

УДК 621.313.333

**ДВОЗОННЕ КВАЗИВЕКТОНЕ РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ОБЕРТАННЯ
ТЯГОВОГО ДВИГУНА ДИЗЕЛЬ-ПОЇЗДА ДЕЛ-02**

Кулагін Д.О., аспірант

Качур О.С., аспірант

Запорізький національний технічний університет

69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64

E-mail: nemix123@rambler.ru

Андрієнко П.Д., д.т.н., проф.

ВАТ "НДІ "Перетворювач"

69041, м. Запоріжжя, вул. Кремлівська, 63А

Обговорюються особливості побудови та двозонної роботи квазивекторної системи керування тяговим електроприводом дизель-поїзда ДЕЛ-02 з використанням внутрішнього контуру регулювання активної складової струму ланки керований випрямляч-автономний інвертор напруги.

Ключові слова: система керування, активна складова струму, регулятор, частота поля.

**ДВУХЗОННОЕ КВАЗИВЕКТОРНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ
ТЯГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ ДИЗЕЛЬ-ПОЕЗДА ДЭЛ-02**

Кулагин Д.А., аспирант

Качур А.С., аспирант

Запорожский национальный технический университет

69063, г. Запорожье, ул. Жуковського, 64

E-mail: nemix123@rambler.ru

Андрієнко П.Д., д.т.н., проф.

ОАО "НДІ "Перетворювач"

69041, г. Запорожье, ул. Кремлёвская, 63А

Обсуждаются особенности построения и двухзонной работы квазивекторной системы управления тяговым электроприводом дизель-поезда ДЭЛ-02 с использованием внутреннего контура регулирования активной составляющей тока звена управляемый выпрямитель-автономный инвертор напряжения.

Ключевые слова: система управления, активная составляющая тока, регулятор, частота поля.

**TWO-REGION KVAZIVECTOR ADJUSTING OF ROTATION SPEED HAULING
ENGINE OF DIESEL-LOCOMOTIVE DEL-02**

Kulagin D., post-graduate student

Kachur O., post-graduate student

Zaporozhye National Technical University

Zaporozhye, 69063, st. Zhukovskogo, 64

E-mail: nemix123@rambler.ru

Andrienko P., prof.

Open joint-stock company "NDI "Preobrazovatel"

Zaporozhye, 69041, st. Kremlevskaya, 63A

Two-region kvazivector control system traction's electric drive of diesel engines-trains DEL-02, features of construction and works are discussed, wich use of an internal contour of regulation of an active component of a current in a link the operated rectifier-independent the pressure inverter.

Keywords: a control system, an active component of a current, a regulator, frequency of a field.

Вступ. Стратегічною метою державної політики України в розвитку залізничного транспорту є створення конкурентоспроможного рухомого складу, а також сучасних вітчизняних потужностей для його виробництва, тобто зменшення залежності України від імпортних поставок залізничного транспорту та запчастин до нього.

Загальна експлуатаційна довжина неелектрифікованих колій на залізницях України становить на сьогодні 12234 км, що в процентному відношенні від всієї довжини головних колій складає 55,9%. В той же час питома вага дизельної тяги в експлуатаційній роботі становить 20%. У зв'язку з різким підвищенням цін на паливо, актуальність проведення

модернізації дизельного парку потягів є нагальною [1].

Пріоритетним напрямком модернізації постає розробка та втілення у виробництво сучасного вітчизняного дизельного поїзда з оптимальними енерго- та паливозатратами. Вирішення цієї задачі можливо досягти при використанні тягових асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором, частотно-керованих тягових електроприводів (ЧКТЕ) на основі IGBT-інверторів та оптимальної системи керування ЧКТЕ. Останнє дозволяє ефективно та з найменшими витратами на модернізацію і розробку, досягти поставленої мети.

Наведені положення підтверджують актуальність та необхідність проведення наукових досліджень в обраному напрямку розробки оптимального алгоритму керування системою приводу дизель-поїздів, задля економічності, зниження витрат на експлуатацію, що і складає напрямок дослідження.

За основу дослідження обрано сучасну модель дизель-поїзда ДЕЛ-02. Основний состав дизель-поїзда - 3 вагони: 2 моторних і 1 причіпний. Схема керування забезпечує можливість експлуатації двох зчленованих дизель-потягів, керованих з одного поста.

