

М. Й. Заполовський, М. В. Мезенцев

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

ЦИФРОВА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ДИЗЕЛЬ-ПОЇЗДА

Анотація. Розглянуті питання розробки та дослідження моделей систем автоматичного керування (САК) електропередачі дизель-поїзда з електроприводом змінного струму. Проведено огляд літературних джерел на задану тематику та аналіз існуючих підходів до розв'язання. Розглянуті як стандартні алгоритми керування окремих контурів системи управління так і варіанти з використанням методів цифрового управління. Побудовані математичні моделі, структурні схеми моделей контурів САК електропередачі, запропоновані рекурентні співвідношення для окремих контурів управління, проведено моделювання їхнього функціонування. Отримані аналітичні співвідношення, які можуть бути використані для розробки структури САК електропередачі дизель-поїзда і розрахунку її параметрів при забезпеченні певного критерію якості. Визначені параметри САК вихідної напруги інверторів (каналу формування струму) асинхронного електродвигуна, які забезпечують задану якість керування та допустимі межі зміни параметрів САК.

Ключові слова: системи автоматичного керування, електропередача, електропривод змінного струму, алгоритми управління, дизель-поїзд, математична модель, рекурентні співвідношення.

Вступ

Огляд робіт, присвячених задачі розробки систем керування електропередачами локомотивів та дизель-поїздів з електроприводом змінного струму показує, що в даний час значна увага приділяється сучасним оптимальним систем керування на основі сучасних досягнень проектування з використанням методів оптимізації, нечіткої логіки, нейрокомп'ютерних технологій, орієнтованих на побудову не аналогових, а цифрових систем керування (ЦСК), які забезпечують функціонування як його самого, так і підсистем окремо, зокрема цифрових систем керування електроприводом (ЦСКЕП). Ця тенденція має місце не тільки в Україні, але і країнах ближнього і далекого зарубіжжя [1 – 4].

ЦСКЕП дозволяють реалізувати більш складні принципи керування згідно запропонованих алгоритмів – векторного керування, керування за нейромережевими технологіями, реалізацію оптимальних законів керування і т.п. [4 – 6]. Крім того вони відрізняються перевагою цифрових елементів у порівнянні з аналоговими: великою завадостійкістю, простотою і зручністю в цифровому заданні програми функціонування тих чи інших регуляторів системи керування, тенденцією до зниження габаритів і вартості систем, до підвищення надійності і ступеня інтеграції цифрових вузлів.

Тому розробка цифрових систем керування електроприводом змінного струму та їх моделей для дослідження є актуальною задачею.

Постановка задачі і аналіз відомих публікацій. Для рішення завдань розробки ЦСК, зокрема алгоритмів керування, присвячено значне число публікацій [2, 5, 7, 8] та зазвичай використовується математичне моделювання, сучасні методи теорії автоматичного керування та оптимізації, прогресивні інформаційні технології, технічні засоби реаліза-

ції на базі мікропроцесорної техніки. Структура ЦСК загалом аналогічна структурам аналогових систем керування, тому синтез регуляторів ЦСК простіше проводити за методикою для аналогових систем, а результати використовувати для їхньої параметризації та розробки алгоритмів (рекурентних співвідношень). Показники якості синтезованих ЦСК можливо визначити за допомогою моделювання.

Цифрові СКЕП відрізняються від неперервних СКЕП, головним чином, елементною базою, її дискретністю за рівнем сигналів і за часом їх дії. ЦСКЕП, як і неперервні СКЕП, формують ті ж самі задачі керування алгоритмами, використовують методи керування – модального керування, підпорядкованого регулювання, послідовної і паралельної корекції і т.д.

Однаково в реалізації алгоритмів керування може проявитись дискретність ЦСКЕП, яка буде відображатись на динамічних і точнісних показниках електропривода. До цифрових систем керування (ЦСК) відносять системи, які складаються з цифрових елементів. В складі ЦСК цифрові елементи утворюють вузли, які виконують ті чи інші задачі керування. На рис. 1 подана схема ЦСК деякої координати x електропривода, де ЦЗП – цифровий задавальний пристрій, ЦС – цифровий суматор, ЦР – цифровий регулятор, ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач, АЦП – аналого-цифровий перетворювач, КП-Д – система «керований перетворювач – двигун», в якій КП є вихідною виконавчою частиною СКЕП.

