

**Канд. техн. наук Д. О. Кулагін, д-р. техн. наук П. Д. Андрієнко
Запорізький національний технічний університет**

**Дослідження роботи тягової електропередачі дизель-поїзда ДЕЛ-02 при збуреннях в
електричних колах**

Проведено дослідження роботи тягової електропередачі дизель-поїзда ДЕЛ-02 при появі збурень в електричних колах тягового інвертора. Отримано, що вмикання системи опалення, компресорів і т.п. збурюючі чинники не призводять до значних коливань в колах тягового автономного інвертора напруги чи втрати стійкості.

Ключові слова: динаміка, збурення, система автоматичного керування, тяговий інвертор, потужність опалення, тягова електропередача.

Вступ

Накопичений досвід експлуатації дослідних дизель-поїздів ДЕЛ-02 та нові потреби у партіях серійних зразків даної розробки вказали на необхідність удосконалення системи тягової електропередачі, підвищення ефективності роботи (збільшення прискорення руху дизель-поїзда, отримання нормованих перехідних характеристик роботи тягової електропередачі в умовах зовнішніх та параметричних збурень, тощо). Для підвищення ефективності роботи необхідно використовувати методи проектування та синтезу систем керування тяговою електропередачею, що дозволяють отримати збільшення прискорення руху дизель-поїзда, стійкість системи керування до збурень та варіації параметрів контурів тягової електропередачі в процесі роботи [1-3].

Однією з характерних особливостей тягових електропередач з автономними джерелами живлення [4], в яких з'являються специфічні, властиві лише даному класу систем вимоги, є обмеженість потужності джерела живлення. Дана особливість вимагає стійкої роботи синтезованої системи при появі збурень в електричних колах тягової електропередачі, що живиться від автономного джерела живлення. Тому дослідження, присвячені поведінці електричних тягових передач, що живляться від автономних генераторів, є актуальними.

Досвід використання тягових приводів з опорно-рамною підвіскою [6] показав, що наявність в таких приводах спеціальних передавальних механізмів та муфт з еластичними

ланками зменшує власні частоти кутових коливань привода, які перекривають діапазон частот вертикальних коливань екіпажу на пружному шляху і безпосередньо наближуються до частоти кутових коливань парціальної системи привода, зумовлених електромагнітним зв'язком ротора та статора асинхронного двигуна (АД). Тому динамічні властивості тягових приводів, що містять еластичні елементи, можна надійно прогнозувати, лише розглядаючи динамічні процеси в єдиній електромеханічній системі екіпаж-тягова електропередача-шлях, що знаходиться під впливом детермінованих та випадкових впливів [6, 7].

Існує багато підходів до описання та налізу систем з пружними зв'язками [8-12]. Проте, в більшості досліджень опір електричних кіл електродвигуна, жорсткості з'єднувальних елементів, моменти інерції, модель та параметри тертя вважаються відомими та закладаються в алгоритми керування. Роботи, направлені на досягнення робастності алгоритму керування по відношенню до вказаних параметрів [13-15] показали, що використання спостерігачів стану, навіть за відсутності відомостей про модель та параметри тертя дозволяє отримати якісні результати.

Мета роботи - кількісна і якісна оцінка електромеханічних процесів при використанні розроблених елементів системи керування тяговою електропередачею при появі збурень в електричних колах.

Результати дослідження

Система автоматичного керування (САК) дизель-поїзда повинна враховувати особливості деформацій та пружні зв'язки в тяговій електропередачі: деформацію кручення валів, пружну деформацію зубців коліс редуктора, з'єднувальних муфт, фізичний знос колісних пар та ін. Окрім того, механічна частина тягової електропередачі містить, зумовлений неточністю виготовлення вузлів передачі, зазор, що існує між муфтами та зубчастим зчепленням в редукторі. На систему діють зовнішні моменти: момент опору, дисипативні сили, які діють на візок та вагон (сили тертя в підшипниках, сили тертя в зубчастих зчепленнях, рухомих елементах вагону, моменти від деформації кручення валів).

При дослідженні динамічних процесів в тяговій електропередачі є припустимим представлення АД та механічних частин тягової електропередачі у вигляді системи з зосередженими параметрами [11]. Тоді систему тягової електропередачі, що містить АД та певну механічну частину з пружними зв'язками, при дослідженні перехідних процесів можна представити у вигляді двомасової електромеханічної системи (ДЕМС) [11] рис. 1.

