

УДК 629.423.24

### РОЗРОБКА ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЯГОВОЮ ПЕРЕДАЧЕЮ ДИЗЕЛЬ-ПОТЯГА ДЕЛ-02

**Д. О. Кулагін**

Запорізький національний технічний університет  
вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, 69063, Україна. E-mail: nemix123@rambler.ru

Наведено недоліки існуючих регуляторів струму та частоти, а також розглянуто методи їх синтезу. Розроблено регулятори системи керування тяговою передачею дизель-потяга ДЕЛ-02 методом поліномів, що дозволяють отримати систему автоматичного керування з оптимальними параметрами. Проведено порівняльний аналіз розрахованого (пропонованого) регулятора і відомого класичного подвійного регулятора струму.

**Ключові слова:** метод поліномів, система керування, активна складова струму, регулятор, частота.

### РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЯГОВОЙ ПЕРЕДАЧЕЙ ДИЗЕЛЬ-ПОЕЗДА ДЭЛ-02

**Д. А. Кулагин**

Запорожский национальный технический университет  
ул. Жуковского, 64, г. Запорожье, 69063, Украина. E-mail: nemix123@rambler.ru

Приведены недостатки существующих регуляторов тока и частоты, а также рассмотрены методы их синтеза. Разработаны регуляторы системы управления тяговой передачей дизель-поезда ДЭЛ-02 методом полиномов, которые позволят получить систему автоматического управления с оптимальными параметрами. Проведен сравнительный анализ рассчитанного (предлагаемого) регулятора и известного классического двойного регулятора тока.

**Ключевые слова:** метод полиномов, система управления, активная составляющая тока, регулятор, частота.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** Аналіз досвіду використання дизель-потягів ДЕЛ-02 [1, 2] дозволив зробити висновок про високу надійність даної вітчизняної розробки та перспективи її використання, проте цей досвід свідчить про низку невіршених технічних проблем у конструкції частотно-керованої асинхронної тягової електропередачі (ЧКАТЕП) дизель-потягів ДЕЛ:

- незадовільні показники регулювання та підтримки сталого значення струму системи ЧКАТЕП, що пояснюється відсутністю якісного регулятора струму в системі автоматичного керування (САК) і призводить до погіршення характеристик роботи дизель-потяга під час зміни навантаження (проковзування колісної пари, рух потяга в гору та згори, наїзд на стики рейок з великим зазором, зміна моменту опору);

- завищені значення робочих та максимальних струмів елементів ЧКАТЕП на стадії проектування та налаштування дизель-потяга через відсутність у швидкодіючого струмообмеження й якісних перехідних характеристик струмового контуру;

- незадовільні гальмівні характеристики, що пояснюються неефективною системою керування ЕП;

- необхідність покращення динаміки розгону, усталеного руху та гальмування з контролем змін прискорення, швидкості та ривка за рахунок створення комбінованого задатчика цих величин;

- пульсації тягового моменту [3–5].

Вирішення даних технічних проблем шляхом комплексної модернізації на основі досвіду синтезу та використання загальнопромислових та транспортних приводів дає змогу створити нову серію технічно більш досконалих дизель-потягів ДЕЛ. Це дозволить прискорити повний перехід «Укрзалізниці» на тягові системи вітчизняного виробництва та в перспективі створити умови для експорту даної тягової одиниці (що є реальним з огляду на конкурентоспроможну ціну, потреби багатьох держав у ди-

зель-потягах та високу технічну якість дизель-потягів ДЕЛ за умови вирішення вказаних проблем).

Українськими вченими досліджуються питання проведення модернізації дизель-потягів ДЕЛ [4–6], зокрема загальнотеоретичні питання побудови інформаційних систем керування на основі нейронних мереж та штучного інтелекту, оптимізації руху та режимів роботи потяга, побудови математичних моделей складових САК. Дані дослідження, що сприяють значному покращенню якостей руху дизель-потягів ДЕЛ, допомогли вирішити значну кількість технічних задач, що існували на початкових стадіях впровадження у виробництво дизель-потягів ДЕЛ, проте вказані вище проблеми залишилися не розв'язаними запропонованими засобами.

