. GPI. Tjazhpromjelektroproekt, № 11*. [in Russ.]
10. Oekter, R. (1966). Fortschritte bei der automatisierung mit einfachen Mitteln. *Regelungstechnik, 3*, 15
11. Lebedev, E.D., Neimark, V.E., Pystrak, M.Ia., & Slezhanovskij, O.V. (1970). *Upravlenye ventyl'nymy jelektroprivodami postojannogo toka*. Moskow : Jenergija. [in Russ.]
12. Frohr F. *Orttenburger* (1971). Technische regelstreckeng lieder Gleichstomantrieben. Siemens A.G.
13. De Voung, D.R., Dolphin, T.V. (1966). Recent Trends in Gold Mill Elektrikal Drive Systems. *Iron and steel Engineering, 9*, 127.
14. Ruhe, G., Spiegel, W., & Norutich, R. (1966). Feldspeisungen mit Tyristoren in kentinuelichen Walzenstrassen. *Walzenstrassen VEM, Energieelectron und Antrieben, 8*, 122-134.
15. Rudakov, V.V., & Martykainen, R.P. (1972). *Sintez jelektroprivodov s posledovatel'noj korrekciej [Synthesis of electric drives with sequential correction]*. Moskow : Jenergija. [in Russ.]
16. Sokolov, M.M. (Ed.), Kapuntsov, Yu.D., Elyseev, V.A., Yliashenko, L.A., & Il'jashenko, L.A. (1979). *Jelektrooborudovanie i jelektroprivod promyshlennyh ustanovok [Electrical equipment and electric drive of industrial installations]*. Moskow : Vysshaja shkola. [in Russ.]
17. Shreiner, R.T. (1997). *Sistemy podchinennogo regulirovanija jelektroprivodom. Chast 1 [Subordinate control systems with electric drive. Part 1]*. Ekaterynburh : Ural has. prof.-ped. un-ta.
18. Voronyn, S.H. (2008). *Jelektroprivod letatel'nyh apparatov. Chast 2 [Electric aircraft. Part 2]*. Cheliabynsk : YuUr.HU. [in Russ.]
19. Kamyshlov, V.G., Dubik, V.N., Gorbovoj, O.V., Kuninin, P.M., & Bobrovskij, M.V. (2016). *Podchinennye sistemy avtomaticheskogo upravlenija jel.dvizhushhej siloj (skorosti) jel. privodov postojannogo toka [Slave systems of automatic control of electric motive force (speed) DC drives]*. Lublin, RZESZOW, 18(5). [in Russ.]
20. Bulhakov, V.M., Voitiuk, D.H., Adamchuk, V.V., & Ivanyshyn, V.V. (2007). *Naukovo-*

tehnichna polityka v silskomu hospodarstvi. *Visnyk ahrarnoi nauky*, 3, 5-10. [in Ukrainian].

21. Dubrovin, V.O. Voitiuk, D.H., Ivanyshyn, V.V. (2005). Rynok silskohospodarskoi tekhniky v Ukraini [Market of agricultural machinery in Ukraine]. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho ahrarnoho universytetu*, 80(1), 13–28. [in Ukrainian].

22. Adamchuk, V.V., Bulhakov, V.M., & Ivanyshyn, V.V. (2012). Pro rozrobku i stvorennia v Ukraini silskohospodarskykh mashyn suchasnoho rivnia. *Zb. nauk. prats Vinnytskoho natsion. ahrarn. un-tu. Seriya: Tekhnichni nauky*, 11, is. 2 (66), 8–14. [in Ukrainian].

23. Ivanyshyn, V.V. (2011). Rozvytok ta funktsionuvannia rynku tekhnichnykh zasobiv dlia silskoho hospodarstva v Ukraini [Development and functioning of the market of technical equipment for agriculture in Ukraine]. *Ekonomika APK*, 3, 78-82. [in Ukrainian].

Received 03/16/2019

Revision 04/11/2019 Accepted 06/27/2019