

М. Й. Заполовський, М. В. Мезенцев, В. В. Скородєлов

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

## ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ ДИЗЕЛЬ-ПОЇЗДА ТА УТОЧНЕННЯ ЇЇ СТРУКТУРИ

Розглянуті питання розробки та дослідження моделей систем керування електропередачею дизель-поїзда з електроприводом змінного струму. Проведено огляд літературних джерел на задану тематику та аналіз існуючих підходів до розв'язання найпоширеніших задач у даній галузі. Розглянуті як стандартні алгоритми керування окремих контурів системи керування так і варіанти з використанням корегуючих ланок. Побудовані математичні моделі, структурні схеми моделей контурів САР електропередачі дизель-поїзда, запропоновані структури та корегуючі ланки для окремих контурів керування, проведене моделювання їхнього функціонування. Запропоновані рекомендації, які можуть бути використані для розробки структури САР електропередачі дизель-поїзда і знаходження її параметрів при забезпеченні певного критерію якості. Визначені параметри системи автоматичного керування канала формування струму тягового електродвигуна, які забезпечують задану якість керування (час перехідного процесу, величину перерегулювання, число перерегулювання, швидкодію), допустимих меж зміни параметрів САР. Запропоновані структури регуляторів задовольняють вимогам щодо працездатності в робочому проміжку швидкостей та можливих навантажень.

**Ключові слова:** моделі системи керування, електропередача, дизель-поїзд, електропривод змінного струму, алгоритми керування, корегуючі ланки, критерії якості.

### Вступ

Визначальне місце в електропередачі тягових одиниць рухомого складу, в тому числі дизель-поїзда, займає електропривод змінного струму. Задані характеристики електроприводу підтримуються системою керування. Для покращення її ефективності, можуть корегуватись шляхом вдосконалення алгоритмів керування. В загальному плані завдання розробки системи керування електропередачі та її дослідження є складовою частиною загальної задачі створення оптимальної системи управління транспортним засобом (дизель-поїздом). Останніми роками вирішення цих завдань пропонується виконувати з використанням сучасних технологій, в основі яких лежать методи аналізу і синтезу складних технічних систем [1–4].

**Постановка задачі і аналіз відомих публікацій.** Огляд робіт, присвячених задачі розробки ефективних систем управління електропередачею дизель-поїзда з електроприводом змінного струму показує, що в даний час значна увага приділяється створенню систем управління на основі сучасних досягнень проектування з використанням методів оптимізації, нечіткої логіки, нейрокомп'ютерних технологій, орієнтованих на побудову не аналогових, а цифрових систем управління (ЦСУ), які забезпечують функціонування як його самого, так і підсистем окремо, зокрема електроприводу змінного струму. Ця тенденція має місце не тільки в Україні, але і країнах ближнього і далекого зарубіжжя [1–7]. Невід'ємною задачею при цьому є питання розробки моделей систем та їх дослідження. Як правило моделі систем носять нелінійний характер. Врахування нелінійностей в моделях з однієї сторони дає можливість оцінити їх вплив на якісні показники системи, а з іншої – шляхом введення додаткових нелінійних елементів підвищити якість процесів керування або отримати принципово нові алгоритми в керуванні. При цьому є можливість підвищити

швидкодію, зменшити величину перерегулювання або компенсувати дії небажаних присутніх нелінійностей [8, 9]. Математичний апарат аналізу нелінійних систем зв'язаний з необхідністю дослідження нелінійних диференціальних рівнянь, теорія яких має множини індивідуальних методів. В даний час рішення нелінійних диференціальних рівнянь виконується шляхом моделювання за допомогою математичних пакетів, наприклад MatLab [10, 11]. До того ж математичні моделі у вигляді системи диференціальних рівнянь можуть бути використані при розробці ЦСУ. Вони дозволяють реалізувати більш складні принципи керування згідно запропонованих алгоритмів: векторне керування, керування за нейромережевими технологіями, реалізацію оптимальних законів управління та інше [3, 4, 12–14].