Модернізована САК повинна містити наступні елементи керування:

- регулятор струму;
- регулятор частоти;
- комбінований задатчик руху потяга з можливістю обмеження швидкості наростання струму;
- блоки обмеження потужності споживання ТЕП залежно від рівня завантаження дизеля;
- блоки, що враховують пружні зв'язки, деформацію між елементами ЧКАТЕП, зазори в кінематичному зв'язку АД та елементах візка і вагона, екіпажної частини, фізичний знос колісних пар [1, 2].

Метою даної роботи є розробка регуляторів струму та частоти САК ЧКАТЕП дизель-потяга ДЕЛ-02.

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.** Використання класичних форм регуляторів струму не завжди дозволяє отримати якісні перехідні процеси в контурі струму [7]. При аналізі роботи [7] виявлено якісний універсальний спосіб компенсації електрорушійної сили (ЕРС) обертання асинхронного двигуна (АД), який, разом з цим, дозволяє в більшості випадків знехтувати внутрішніми перехресними зв'язками АД [7]. Він полягає у застосуванні подвійного регулятора струму, який синтезовано за

відомою структурною схемою регулювання [7] методами підпорядкованого регулювання.

До недоліків останнього слід віднести:

- складність та відсутність наглядності процесу синтезу регуляторів;

- необхідність проведення громіздких структурних перетворень у процесі синтезу;

- нестабільна робота отриманих регуляторів при відхиленні фактичних значень величин, що входять до складу регулятора, в процесі роботи.

Для синтезу нового регулятора струму скористаємося методом поліномів, основи якого розглядаються багатьма авторами [8–11]. Це дозволить отримати САК, установки параметрів якої залишаться незмінними в процесі експлуатації системи незалежно від змін її параметрів [9–11], яка, порівняно з традиційними системами, буде мати мінімальні ускладнення, високу швидкість та стандартні налаштування [10] і за дослідженнями [8, 10] робить отриману САК стійкою до варіації параметрів об'єкта керування та похибок налаштування зворотних зв'язків.

На підставі проведеного автором синтезу регулятора отримано передаточну функцію першого регулятора струму:

$$W_{\text{дн1}}(p) = \frac{R_s(T_s p + 1)(m_2 p^2 + m_1 p + m_0)}{(n_2 p^2 + n_1 p + n_0) p k_0} \quad (1)$$

та другого регулятора струму:

$$W_{\text{дн2}}(p) = \frac{1}{4T_\mu p}, \quad (2)$$

де  $T_s, T_\mu$  – малі постійні часу відповідно статора АД та перетворювача частоти ЧКАТЕП;  $m_2, m_1, m_0, n_2, n_1, n_0$  – коефіцієнти регулятора, що отримуються методом поліномів для об'єкта керування;  $k_0$  – коефіцієнт підсилення об'єкта керування.

Для оцінки швидкодії отриманої передаточної функції регулятора порівняємо його перехідну характеристику з характеристикою відомого класичного подвійного регулятора струму [7].

На основі даних про тяговий двигун дизель-потяга ДЕЛ-02 побудуємо перехідні характеристики (реакція на одиничний східчастий сигнал) синтезованого подвійного регулятора (1), (2) та відомого подвійного регулятора струму [7], що показані на рис. 1.

Також на рис. 1 наведено характеристику синтезованого регулятора з урахуванням множника при другому степені чисельника передаточної функції (1) в передаточній функції ПЧ з фільтром – крива 4. Як видно з наведеного графіку, спрощення даного множника є припустимим з огляду на ідентичну поведінку регулятора як з даним множителем, так і без нього.

Побудова характеристик здійснюється автоматично за допомогою математичної програми ЦУМПУ [12] на основі вводу отриманих залежностей, що описують регулятор.

З рис. 1 видно, що відомий подвійний регулятор швидше досягає необхідного рівня сигналу завдання завдяки наявності перерегулювання на рівні близько

5 %, яке відсутнє у синтезованого регулятора (через розподіл його коефіцієнтів за стандартними оптимальними методиками, в яких не закладено перерегулювання, для забезпечення стійкості перехідних процесів до зміни параметрів кіл регулювання).