Дизель-поїзд ДЕЛ-02 обладнаний тяговою електропередачею змінного струму, що складається з тягового синхронного генератора, перетворювача частоти, асинхронних тягових (по 2 на кожному моторному вагоні) двигунів типу АД906У1. Регулювання напруги ЧКТЕ проводиться методом широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) з наступним переходом на амплітудне регулювання, що забезпечує мінімальні витрати дизельного палива та малі пульсації моменту в динамічних режимах. Комплектний пристрій автоматики (КПА) ЧКТЕ забезпечує роботу електропередачі в режимах тяги й гальмування за оптимальними законами. Зв'язок КПА з пультом керування, дизелем і основними елементами ЧКТЕ виконаний по цифровому каналу CAN. Аналогічним, образом виконаний зв'язок між кабінами машиніста.

Для живлення допоміжного устаткування дизель-поїзда використовується перетворювач власних потреб, який вхідними клемми підключений до випрямляча тягового генератора, на виході перетворювача підтримується стабільна напруга 220В, 50 Гц. Система опалення вагонів забезпечується від стабілізатора напругою 750 В.

У схемі електропередачі повністю виключена контактна апаратура.

Приводний (силовий) модуль MTU являє собою автономне обладнання, що складається з дизеля, тягового генератора фірми Siemens, повітряного фільтра, радіатора (холодильника), глушителя й системи життєзабезпечення дизеля.

Дизель-поїзд обладнаний мікропроцесорною системою контролю й діагностики роботи силового модуля й електропередачі з висвітленням поточної інформації на монітор пульта керування.

Аналіз попередніх досліджень. Дизель-поїзд ДЕЛ-02 поєднує в собі високий ступінь комфорту й

безпеки руху, численні інноваційні розробки й сучасний дизайн. Але існуюча система керування ЧКТЕ має технічні недоліки Даній системі ЧКТЕ притаманна велика пульсація струму та, як наслідок, тягового моменту, що призводить до необхідності її модернізації [2]. Проведена авторами статті попередня модернізація ЧКТЕ [3], під час якої було впроваджено систему ЧКТЕ зі змінним алгоритмом керування та подвійним регулятором струму до каналу керування автономним інвертором напруги (АІН) дизель-поїзда ДЕЛ-02, показала можливість ефективної реалізації системи ЧКТЕ зі змінним алгоритмом керування та подвійним регулятором струму на базі автономного інвертора напруги з широтно-імпульсною модуляцією (зменшено перерегулювання активної складової статорного струму на 26% чим досягнуто стабільність тягового моменту) для дизель-поїзда ДЕЛ-02.

Проте залишилось неохопленим питання переходу системи ЧКТЕ до другої зони керування (двобічний режим), що дозволяє проводити збільшення швидкості обертання тягового двигуна та, відповідно, регулювання у другій зоні роботи, за енергозощаджувачими законами з мінімальними пульсаціями струму та постійним тяговим моментом дизель-поїзда.

Мета роботи. 1. Виявлення особливостей переходу між алгоритмами регулювання системи ЧКТЕ (ШІМ, амплітудним та двобічним).

2. Практичне втілення можливості переходу до двобічного керування моделі системи ЧКТЕ дизель-поїзда ДЕЛ-02.

3. Дослідження характерних рис поведінки системи ЧКТЕ при двобічному регулюванні.

Матеріал і результати дослідження.

Розглянувши осцилограму струму існуючої системи ЧКТЕ у двобічному режимі, що наведено на рис.1, спостерігаємо нестабільність підтримки струму, що призводить до нестабільного тягового моменту двигуна. Тобто дана система не підтримує якісної форми кривої струму ані під час розгону [3], ані під час усталеної роботи у другій зоні регулювання. Це негативно впливає на режим роботи обладнання, що входить до складу ЧКТЕ, або призводить до потреби завищення його номінальних параметрів на стадії проектування.

Запропонована раніше система керування ЧКТЕ [3] була доопрацьована задля можливості реалізації режиму двобічної роботи.