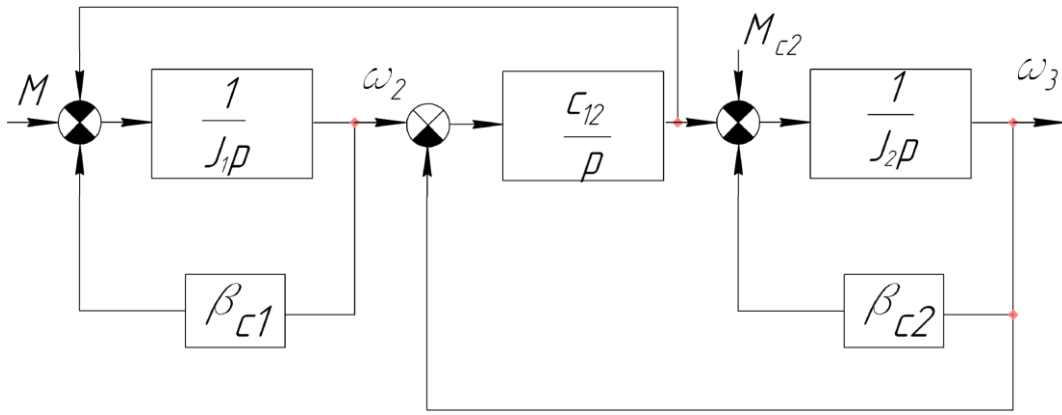


Рис. 1. Структурна схема ДЕМС

На рис. 1 позначено

M – електромагнітний момент АД;

J_1 – момент інерції ротора АД;

J_2 – приведений сумарний момент інерції механічних частин тягової електропередачі;

C_{12} – приведений до вала ротора сумарний коефіцієнт жорсткості зв'язку між елементами тягової електропередачі;

β_{n1} – значення модуля жорсткості механічної характеристики АД;

β_{n2} – коефіцієнт в'язкого тертя;

ω_2 – частота обертання ротора АД;

ω_3 – кутова частота обертання коліс вагона;

M_{c2} – статичний момент опору.

Для аналізу загальних властивостей системи тягової електропередачі запишемо рівняння АД в обертій зі швидкістю ω_{ψ_r} ортогональній системі координат (δ, y) , що орієнтовано віссю x за вектором потокозчеплення ротора АД. Рівняння АД приймають наступний вигляд:

$$\begin{cases} u_{sx} = R_s i_{sx} + \sigma X_s D i_{sx} + k_r D \psi_r - \omega_{\psi_r} \sigma X_s D i_{sy}; \\ u_{sy} = R_s i_{sy} + \sigma X_s D i_{sy} + \omega_{\psi_r} (\sigma X_s D i_{sx} + k_r \psi_r); \\ 0 = \psi_r + T_r D \psi_r - k_r R_r T_r i_{sx}; \\ 0 = -k_r R_r T_r i_{sy} + (\omega_{\psi_r} - \omega_2) \psi_r; \\ M = k_r \psi_r i_{sy}; \\ M = M_c + J_1 D \omega_2. \end{cases} \quad (1)$$

При цьому використано наступну систему позначень:

- індекси "s" та "r" вказують приналежність величини до статора чи ротора;

- індекси “ x ”, “ y ” вказують на приналежність величини проекції вектора певній осі в системі координат (δ, y) ;

- L_M – еквівалентна взаємна індуктивність ротора та статора;

- X_s – реактивний опір статорної обмотки АД;

- u, i, ψ, R, L – напруга, струм, потокозчеплення, активний опір і власна індуктивність;

- z – кількість пар полюсів АД;

- M_c – момент опору АД;

- T – постійна часу;

- D – символ диференціювання за часом.

В (1) прийняті наступні формули для визначення коефіцієнта розсіювання σ та постійної часу ротора T_r :

$$\sigma = 1 - \frac{L_M^2}{L_s L_r}, T_r = \frac{L_r}{R_r} = \frac{L_M}{k_r R_r}. \quad (2)$$

де k_r – коефіцієнт приведення обмоток ротора АД.

В дизель-поїзді ДЕЛ-02 на колісних парах встановлено тахогенератор ТМГ-30, що має номінальну частоту обертання 4000 об/хв.

На рис. 2 наведено відповідну рівнянням (1) структурну схему АД при змінному значенні намагнічуючої складової статорного струму АД i_{sx} , а відповідно й змінному значенні потокозчеплення ротора.