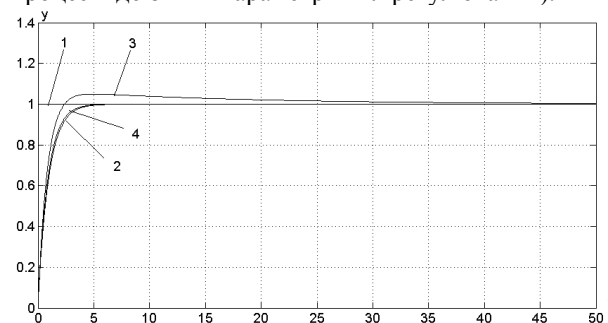


Рисунок 1 – Характеристики синтезованого подвійного регулятора (2) та відомого подвійного регулятора струму (3) при реакції на одиничний сигнал завдання (1)

На рис. 2 зображено збільшення масштабу ділянки часу графіків рис. 1 на рівні досягнення сигналу завдання 0,9 від встановленого. Різниця в часі досягнення складає 1,34 рази на користь відомого подвійного регулятора. Проте, час досягання заданого сигналу синтезованим регулятором вкладається в межі 9–12 мс, що є припустимим показником для тягових електропередач.

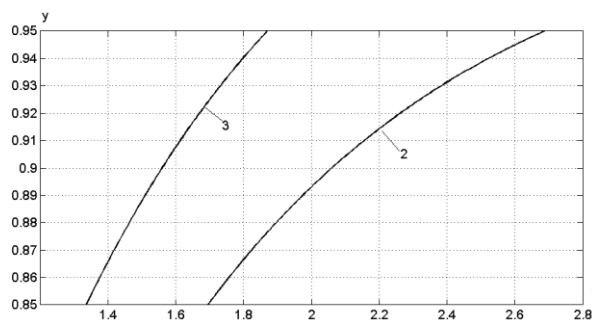


Рисунок 2 – Характеристики синтезованого подвійного регулятора (2) та відомого подвійного регулятора струму (3) при реакції на одиничний сигнал завдання на рівні 0,9 від досягнення сигналу завдання

Варіація значень активного опору статорного кола тягового АД для роботи тягової електропередачі в межах від  $-40$  до  $+50$  °С зміни температури її елементів складає 1,5-кратну зміну (при початку роботи дизель-потяга взимку за від'ємної температури та подальшому нагріванні елементів тягової електропередачі в процесі роботи), проте САК, синтезовані традиційними підходами, на відміну від синтезованих методом поліномів, не можуть при цьому забезпечити необхідної якості керування.

Перевіримо якість перехідної характеристики синтезованого регулятора струму при збільшенні та зменшенні опору статорного кола АД у 1,5 рази від номінального значення (рис. 3).

Перевіримо також роботу відомого подвійного регулятора струму при аналогічній зміні опору ста-

торного кола АД у 1,5 рази від номінального значення (рис. 4).

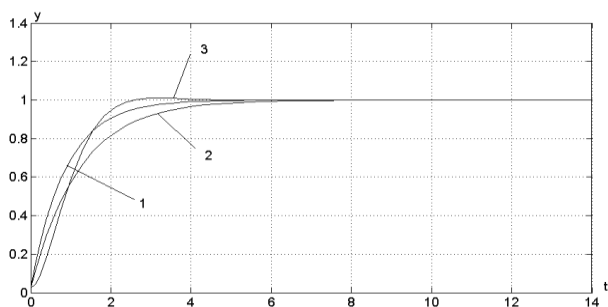


Рисунок 3 – Характеристики синтезованого подвійного регулятора струму при номінальному значенні опору статорного кола (1), при збільшенні в 1,5 рази від номінального значення (2) та зменшенні в 1,5 рази опору статорного кола від номінального (3)

З наведених перехідних процесів (рис. 4) видно, що регулятор, синтезований методом підпорядкованого регулювання при аналогічній зміні опору статорного кола АД у 1,5 рази від номінального значення, показує нестабільні перехідні характеристики: при зменшенні опору статорного кола з'являється значне перерегулювання на рівні 44 %, а при збільшенні опору статорного кола значно зменшується швидкість регулятора.