Регулювання роботи ЧКТЕ проводилося відповідно до структурної схеми, рис.2. На даній схемі прийнято наступні позначення: КПА – комплектний пристрій автоматики, ЗРП – датчик руху поїзда, ω – сигнал каналу зворотного зв'язку за швидкістю обертання двигуна, $k_c f$ – сигнал зворотного зв'язку за частотою поля статора, $k_c I_a$ – сигнал зворотного зв'язку за активною складовою струму ланки керований випрямляч-автономний інвертор напруги, $W_{p.c.}(p)$ – передаточна функція регулятора частоти, $W_{p.c.1}(p)$ та $W_{p.c.2}(p)$ – відповідно передаточні функції двох частин подвійного регулятора струму.

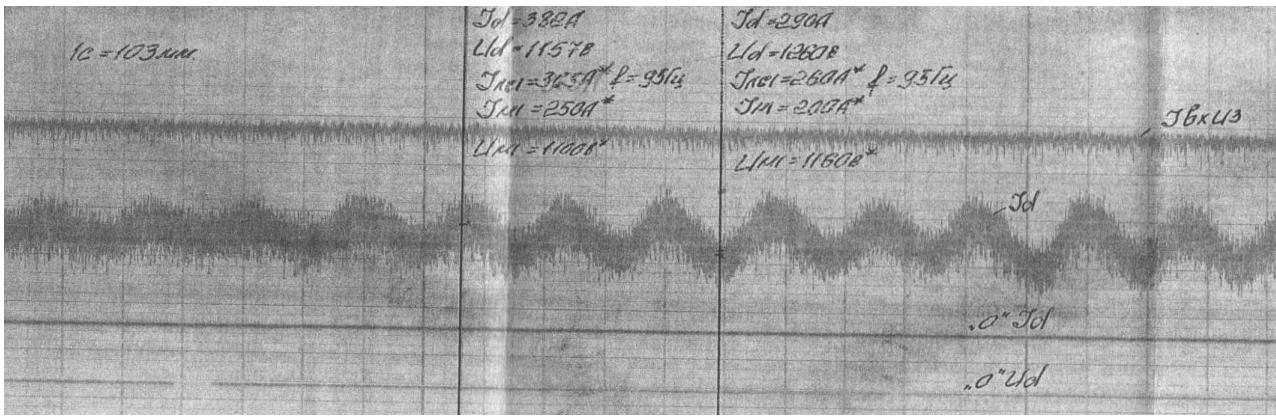


Рисунок 1 – Осцилограма перехідних процесів у ланці постійного струму дизель-поїзда ДЕЛ-02 при розгоні з існуючою системою керування ЧКТЕ

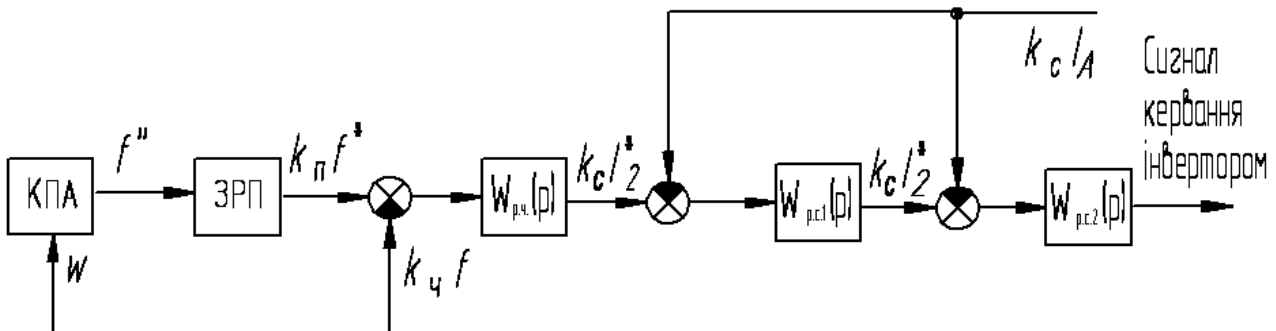


Рисунок 2 – Осцилограма перехідних процесів у ланці постійного струму дизель-поїзда ДЕЛ-02 при розгоні з існуючою системою керування ЧКТЕ

В розробленій системі ЧКТЕ передаточні функції відповідних регуляторів прийнято рівними [4]:

1. Вважаючи, що контур регулювання струму налаштовано за технічним оптимумом, маємо передаточну функцію регулятора частоти, що налаштовано теж за технічним оптимумом:

$$W_{p.c.1}(p) = \frac{\kappa_c \cdot J}{4 \cdot T_\mu \cdot \psi_r \cdot \kappa_\mu \cdot \kappa_r}, \quad (1)$$

де κ_c та κ_μ – коефіцієнти передачі за струмом та частотою обертання; T_μ – стала часу випрямляча; J – приведений момент інерції привода; p – оператор Лапласа; ψ_r – модуль вектора потокозчеплення ротора АД.