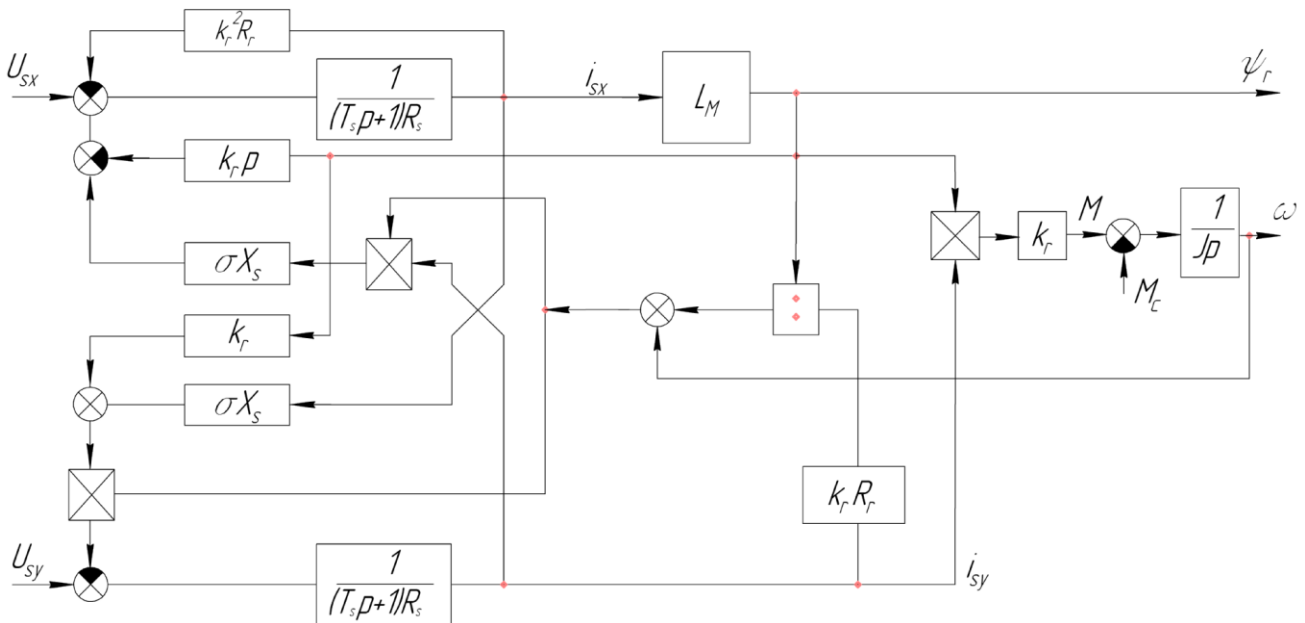


Рис. 2. Структурна схема АД

На рис.2 позначено



- блок множення;



- блок ділення.

Розглянемо динаміку САК тяговою електропередачею дизель-поїзда ДЕЛ-02 [5] при збуренні за навантаженням. Величина усталеного значення відхилення частоти обертання АД $\Delta\omega$ визначається як [16]

$$\Delta\omega = M_{c2} \cdot \frac{R_r}{\psi_r^2}. \quad (3)$$

Враховуючи, що

$$M = k_r \psi_r i_{sy}, \quad (4)$$

де i_{sy} – активна складова статорного струму АД;

та в усталеному режимі роботи тягової електропередачі

$$M = M_{c2}, \quad (5)$$

можна представити (3) як

$$\Delta\omega = \frac{k_r R_r}{\psi_r} \cdot i_{sy} = s_\psi. \quad (6)$$

Тобто при використанні регулятора частоти точність підтримання частоти обертання тягового АД при збуренні за навантаженням визначається величиною ковзання АД.

Тоді статичні механічні характеристики тягової електропередачі представляються родинною відрізків паралельних прямих, з кутом нахилу, що визначається коефіцієнтом $\frac{R_r}{\psi_r^2}$ виразу (3).

При підтримці задатчиком руху поїзда сталого номінального значення модуля вектора потокозчеплення жорсткість статичних механічних характеристик тягової електропередачі на ділянці зміни моменту навантаження до значення, рівного номінальному моменту тягового АД практично рівна жорсткості лінійної частини природної характеристики АД. В діапазоні понад номінального моменту навантаження АД жорсткість характеристик тягової електропередачі значно перевищує жорсткість природної характеристики тягового АД.