Структура ЦСУ загалом аналогічна структурам аналогових систем керування, тому розробку і дослідження регуляторів ЦСУ простіше проводити за методикою для аналогових систем, а результати використовувати для розробки алгоритмів управління, орієнтованих на реалізацію за допомогою засобів цифрової техніки.

Метод оцінки властивостей ЦСУ можливо проводити на основі загальної передавальної функції як аналогової системи. Розглянутий підхід використано при розробці системи управління електропередачі дизель-поїзда з електроприводом змінного струму. При цьому за допомогою моделювання з використанням пакету MatLab уточнені структура (шляхом введення корегуючих ланок) і визначені параметри регуляторів контурів системи управління відповідно до якісних показників щодо забезпечення умов функціонування досліджуваного об'єкта в цілому, що дає змогу в подальшому за допомогою z-перетворення на основі запропонованої моделі у вигляді передавальних функцій отримати рекурентні співвідношення для контурів системи управління [8, 15].

**Метою даної роботи** є розробка математичних моделей та дослідження системи керування електро-

передачі дизель-поїзда з електроприводом змінного струму, уточнення структурних схем регуляторів та визначення параметрів системи автоматичного керування вихідної напруги інверторів (каналу формування струму) асинхронного електродвигуна, які забезпечують задану якість керування (величину перерегулювання, час регулювання, число регулювання, швидкодію) і допустимі межі зміни параметрів САР, проведення комплексних досліджень та отримання якісних характеристик роботи систем керування в процесі моделювання з використанням MatLab.

### Основна частина

Однією з важливих задач, які зв'язані з розробкою систем керування об'єктами, є розробка математичної моделі досліджуваної системи для визначення її динамічних і статичних характеристик у різних режимах роботи та на цій основі запропонувати корегуючі ланки, якщо це необхідно, та значення параметрів регуляторів системи керування для забезпечення надійного функціонування об'єкта в цілому. Дану інформацію можливо отримати за допомогою експериментальних досліджень, або шляхом математичного моделювання.

У даний час моделювання - найбільш ефективний метод дослідження систем на етапі їхнього проектування. Модель електропередачі системи керування по каналу формування струму тягових електродвигунів можливо описати за допомогою передавальних функцій.

Канал завдання:

$$U_{z1}(p) = U_{km} W_1(p), U_z = \min(U_{z1}, U_{km}), \quad (1)$$

де  $U_{z1}$  - значення сигналу завдання в певний момент часу;  $U_{km}$  - сигнал управління, пропорційний номеру позиції контролера машиніста;  $W_1(p) = K_1/p$ ;  $K_1$  - коефіцієнт передачі, який задає темп наростання сигналу управління (підлягає визначенню);  $p$  - оператор Лапласа.

Регулятор каналу формування струму:

$$V_p(p) = U_n K_2 (W_2(p) + K_3), \quad (2)$$

де  $V_p(p)$  - сигнал управління на виході регулятора;  $U_n(p) = U_{z1}(p) - U_{z3}(p)$ ;  $U_{z3}(p)$  - сигнал управління зворотного зв'язку;  $K_2, K_3, K_4$  - коефіцієнти передачі (підлягають визначенню);  $W_2(p) = K_4/p$ .

Блок фільтрації регулятора каналу формування струму:

$$V_\phi(p) = V_p(p) W_3(p), \quad (3)$$

де  $V_\phi(p)$  - сигнал управління на виході регулятора каналу формування струму;  $W_3(p) = 1/(T_1 p + 1)$ ;  $T_1$  - постійна часу блоку фільтрації.

Задавальник інтенсивності:

$$V_{zi}(p) = V_\phi(p) W_4(p), \quad (4)$$

де  $V_{zi}(p)$  - сигнал управління на виході блоку задавальника інтенсивності;  $W_4(p) = K_5/p$ ;  $K_5$  - ко-

ефіцієнт передачі (може приймати відповідні значення в залежності від похідної вхідного сигналу) (підлягає визначенню).

Модель об'єкта управління:

$$Y_{oy}(p) = V_{zi}(p) W_5(p), \quad (5)$$

де  $Y_{oy}(p)$  - сигнал управління на виході блоку об'єкта управління (пропорційний фазному струму тягового двигуна дизель-поїзда);  $K_6$  - коефіцієнт передачі;  $W_5(p) = K_6/(T_2 p + 1)$ ;  $T_2$  - постійна часу.