Вхідний цифровий сигнал X_{30} встановлює початкові параметри для X_3 , наприклад, $X_{3\max}$, $\dot{X}_{3\max}$, $\ddot{X}_{3\max}$, що означає для керованої координати електропривода X , відповідно задані значення переміщення, максимально допустимої швидкості та прискорення.

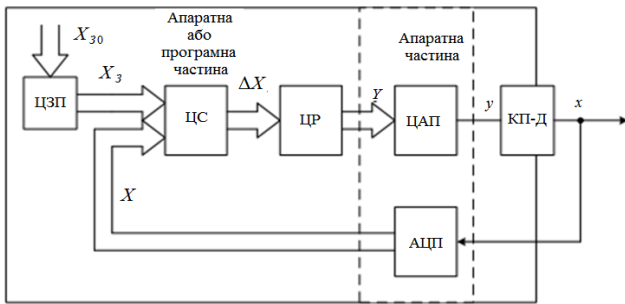


Рис. 1. Схема цифрової системи керування електроприводу за допомогою координати X

Функціональні вузли ЦСК, що показані на рис. 1, можуть бути реалізовані двоюко:

1) апаратно – кожний функціональний вузол являє собою окремий блок у складі ЦС, виконаний на мікросхемах малого і середнього ступеня інтеграції;

2) програмно-функціональні вузли виконуються на єдиному універсальному цифровому приладі – мікроконтролері і алгоритм їх функціонування визначається програмою роботи цього приладу.

Для зміни алгоритму керування ЦСК при апаратному способі необхідна заміна відповідних блоків керування. При програмному способі для зміни алгоритму керування необхідна лише зміна програми на тій самій елементній базі. Завдяки швидкому вдосконаленню сучасної технології виготовлення мікроконтролерів і мікропроцесорних приладів, підвищення їх якості і зниження вартості, програмний спосіб керування все ширше впроваджується в системи керування електроприводами.

Математичний опис (математичні моделі) цифрових систем проводиться в основному двома методами: рівняннями в кінцевих різницях; z -функціями (z -перетворенням Лапласа). Метод оцінки властивостей ЦСК можливо проводити на основі загальної передавальної функції як аналогової системи та наступному z -перетворенні цієї функції і дослідження отриманого рекурентного співвідношення методом моделювання.

Розглянутий підхід використано при розробці цифрової системи управління електропередачі дизель-поїзда з електроприводом змінного струму. На першому етапі – за допомогою моделювання з використанням пакету MATLAB уточнені структура і параметри регуляторів контурів системи управління згідно заданих якісних показників щодо забезпечення умов функціонування об'єкта в цілому, на другому етапі – на основі z -перетворення отримані алгоритми (рекурентні співвідношення) для контуру керування електроприводу.

Що до першого етапу, то за допомогою моделювання з використанням пакету MATLAB уточнені структура і параметри регуляторів контурів системи керування згідно заданих якісних показників. Частково результати досліджень приведено в роботах [3,8].

Метою даної роботи є розроблення рекурентних співвідношень ЦСК для реалізації регуляторів системи керування електропередачі дизель-поїзда з

електроприводом змінного струму, визначення параметрів системи автоматичного керування та значення кроку дискретизації, які забезпечують задану якість керування і допустимі межі зміни параметрів ЦСК, проведення досліджень та отримання якісних характеристик роботи систем керування в процесі моделювання з використанням пакету MATLAB.

Основна частина

З аналізу системи керування електропередачі дизель-поїзда виходить, що найбільш критичною системою в процесі функціонування є регулятор вихідної напруги інверторів електроприводу. Його модель може бути представлена сукупністю моделей каналу струму і каналу потужності. Ці канали призначені для формування сигналу керуючого впливу по вихідній напрузі інверторів [8, 10].

Оскільки структури каналів струму та потужності ідентичні, то рекурентні співвідношення за умови використання аналогічних перетворень також будуть мати однакові структури. Відрізнятися будуть тільки параметрами (коефіцієнтами підсилення та постійними часу) відповідних елементів структурних схем, які визначаються на етапі дослідження аналогових структур системи керування. Структурна схема моделі системи автоматичного керування (САК) електропередачі дизель-поїзда по каналу формування струму, приведена на рис. 2.