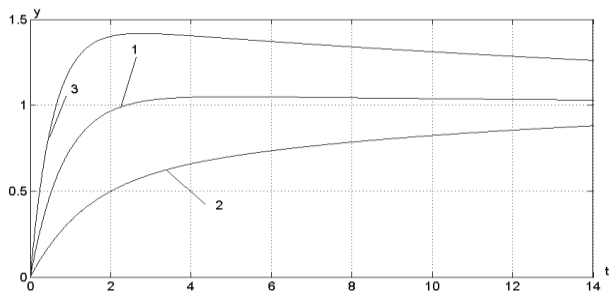


Рисунок 4 – Характеристики відомого класичного подвійного регулятора струму при номінальному значенні опору статорного кола (1), при збільшенні в 1,5 рази від номінального значення (2) та зменшенні в 1,5 рази опору статорного кола від номінального (3)

Це доводить неоптимальну роботу регуляторів, синтезованих класичними підходами при варіації параметрів об'єкта регулювання.

Наведені перехідні характеристики показують стабільність роботи отриманого регулятора при варіації активного опору статорного кола АД у 1,5 рази.

**ВИСНОВКИ.** Синтезовано регулятори САК ЧКАТЕП дизель-потяга ДЕЛ-02 методом поліномів. Отримано оптимальну роботу контуру регулювання струму в межах 1,5 рази відхилення активних опорів кіл системи від номінального значення. Зменшено перерегулювання перехідного процесу за струмом на 5 % порівняно з класичним подвійним регулятором струму. Наведений підхід синтезу дозволив значно спростити процес синтезу та налаштування

порівняно з класичними методами синтезу САК.

#### ЛІТЕРАТУРА

- Кулагін, Д.О., Качур О.С., Андрієнко П.Д. Моделювання квазівекторної системи частотно-регульованого електроприводу асинхронного двигуна без давача швидкості // Вісник НТУ «ХП». – 2008. – № 30. – С. 168–170.
- Кулагін, Д.О., Качур О.С., Андрієнко П.Д. Двобічне квазівекторне регулювання швидкості обертання тягового двигуна дизель-поїзда ДЕЛ-02 // Вісник КДУ ім. М. Остроградського. – 2010. – № 4 (63). – С. 15–18.
- Протоколи випробувань № 80-85/2005. О результатах поездных испытаний электропередачи дизель-поезда ДЭЛ-02. – Холдинговая компания «Лугансктепловоз», ЦКБ ИЦ «ТРАНССЕРТ», 2005. – 157 с.
- Носков, В.И., Дмитренко В.Д., Заповольский Н.И., Леонов С.Ю. Моделирование и оптимизация систем управления и контроля локомотивов. Научное издание. – Харьков: ХФИ «Транспорт Украины», 2003. – 248 с.
- Басов Г.Г. Прогнозування розвитку дизель-поїздів для залізниць України: Монографія. – Ч. 1. – Харків: Апекс+, 2004. – 240 с.
- Орловский И.А., Кулешов А.Н. Учет упругих связей и распределенной нагрузки при векторном управлении асинхронным тяговым приводом дизель-поезда // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. В. Лазаряна. – 2007. – № 19. – С. 209–213.
- Андрієнко П.Д. Тиристорные преобразователи частоты с автономными инверторами для регулируемых электроприводов. Дис. на соискание ученой степени доктора технических наук. – ВНИИ Преобразователь. – Запорожье, 1982. – 341 с.
- Акимов Л.В., Долбня В.Т., Клепиков В.Б., Пирожок А.В. Синтез упрощенных структур двухмассовых электроприводов с нелинейной нагрузкой. – Харьков: НТУ «ХПИ», Запорожье: ЗНТУ, 2002. – 160 с.
- Толочко О.И. Применение метода стандартных полиномов при синтезе систем подчиненного регулирования // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – Луганськ, 2003. – № 4 (62). – С. 114–120.
- Гурентьев Е.А. Разработка и исследование робастной системы управления частотно-регулируемым асинхронным электроприводом на основе полиномиальных методов. Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. технических наук. – Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина. – Екатеринбург, 2010. – 23 с.
- Porter, R. Crossley. Modal Control: Theory and Applications. – New York: Barnes and Noble, 1972. – 233 p.
- Автоматизированное схемотехническое проектирование силовых преобразовательных устройств ЦУМПУ – ЕС-2.0 – Комплекс программ. – К.: Реклама, 1987. – 4 с.