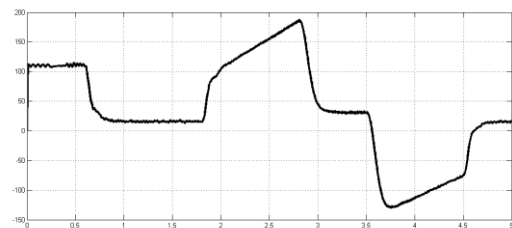
2. Синтезований методом підпорядкованого регулювання подвійний регулятор струму, що налаштовано на технічний оптимум, має вигляд:

$$W_{p.c.1}(p) = \frac{1}{4 \cdot T_\mu p}, \quad (2)$$

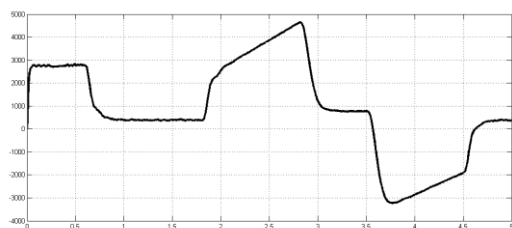
$$W_{p.c.2}(p) = \frac{(1 + T_S p) \cdot (X_c R_d T_d)^2 p^2 + X_c R_d T_d p + 1}{2k_T k_i k_{\theta.n} T_\mu p} \cdot R_S, \quad (3)$$

де R_d , X_c – активний та ємнісний опір фільтра у ланці постійного струму; T_s , T_d – сталі часу обмотки статора та згладжувального реактора; k_i – модуль комутаційної функції автономного інвертора напруги; $k_{\theta.n}$ – коефіцієнт передачі вентиляного перетворювача за напругою. В подальшому авторами буде проведено синтез даних регуляторів за методом поліноміальних рівнянь, що є перспективним з точки зору швидкодії синтезованих регуляторів та простої розрахунку [5].

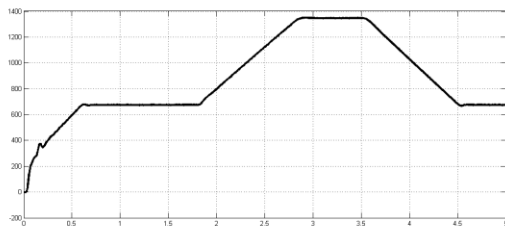
Виходячи з наведеної схеми регулювання ЧКТЕ (рис. 2) та попередньо виконаної роботи з модернізації даного приводу [3] було проведено перехід системи до другої зони регулювання швидкості тягового двигуна типу АД906У1 ($P_{ном}=240$ кВт, $n_{ном}=982$ об/хв, $I_{ном}=135$ А, $f_{ном}=33,8$ Гц, $f_{max}=95$ Гц). На рис. 3 представлено результати моделювання електромеханічних процесів ЧКТЕ. Моделювання моменту пуску (ШІМ та амплітудне регулювання) проводилося за опорної частоти 300 Гц, мала стала часу струмового контуру складала 8 мс.



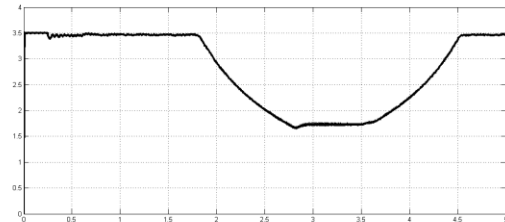
а) (масштаб осі часу 0,5 с/под., осі струму 50 А/под.)



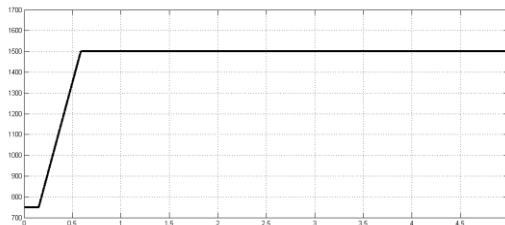
б) (масштаб осі часу 0,5 с/под., осі моменту 1000 Н·м/под.)