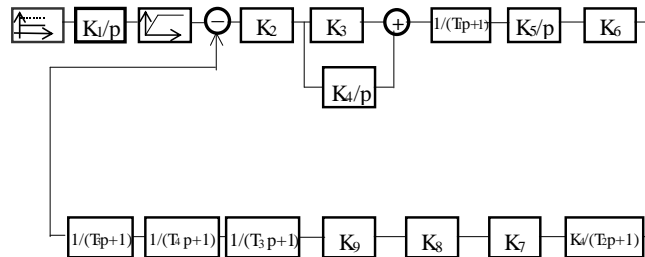


Рис. 2. Структурна схема моделі електропередачі дизель-поїзда по каналу формування струму

Значення вихідних параметрів структурної схеми (конструктивні параметри) такі:

$$K_6 = 95; K_7 = 6.7; K_8 = 0.017; K_9 = 2; T_1 = 0.1; T_2 = 1; T_3 = 0.016; T_4 = 0.007.$$

Блок формування завдання $W_1(p)$, в якого вхідним сигналом є значення номера позиції контролера машиніста:

$$W_1(p) = K_1 / p. \quad (1)$$

Блок пропорційно-інтегрального регулятора $W_2(p)$:

$$W_2(p) = K_2(K_3 + K_4 / p). \quad (2)$$

Блок фільтру сигналів пропорційно-інтегрального регулятора $W_3(p)$:

$$W_3(p) = 1 / (T_1 p + 1). \quad (3)$$

Блок задатчика інтенсивності $W_4(p)$:

$$W_4(p) = K_5 / p. \quad (4)$$

Особливістю блока задатчика інтенсивності є те, що він має змінну структуру в процесі функціонування. В залежності від знаку похідної вхідного сигналу – різні значення коефіцієнта K_5 , який впливає на якісні показники об'єкта керування.

Блок об'єкта керування (електроприводу дизель-поїзда) $W_5(p)$:

$$W_5(p) = K_6 / (T_2 p + 1). \quad (5)$$

Блок датчиків та фільтра сигналів елементів зворотного зв'язку $W_6(p)$:

$$W_6(p) = K_7 K_8 K_9 / (T_3 p + 1)(T_4 p + 1)(T_5 p + 1). \quad (6)$$

Моделі блоків, які описуються передавальними функціями (1) – (6), з однієї сторони використовувались для уточнення структури та визначення параметрів елементів схеми моделі електропередачі дизель-поїзда по каналу формування струму, з іншої – для отримання рекурентних співвідношень.

На першому етапі проводилися дослідження САК з метою уточнення структури та визначення параметрів регулятора каналу формування струму, відповідно до схеми, приведеної на рис. 2. Основна увага приділялася питанням, пов'язаними з адекватністю розроблених моделей і визначенням параметрів САК, що забезпечують задану якість керування. При цьому показниками якості виступали величина перегулювання, час перехідного процесу, число перегулювання, значення швидкодії.

В результаті досліджень уточнені структурні схеми каналів регулювання електропередачі. Значення параметрів для САК каналу струму, які задовольняють критерію якості наступні:

$$K_1 = 0.4; K_2 = 2.5; K_3 = 1.0;$$

$$K_4 = 0.2; K_5 = 0.03; T_1 = 0.1.$$

Питання, які розглядаються в даній роботі, спрямовані безпосередньо на розробку та дослідження рекурентних співвідношень системи керування електропередачі дизель-поїзда по каналу формування струму електроприводу дизель-поїзда.

З результату аналізу структурної схеми (рис. 2) виходить, що математичну модель системи керування можливо представити передавальними функціями $W_2(p) - W_5(p)$. Основу даної системи складають операції інтегрування, реалізацію яких при розробці рекурентних співвідношень можливо виконувати за допомогою різних апроксимуючих співвідношень. Виходячи із можливості використання певного типу мікропроцесорної техніки та враховуючи необхідну швидкодію і точність реалізації, розглянута можливість застосування рекурентного співвідношення на одному із можливих варіантів вибору апроксимуючого співвідношення – прямокутників або трапецій.

Для знаходження рекурентних співвідношень використано поняття імпульсної передавальної функції $H[z]$ та методику використання операторів інтегрування (I) і диференціювання (D).

Операція інтегрування за правилом прямокутників в операторній формі запису має вигляд:

$$I = \tau / (z - 1),$$

де τ – крок інтегрування.