## DEVELOPMENT OF ELEMENTS OF CONTROL SYSTEM BY THE HAULING TRANSMISSION OF A DIESEL-LOCOMOTIV DEL-02

**D. Kulagin**

Zaporizhzhya National Technical University

vul. Zhukovskogo, 64, Zaporizhzhya, 69063, Ukraine. E-mail: nemix123@rambler.ru

Given the shortcomings of existing controls current and frequency, as well as the methods for their synthesis. Developed traction control system controls the transfer of diesel-train DEL-02 by polynomials, which will provide automatic control system with optimal parameters. Comparative analysis the calculated (proposed) and a known regulator of the classical double-current regulator.

**Key words:** the method of polynomials, a control system, an active component of a current, a regulator, frequency.

## REFERENCES

1. Kulagin D.O., Kachur O.S., Andrienko P.D. Modeling kvazivektor of variable-frequency electric induction engines-guna without speed sensor // *Bulletin of the National Technical University "KPI"*. – 2008. – № 30. – PP. 168–170. [in Ukrainian]
2. Kulagin D.O., Kachur O.S., Andrienko P.D. Two-zone kvazivektor regulation speed traction engine diesel train Del-02 // *Bulletin of the Kremenchuk Mykhaylo Ostrohradskyi State Polytechnic University*. – 2010. – № 4 (63). – PP. 15–18. [in Ukrainian]
3. Test № 80-85/2005. The results of testing power train diesel train DAL-02. – Holding company "Luganskteplovoz" CDB IC "TRANSCERT", 2005. – 157 p. [in Russian]
4. Noskov V.I., Dmitrenko V.D., Zapolovsky N.I., Leonov S.Y. *Modelling and optimization of management and control of locomotives*. Scientific publication. – Kharkov: KhFI "Transport of Ukraine", 2003. – 248 p. [in Russian]
5. Basov G.G. *Prediction of diesel trains for railways of Ukraine*: Monograph. – Part 1. – H.: Apex + 2004. – 240 p. [in Ukrainian]
6. Orlovsky I.A. Kuleshov A.N. Accounting for elastic ties and distributed load vector control asynchronous traction drive dieseltrains // *News of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*. – 2007. – № 19. – PP. 209–213. [in Russian]
7. Andrienko P.D. Thyristor converter, a frequency inverter for stand-alone regular liruemyh drives. Dis. for obtaining the allowance-term degree of Doctor of Technical Sciences. – VNII «Pryeobrazovatel». – Zaporozhye, 1982. – 341 p. [in Russian]
8. Akimov L.V., Dolbnia V.T., Klepikov V.B., Pirozhok A.V. *Synthesis of simplified structures of two-mass actuators with nonlinear load*. – Kharkov: NTU "KhPI", Zaporozhye: ZNTU, 2002. – 160 p. [in Russian]
9. Tolochko O. Application of the standard polynomials in the synthesis of control systems, the slave // *Bulletin of East Ukraine Volodymyr Dahl National University*. – Lugansk, 2003. – № 4 (62). – PP. 114–120. [in Russian]
10. Gurentev E. Research and development of robust control systems of frequency-controlled asynchronous electric drive based on polynomial methods. Thesis. for the degree of PhD Technical Sciences. – Southern Federal University named after the first Russian President Boris Yeltsin. – Ekaterinburg, 2010. – 23 p. [in Russian]
11. B. Porter, R. Crossley. *Modal Control: Theory and Applications*. – New York: Barnes and Noble, 1972. – 233 p. [in English]
12. Automated schematic design of power converter devices ZUMPU – ES-2.0 – A set of programs. – K.: Reklama, 1987. – 4 p. [in Russian]

Стаття надійшла 27.01.2012.  
Рекомендована до друку  
к.т.н., доц. Каліновим А.П.