Блок формування сигналу управління каналу зворотного зв'язку (блок моделі фільтрації та датчиків сигналів):

$$U_{z3}(p) = K_7 K_8 K_9 (W_6(p) W_7(p) W_8(p)), \quad (6)$$

де  $K_7, K_8, K_9$  - коефіцієнти передач відповідних блоків;  $W_6(p) = 1/(T_3 p + 1)$ ;  $W_7(p) = 1/(T_4 p + 1)$ ;  $W_8(p) = 1/(T_5 p + 1)$ ;  $T_3, T_4, T_5$  - постійні часу.

При розробці системи керування електропередачею дизель-поїзда практичний інтерес представляють якісні показники перехідного процесу контурів САР, такі як час регулювання, величина перерегулювання, число перерегулювання, швидкодія та значення допустимих меж зміни параметрів САР, що забезпечують надійну роботу системи.

Значення параметрів математичної моделі системи керування по каналу формування струму тягових електродвигунів (1 - 6) такі:

$$K_6=95; K_7=6.7; K_8=0.017; K_9=2; T_1=0.1;$$

$$T_2=1; T_3=0.016; T_4=0.007; T_5=0.016.$$

Величини  $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5$  - невідомі і підлягають визначенню в процесі досліджень.

Згідно технічних вимог до системи керування електропередачею в контурі формування струму електродвигуна критичним, тобто визначальним в функціонуванні системи в цілому, є струм, який протікає через статорну обмотку асинхронного електродвигуна і напівпровідникові елементи перетворювача частоти. У системі САР електропередачі передбачений захист по величині цього струму. Вона не повинна перевищувати 30% від величини струму, необхідної для реалізації максимальної сили тяги згідно технічних умов, тобто величина перерегулювання повинна бути менш 30%. При цьому кількість перерегулювань  $N$  повинно становити 3 - 4 ( $N = 3 - 4$ ) за час перехідного процесу, а швидкодія  $V$  - як можна більша.

У процесі досліджень використовувався метод багаторазового прогону моделі для певної структурної схеми моделі системи керування (зміна визначених параметрів) і отримання перехідних процесів з наступним їхнім аналізом. Дослідження, пов'язані з уточненням структури САР і визначенням параметрів, проводилися в кілька етапів.

На першому етапі проводилися дослідження САР з метою визначення параметрів регулятора каналу формування струму, згідно математичної моделі (1) - (6).

Базова структура моделі САР каналу формування струму приведена на рис. 1. Тут: блоки (1 - 5) – модель формування сигналу завдання по струму; блоки (6 - 10) - модель регулятора на основі пропорційно-інтегрального закону керування; блок (11) - фільтр; блоки (12, 13) - модель задатчика інтенсивності (без врахування постійних часу залежно від форми вхідного сигналу); блоки (14 - 16) - модель об'єкта керування (формування струму фази ТАД); блоки (17 - 20) - модель датчиків сигналів й фільтруючих ланок, використовані в колі зворотного зв'язку САР.

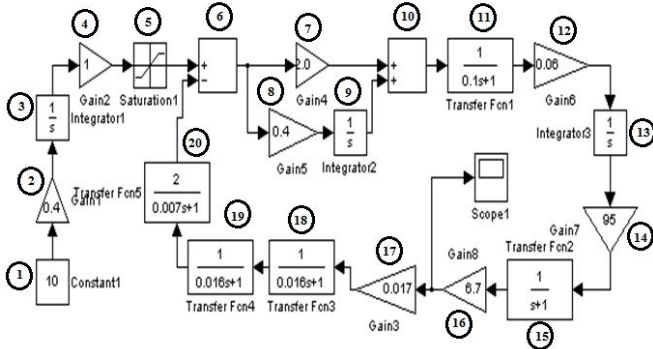


Рис. 1. Структура моделі САР каналу формування струму

На рис. 2 для одного із варіантів, приведені характерні перехідні процеси, що протікають в досліджуемій системі, при різних значеннях коефіцієнта  $K_3$  (блок пропорційно-інтегрального регулятора).