Операція інтегрування за правилом трапецій:

$$I = \tau / 2 \left[\frac{(z+1)}{(z-1)} \right].$$

За методом прямокутників рекурентне співвідношення описується наступним чином:

$$y_n = -(a_{14}\tau - 3)y_{n-1} + (2a_{14}\tau - 3)y_{n-2} + (1 - a_{14}\tau)y_{n-3} + a_{15}\tau^2 x_{n-2} + (a_{16}\tau - a_{15})\tau^2 x_{n-3}, \quad \text{де} \quad (7)$$

$$k_{10} = k_2 k_3, k_{11} = k_2 k_4, k_{12} = k_5 k_{10}, k_{13} = k_5 k_{11}, \\ a_{14} = 1/T_1, a_{15} = k_{12}/T_1, a_{16} = k_{13}/T_1.$$

де τ – крок інтегрування.

За методом трапецій:

$$y_n = \frac{1}{(a_{14}T + 1)} \{ [(a_{14}T + 3)y_{n-1} + (a_{14}T - 3)y_{n-2} - (a_{14}T - 1)y_{n-3}] + T^2 [(a_{16}T + a_{15})x_n + (3a_{16}T + a_{15})x_{n-1} + (3a_{16}T - a_{15})x_{n-2} + (a_{16}T - a_{15})x_{n-3}] \}, \quad (8)$$

де $T = \tau / 2$.

При програмній реалізації блоку задатчика інтенсивності, який має перемінну структуру в процесі функціонування, можливо в програмі реалізації алгоритму (рекурентного співвідношення) передбачити виконання формування його вихідного сигналу y_n в залежності від вхідного x_n згідно наступного співвідношення:

$$y_n = y_{n-1} + k_5 \cdot \tau \cdot x_{n-1},$$

$$\text{де } k_5 = \begin{cases} 0.03, & \text{якщо } y_n - y_{n-1} \geq 0; \\ 0.2, & \text{якщо } y_n - y_{n-1} < 0. \end{cases}$$

Значення величини періоду дискретизації (кроку інтегрування) визначалось для кожного рекурентного співвідношення в процесі дослідження шляхом моделювання.

Крім того проводилось порівняння отриманих показників перехідного процесу вибраного рекурентного співвідношення з отриманими показниками моделювання даної системи, використовуючи метод Адамса.

В процесі дослідження системи керування, в основу якої покладено використання рекурентних співвідношень на основі інтегрування за методом прямокутників (7) і методом трапецій (8) в замкнутій системі управління, значення кроку дискретизації τ становить величину не більше 0.0125 сек. за умови максимальної позиції контролера машиніста

(значення вхідного сигналу). Це пояснюється тим, що в контурі керування присутні елементи, які формують сигнал зворотного зв'язку (фільтри) з порівняно меншими постійними часу.

Постільки вираз рекурентного співвідношення за методом прямокутників містить в собі число елементарних операцій менше порівняно з методом трапецій, а значення кроку дискретизації τ становить ту саму величину, пропонується використання методу прямокутників для формування сигналу керування.

Результати досліджень системи керування приведено на рис. 3, 4 і табл. 1, 2.

Умовні позначення:

k_2, k_5 – коефіцієнти передачі системи керування (рис. 2); N – число перерегулювання;

T – час перехідного процесу (час регулювання);

Δ – величина перерегулювання;

V – швидкодія (швидкість зміни регулюючої змінної (току ТАД)).

На рис. 3 приведені перехідні процеси, що відповідають струму ТАД при зміні одного з параметрів (коефіцієнта підсилення) САК (коефіцієнта k_5 задатчика інтенсивності) за умови використання операції інтегрування за правилом прямокутників (методом Ейлера) при значенні кроку дискретизації $\tau = 0.0125$ с.

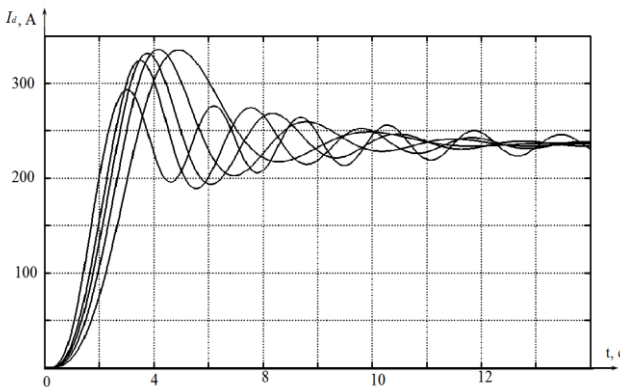


Рис. 3. Залежності струмів ТАД при зміні коефіцієнта k_5

На рис. 4 приведені перехідні процеси, що відповідають струму ТАД при зміні одного з параметрів (коефіцієнта підсилення k_2) САК за умови використання операції інтегрування за правилом прямокутників при значенні кроку дискретизації $\tau = 0.0125$ с.