в) (масштаб осі часу 0,5 с/под., осі швидкості обертання вала двигуна 200 хв⁻¹/под.)



г) (масштаб осі часу 0,5 с/под., осі потокозчеплення 0,5 Вб/под.)



д) (масштаб осі часу 0,5 с/под., осі напруги 1000 В/под.)

Рисунок 3 – Перехідні процеси модернізованої системи ЧКТЕ з АІН-ШІМ активного струму (а), тягового моменту (б), частоти обертання вала двигуна (в), потокозчеплення ротора (г) та напруги у ланці постійного струму (д) в залежності від часу (вісь абсцис)

На поданих перехідних процесах відображено графік розгону двигуна до номінальної швидкості, процес переходу до другої зони та повернення до номінального режиму. Отриманим перехідним характеристикам властива відсутність пульсацій активної складової струму, сталість тягового моменту.

В початковий момент часу напруга в ланці постійного струму складає 750 В. Це пов'язано з тим, що система живлення власних потреб дизель-поїзда ДЕЛ-02 підключена до основного випрямляча і їй для роботи потрібна завжди наявна напруга 750В. При появі команди від ЗРП на рух поїзда, в діапазоні швидкості обертання двигуна 0-0,5 $n_{ном}$ система ЧКТЕ відпрацьовує команду на набір швидкості за методом широтно-імпульсної модуляції. В діапазоні 0,5 $n_{ном}$ - $n_{ном}$ система здійснює керування за амплітудним методом. При цьому напруга в ланці постійного струму зростає поступово до 1500 В. Для переходу в режим другої зони послаблюється потокозчеплення двигуна і він набирає потрібне значення швидкості обертання. З наведених характеристик процесів (рис. 3) видно, що в моменти переходу між режимами керування ЧКТЕ система якісно тримає активний струм без пульсацій, що забезпечує сталість тягового моменту.

Висновки. 1. Отримано перехідні характеристики системи квазівекторного регулювання системи регулювання швидкості обертання тягового двигуна дизель-поїзда ДЕЛ-02.

2. Результати переходу між режимами керуванням ЧКТЕ та переходу у другу зону регулювання показують стійке підтримання системою заданого рівня швидкості при відсутніх пульсаціях струму та сталому тяговому моменті.

3. Отримана система з огляду на її якісні перехідні характеристики є перспективною до серійного впровадження.

4. Подальші дослідження даного питання плануються проводити в руслі синтезу регуляторів системи ЧКТЕ методом поліноміальних рівнянь та дослідження на отриманій системі впливу налаштування регуляторів та похибок зворотних зв'язків на якість перехідних характеристик. Планується практичне втілення синтезованої системи до промислової мікропроцесорної системи керування дизель-потягом ДЕЛ-02, що випускається ВАТ «НДІ«Перетворювач».

ЛІТЕРАТУРА

1. Носков В.И. Моделирование и оптимизация систем управления и контроля локомотивов. Научное издание / Носков В.И., Дмитренко В.Д., Заполовский Н.И., Леонов С.Ю. – Х.: ХФИ «Транспорт Украины», 2003. – 248 С.

2. Кулагін Д.О. Моделювання квазівекторної системи частотно регульованого електроприводу асинхронного двигуна без давача швидкості / Кулагін Д.О., Качур О.С., Андрієнко П.Д. // Сборник материалов XV международной научно-технической конференции «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика». - Украина: АР Крым. – 2008. – С. 168-170.

3. Кулагін Д.О. Розробка моделі модернізованого частотно-керуваного тягового електропривода зі змінним алгоритмом керування дизель-поїзда ДЕЛ-02 / Кулагін Д.О., Качур О.С., Андрієнко П.Д. // Електротехніка та електроенергетика. – Запоріжжя. – 2010. – №1. – С. 30-34.

4. Андрієнко П.Д. Динамика двухконтурной системы регулирования скорости асинхронного двигателя с обратной связью по частоте / Андрієнко П.Д., Шрейнер Р.Т., Волков А.В. // ЭП. Электропривод. – 1982. - №9. – С. 5-8.

5. Толочко О.И. Применение метода стандартных полиномов при синтезе систем подчиненного регулирования / Толочко О.И. // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – Луганськ. – 2003. – №4 (62). – С. 114-120.