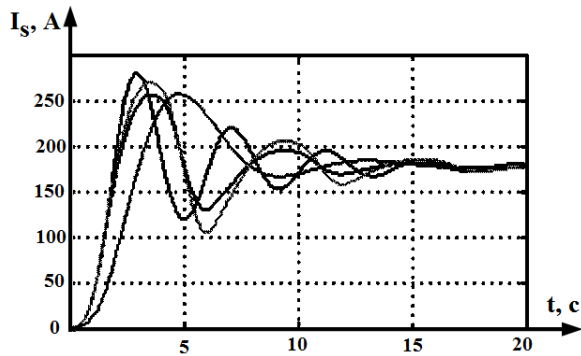


Рис. 2. Перехідні процеси струму при різних значеннях коефіцієнта  $K_3$

Для схеми, приведеної на рис. 1, в результаті досліджень визначені параметри (коефіцієнтів перерахунок та постійних часу), які задовольняють якісним показникам щодо вимог до функціонування системи регулювання.

При цьому швидкість  $V$  становить величину 61А/сек. Покращення якісного показника по швидкості пропонується шляхом удосконалення структурної схеми. Розглядається два підходи. Перший – це введення задавальника інтенсивності зі змінною структурою (рис. 3). В залежності від знаку похідної вхідного сигналу (зростання чи

убування) – різні постійні часу. Другий підхід – структура задавальника інтенсивності не змінюється, а вводиться в контур регулювання корегуюча ланка (рис. 4). Тут, на відміну від структури задатчика інтенсивності, у якого параметри на зростання і убування не змінювалися, й це приводило до нестійкої роботи при постійній часу, менший за 12,5 сек, то в цьому випадку така структура поліпшує систему САР як з погляду стійкості, так і з погляду якісних показників.

Навіть зменшення постійної часу до 10 сек не приводить до нестійкої роботи. Вдалося досягти збільшення швидкості до величини 83.3 А/с (збільшення на 36.6%). Введення задавальника інтенсивності зі змінною структурою дає позитивний ефект в змісті забезпечення стійкості системи при збільшенні швидкості (тобто робота задатчика інтенсивності зі значно меншими значеннями постійних часу). Так, при постійних часу на зростання ( $T_{зр}$ ) і убування ( $T_{уб}$ ) задавальника інтенсивності ( $T_{зр} = 12.6$  с,  $T_{уб} = 50$  с) істотного впливу на величину перерегулювання не роблять, однак зі зменшенням постійної часу  $T_{зр}$  збільшується швидкість системи, що не маловажно, однак збільшується коливальність (час перехідного процесу й число коливань). Крім того при  $T_{зр} = 10$  с система практично на межі стійкості, при  $T_{зр} = 6.2$  с – не стійка. При цьому встановлено, що прийнятні значення постійних часу задавальника інтенсивності перемінної структури з погляду забезпечення якісних показників відповідають наступним величинам: при зростанні сигналу –  $T_{зр} = 8.5$  с, при убуванні –  $T_{уб} = 50$  с. Значення величини перерегулювання становить 29.78 %, час перехідного процесу – 20 с, число перерегулювання – 4.

Проведені експерименти з моделлю дозволяють установити для даної структури САР, обумовленою її моделлю (рис. 1), оптимальні значення параметрів з урахуванням близькості до необхідних показників якості перехідного процесу. Оптимальні значення цих параметрів такі:

$$K_1 = 2.5; K_2 = 1; K_3 = 0.2; K_4 = 0.02.$$

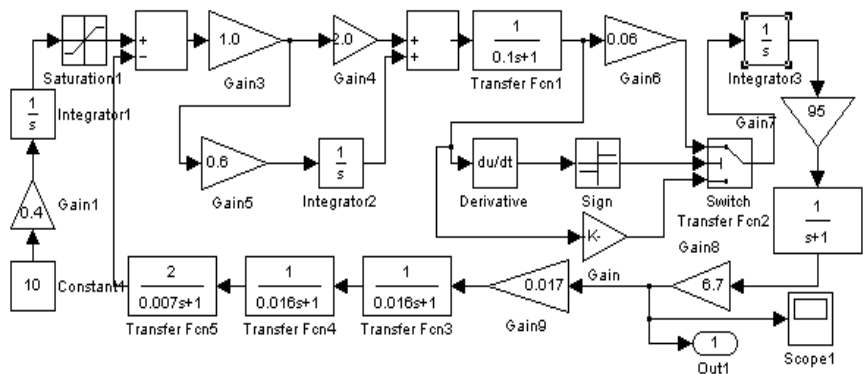


Рис. 3. Структура моделі САР каналу формування струму із задавальником інтенсивності зі змінною структурою

Другий підхід. Структура задавальника інтенсивності не змінюється, а вводиться в контур регулювання корегуюча ланка. Структурна схема моделі приведена на рис. 4.

Корегуюча ланка введена в контур пропорційно-інтегрального регулятора (в коло інтегральної складової) у вигляді передавальної функції та зони нечутливості з пороговими значеннями [0; 0.1] В. Передавальна функція  $W(p)$  задається у вигляді:

$$W(p) = \frac{(p + 0.1)(p - 0.93)}{p(p + 4)} \quad (7)$$

Параметри блоків моделі для контуру завдання, зворотнього зв'язку (датчиків сигналів та фільтрів) залишаються такими ж, як і в попередніх досліджуваних схемах. В результаті дослідження отримано: значення величини перерегулювання становить 29.78 %, час перехідного процесу - 20 с, число перерегулювання – 4 (такі ж, як і в попередній схемі). Швидкодія збільшилась до величини 95,2 А/с. Тобто збільшилась на 56.1% по відношенню до структури з незмінною структурою задатчика інтенсивності і на 14.3% відносно структури із задатчиком інтенсивності змінної структури.

На рис. 5 наведені перехідні процеси при введенні корегуючої ланки для різних значень коефіцієнтів задатчика інтенсивності незмінної структури.

В результаті дослідження моделі САР каналу формування струму шляхом уточнення структури запропонована система керування, яка забезпечує в процесі функціонування наступні показники: величина перерегулювання - не більше 30%; час перехідного процесу – не більше 14 с; число перерегулювання – 3; швидкодія – 95.2 А/с, що є цілком допустимим при технічній реалізації САР.

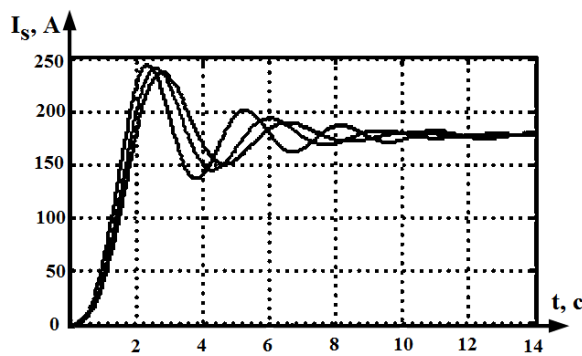


Рис. 5. Перехідні процеси струму при використанні корегуючої ланки

Це дає змогу застосовувати математичну модель САР каналу формування струму, яка описується рівняннями (1) – (7), для дослідження та розробки системи керування електропередачі дизель-поїзда з використанням певних критеріїв оптимальності. В результаті досліджень для пропонуємих структур-