Процеси носять стійкий характер і не суперечать поняттям теорії управління щодо характеру поведінки якісних показників в залежності від коефіцієнту підсилення.

Критичне значення кроку дискретизації за умови використання операції інтегрування за правилом прямокутників $\tau = 0.015$ с., при якому процес носить явно нестійкий характер.

В результаті аналізу встановлено, що оптимальними значеннями параметрів системи керування для системи, яка досліджувалась, являються:

крок дискретизації $\tau = 0.0125$ с.;
коефіцієнт підсилення пропорційно-інтегрального регулятора $k_2 = 2.5$;

коефіцієнт підсилення задатчика інтенсивності $k_5 = 0.03$.

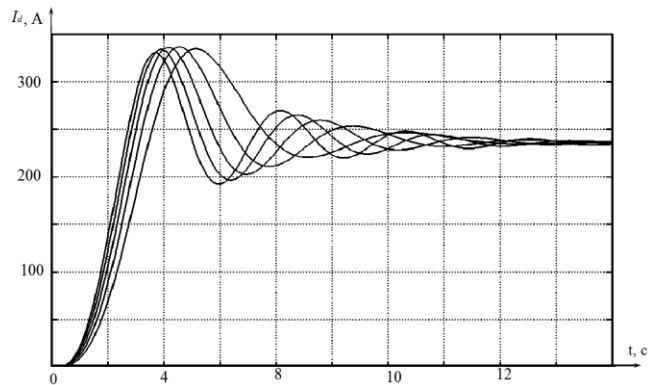


Рис.4. Залежності струмів ТАД при зміні коефіцієнта k_2 .

Таблиця 1 – Результати дослідження системи керування ($k_2 = 2.5$)

k_5	N	T, c	$\Delta, \%$	$V, A/c$
0.02	3	15	42.6	75.0
0.03	4	18	42.5	83.75
0.04	6	20	40.4	100.0
0.05	8	21	38.3	101.1
0.08	15	30	23.4	101.3

Таблиця 2 – Результати дослідження системи керування ($k_5 = 0.03$)

k_2	N	T, c	$\Delta, \%$	$V, A/c$
1.5	2	16	42.4	71.4
2.0	3	17	42.5	78.9
2.5	4	18	42.5	93.75
3.0	6	20	42.4	101.0
3.5	8	22	42.3	102.1

В результаті досліджень визначені параметри системи керування, допустимі межі зміни параметрів САК та величини періоду дискретизації, що має першочергове значення за умови реалізації отриманих рекурентних співвідношень засобами мікропроцесорної техніки.

Отримані структурні схеми моделей САК використані при розробці цифрової системи управління електропередачі дизель-поїзда, основу якої складають алгоритми функціонування (рекурентні співвідношення) для окремих контурів загальної схеми керування.

Висновки

1. На основі аналітичного огляду існуючих алгоритмів та систем автоматичного управління запропоновані структурні схеми регуляторів контурів

САК електропередачі дизель-поїзда з тяговим електроприводом змінного струму та їх математичні моделі для дослідження системи керування з метою визначення параметрів регуляторів за умови забезпечення певних критеріїв якості та розробки рекурентних співвідношень.

2. Запропоновані математичні моделі, які реалізовані у вигляді машинної моделі і проведені за її допомогою дослідження, розроблені рекурентні співвідношення показали перспективність такого підходу при проектуванні сучасних систем керування електропередачі локомотивів та дизель-поїздів з тяговими електроприводами змінного струму.

3. Аналітичні співвідношення, які отримані у вигляді рекурентних співвідношень для реалізації алгоритмів управління регулятора вихідної напруги інверторів (каналу формування струму), можуть бути використані при побудові системи керування за допомогою засобів мікропроцесорної техніки, що дозволить можливості створення цифрової сис-

теми управління електропередачею дизель-поїзда згідно сучасних тенденцій.

4. Визначені параметри системи автоматичного управління вихідної напруги інверторів (каналу формування струму) асинхронного електродвигуна, які забезпечують задану якість керування (час перехідного процесу, величину перерегулювання, число перерегулювання, значення швидкодії), допустимих меж зміни параметрів САКР та значення періоду дискретизації за умови реалізації отриманих рекурентних співвідношень засобами мікропроцесорної техніки.

5. На підставі досліджень в замкнутій системі управління, які проведені шляхом моделювання за допомогою пакету MATLAB показано, що структура системи керування із значеннями параметрів, що пропонуються, задовольняють вимогам щодо забезпечення якісних показників та працездатності в робочому проміжку швидкостей (в залежності від завдання – номеру позиції контролера машиніста).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Horstmann D. 100 Jahre Entwicklung der Antriebs-technik für elektrische Bahnen. Teil 2 / D. Horstmann, R. Wagner, W-D. Weigel // Elek. Bahnen. – 2003. – No 7. – P. 338 – 345.
2. Моделирование и оптимизация систем управления и контроля локомотивов / [Носков В.И., Дмитриенко В.Д., Запоровский Н.И., Леонов С.Ю.]. – Х.: ХФИ «Транспорт Украины», 2003. – 248 с.
3. Запоровський М.Й. Синтез управлiнь для оптимiзацiї динамiчних процесiв електроприводу змiнного струму / М.Й. Запоровський, В.В. Скороделов, М.В. Мезенцев // Системи управління, навігації та зв'язку. – Вип. 4(50). Полтава. 2018. С. 38-41.
4. Грибко В.В. Мікропроцесорні системи керування електроприводами / В.В. Грибко, В.Ю. Кучерук, О.М. Возняк – Вінниця: ВНТУ, 2009. – 146 с.
5. Isermann R. Digital Control Systems: Volume 1: Fundamentals, Deterministic Control / R. Isermann – Springer Science & Business Media, 2013. – 336 p.
6. Dressler Helmuk MICAS – Microcomputer für Fahrzeuge // Elektrische Bahnen. – 1981. – Vol. 79. – №12. – P. 411 – 417.
7. Поповіч М.Г. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи / М.Г. Поповіч, О.Ю. Лозинський. – К.: Либідь, 2005. – 680 с.
8. Запоровський М.Й. Розробка та дослідження алгоритмів цифрової системи автоматичного регулювання (САР) електропередачі дизель-поїзда / М.Й. Запоровський, О.К. Пермяков //Тези доповідей шостої міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми інформатизації» - Черкаси-Баку-Бельсько-Бяла-Харків-2018. – С. 60.
9. Запоровський Н.И. К вопросу разработки цифровой системы автоматического регулирования электропередачи дизель-поезда / Н.И. Запоровский, О.К. Пермяков // «Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління» - Полтава-Баку-Харків-Жиліна - 2018. – С. 10.
10. Ерофеев А.А. Теория автоматического управления / А.А. Ерофеев – СПб.: Политехника, 2001. – 302 с.
11. М.В. Мезенцев, М.Й. Запоровський, М.В. Ліпчанський. Розроблення та дослідження системи керування електропередачі дизель-поїзда на основі методів цифрового управління // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава, ПИТУ, 2019. - Випуск 2(54). -С. 46-50.

Received (Надійшла) 19.02.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 31.03.2021

A digital model of the control system of diesel train electric drive

Mykola Zapolovsky, Mykola Mezentsev

Abstract. The questions of development and research of models of automatic control systems (ACS) of electric power transmission of a diesel train with electric actuator of an alternating current are considered. A review of literary sources on a given topic and an analysis of existing approaches to the decision is made. Both standard control algorithms for separate control system contours and variants using digital control methods are considered. The constructed mathematical models, structural schemes of the models of circuits of ACS, proposed recurrence ratios for the individual control loops, carried out the modeling of their functioning. The obtained analytical relations which can be used for the development of the structure of the electric power transmission line of the diesel train and the calculation of its parameters when providing a certain quality criterion. The parameters of the ACS of the output voltage of the inverters (current generation channels) of the asynchronous electric motor are determined, providing the specified quality of control and allowable limits of change of parameters of the ACS.

Keywords: automatic control systems, power transmission, AC electric drive, control algorithms, diesel train, mathematical model, recurrence relations.