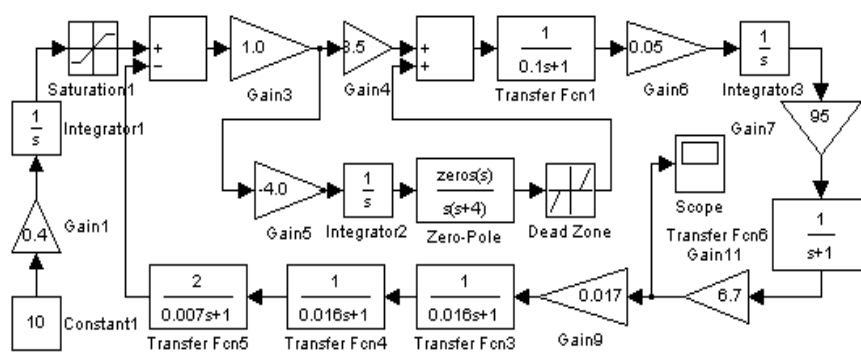


Рис. 4. Структура моделі САР каналу формування струму із корегуючою ланкою

них схем знайдено значення параметрів контурів регуляторів, що забезпечують необхідні якісні показники і надійне функціонування системи керування в цілому. До того ж математична модель, за допомогою якої проводились дослідження, може бути використана для побудови ЦСУ шляхом знаходження рекурентних співвідношень із застосуванням z-перетворення за умови їх реалізації з використанням мікропроцесорних пристроїв і силових елементів напівпровідникової техніки для перетворювачів частоти, що входять у структуру САР електропередачі дизель-поїзда.

### Висновки

1. На основі аналітичного огляду існуючих алгоритмів та систем автоматичного керування електропередачі дизель-поїзда з тяговим електроприводом змінного струму запропоновані структурні схеми регуляторів контурів САР електропередачі та їх математичні моделі для дослідження системи управління з метою визначення параметрів регуляторів за умови забезпечення якісних показників системи керування (величину перерегулювання, часу регулювання, число регулювання, швидкодію).

2. Запропонована математична модель може бути використана для розробки алгоритмів (рекурентних співвідношень) при побудові системи керування за допомогою засобів цифрової техніки, що дозволить створенню системи керування електропередачею дизель-поїзда на рівні сучасних вимог.

3. В процесі досліджень запропоновано розглядати в якості одного із основних показників ефективності функціонування системи керування як характеристику, що визначає якість функціонування - значення швидкодії.

4. Розроблені математичні і машинні моделі, за допомогою яких проведені дослідження з метою уточнення структур регуляторів і визначення значень їх параметрів, показали перспективність такого підходу при проектуванні сучасних систем керування електропередачами тягових одиниць рухомого складу.

5. Визначені параметри САР каналу формування струму тягового електродвигуна, які забезпечують задану якість керування (час перехідного процесу, величину перерегулювання, число перерегулювання, швидкодію) та допустимих меж зміни параметрів і задовольняють вимогам щодо працездатності в робочому проміжку швидкостей та можливих навантаженнях.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Walrave, Ellwanger G. Hochgeschwindigkeitsverkehr in Europa // ETR – Eisenbahntechnische Rundschau. – 1995. – №10. – P. 136 – 142.
2. Моделирование и оптимизация систем управления и контроля локомотивов / [Носков В.И., Дмитриенко В.Д., Заполовский Н.И., Леонов С.Ю.]. – Х.: ХФИ «Транспорт Украины», 2003. – 248 с.
3. Horstmann D. 100 Jahre Entwicklung der Antriebsstechnik für elektrische Bahnen. Teil 2 / Daniel Horstmann, Rudolf Wagner, Wolf-Dieter Weigel // Elek. Bahnen. – 2003. – No 7. – P. 338 – 345.
4. Заполовський М.Й. Синтез управлiнь для оптимiзацiї динамiчних процесiв електроприводу змiнного струму / М.Й. Заполовський, В.В. Скороделов, М.В. Мезенцев // Системи управлiння, навігацiї та зв'язку. – Вип. 4(50). Полтава. 2018. С. 38 – 41.
5. Грибко В.В. Мікропроцесорні системи керування електроприводами / В.В. Грибко, В.Ю. Кучерук, О.М. Возняк. – Вінниця: ВНТУ, 2009. – 146 с.
6. Носков В.И О создании тяговых асинхронных электроприводов в НПО «Электротяжмаш» / В.И. Носков, Н.И. Шпика, Г.И.Яровой // Новини енергетики. – 2001. – № 9. – С. 86 – 88.
7. Dressler Helmuk MICAS – Microcomputer für Fahrzeuge // Electriche Bahnen. – 1981.– Vol. 79. – №12. – P. 411 – 417.
8. Ерофеев А.А. Теория автоматического управления. 2-е изд., – СПб.: Политехника, 2001. – 302 с.
9. Абдулаев Н.Д. Теория и методы проектирования оптимальных регуляторов / Абдулаев Н.Д., Петров Ю.П. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 240 с.
10. Гулятьев А. Визуальное моделирование в среде MATLAB: учебный курс – СПб: Питер, 2000. – 432 с.
11. Коваленко А.А. Сучасний стан та тенденції розвитку комп'ютерних систем об'єктів критичного застосування / А.А. Коваленко, Г.А. Кучук // Системи управлiння, навігацiї та зв'язку. – Полтава. ПНТУ, 2018. – Вип. 1(47). – С. 110-113.
12. Поповіч М.Г. Електромеханiчні системи автоматичного керування та електроприводи: Навч. посiбник / М.Г. Поповіч, О.Ю. Лозинський. – К.: Либiдь, 2005. – 680 с.
13. Следящие приводы: В 3т. 2-е изд., доп. и перераб. / Под. Ред. Б.К. Чемоданова. Т.1: Теория и проектирование следящих приводов / Е.С. Блейз, А.В. Зимин, Е.С. Иванов и др. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – 904 с.
14. Файнштейн В.Г. Микропроцессорные системы управления тиристорными электроприводами / В.Г. Фейнштейн, Э.Г. Фейнштейн; Под. ред. О.В. Слежановского. – М.: Энергоатомиздат, 1996. – 240 с.
15. Ажогин В.В. Моделирование на цифровых, аналоговых и гибридных ЭВМ / В.В. Ажогин, М.З. Згуровский – Киев: Вища школа. Головное изд-во, 1983. – 280 с.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Г. А. Кучук,

Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків

Received (Надійшла) 10.12.2018

Accepted for publication (Прийнята до друку) 23.01.2019

### Исследование системы управления электропередачи дизель-поезда и уточнение ее структуры

Н. И. Заполовский, Н. В. Мезенцев, В. В. Скороделов

Рассмотрены вопросы разработки и исследования моделей систем управления электропередачей дизель-поезда с электроприводом переменного тока. Проведен обзор литературных источников по заданной тематике и анализ существующих подходов к решению наиболее распространенных задач в данной области. Рассмотрены как стандартные алгоритмы управления отдельных контуров системы управления, так и варианты с использованием корректирующих звеньев. Разработаны математические модели, структурные схемы моделей контуров САР электропередачи дизель-поезда, предложены структуры и корректирующие звенья для отдельных контуров управления, проведено моделирование их функционирования. Предложены рекомендации, которые могут быть использованы для разработки структуры САР электропередачи дизель-поезда и расчета ее параметров при обеспечении определенного критерия качества. Определены параметры системы автоматического управления канала формирования тока тягового электродвигателя, которые обеспечивают заданное качество управления (время переходного процесса, величину перерегулирования, число перерегулирования, быстродействие), в допустимых пределах изменения параметров САР. Предложенные структуры регуляторов удовлетворяют требованиям работоспособности в рабочем промежутке скоростей и возможных нагрузках.

**Ключевые слова:** модели системы управления, электропередача, дизель-поезд, электропривод переменного тока, алгоритмы управления, корректирующие звенья, критерии качества.

### Research of the diesel train power control system and refinement of its structure

N. Zapolovsky, N. Mezentsev, V. Skorodelov

The issues of the development and research of models of power management systems of diesel trains with AC electric drive are considered. A review of the literature on a given topic and analysis of existing approaches to solving the most common problems in this area. Both standard control algorithms for individual control loops and variants using corrective links are considered. Mathematical models, structural diagrams of models of ACS power transmission circuits of a diesel train have been developed, structures and corrective units for individual control loops have been proposed, their functioning has been modeled. Recommendations are proposed that can be used to develop the structure of the ACS of the diesel train power transmission and calculate its parameters while ensuring a certain quality criterion. The parameters of the automatic control system of the channel for the formation of the current of the traction motor, which provide the specified quality of control (time of the transition process, overshoot value, overshoot number, speed), within the acceptable limits of change of the ACS parameters are determined. The proposed structures of regulators satisfy the requirements of working capacity in the working range of speeds and possible loads.

**Keywords:** control system models, power transmission, diesel train, AC drive, control algorithms, corrective links, quality criteria.