Розглянемо роботу тягової електропередачі при появі характерного збурення для системи – вмиканні системи опалення та вимиканні її в процесі руху дизель-поїзда. Потужність, що споживається системою опалення, складає 40 кВт і споживається перетворювачем власних потреб, який підключено до шин некерованого випрямляча, від яких також живиться тяговий інвертор, відповідно до схеми роботи дизель-поїзда ДЕЛ-02 [5].

На рис. 3, 4 показано осцилограми зміни активної складової струму при вмиканні системи опалення в довільний момент часу 16100 відносних одиниць (в.о.) та вимиканні системи опалення в довільний момент часу 19500 в.о.

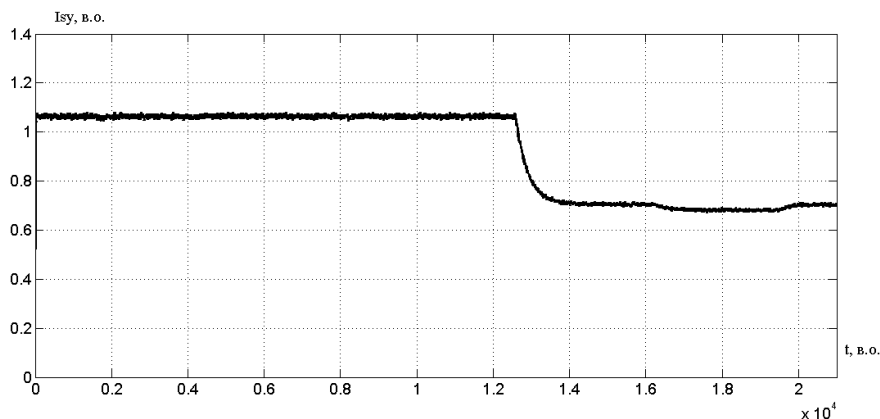


Рис. 3. Перехідний процес активної складової струму при вмиканні та вимиканні системи опалення дизель-поїзда

На рис. 3 до моменту часу 12300 в.о. відбувається рух поїзда з регулюванням тягового інвертора за методом широтно-імпульсної модуляції, а в подальшому відбувається перехід до зони керування з ослабленим потокозчепленням (12300 в.о.-14000 в.о.) і робота в даній зоні (14000 в.о.-21000 в.о.).

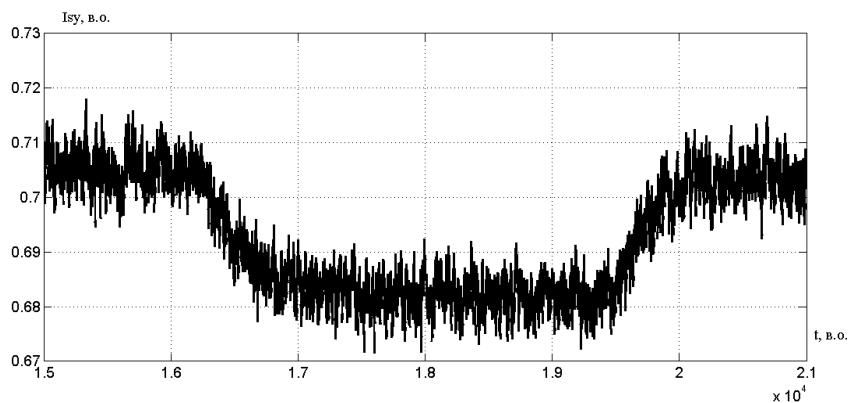


Рис. 4. Розширена діаграма активної складової струму при вмиканні та вимиканні системи опалення дизель-поїзда

Отримані осцилограми показують стійку роботу системи тягової електропередачі при появі даного виду збурення в системі живлення тягового АД. Проведені дослідження показали, що вмикання та вимикання системи опалення призводить до появи збурюючого чинника в колі активної складової струму на рівні 0,011-0,019 в.о., що в абсолютних одиницях складає 2,1-3,62 А. Це досягається завдяки якійсь роботі отриманої системи тягової електропередачі і не призводить до коливань частоти обертання вала ротора тягового АД.

При цьому пульсації зміни тягового моменту склали 0,013-0,015 в.о., що в абсолютних одиницях складає 49,48-57,09 Н·м.

Для порівняння на рис. 5 наведено осцилограму активної складової струму при вмиканні-вимиканні опалення вагонів під час руху дизель-поїзда з попередньою структурою САК (була встановлена на дизель-поїздах ДЕЛ-02 №3-4).

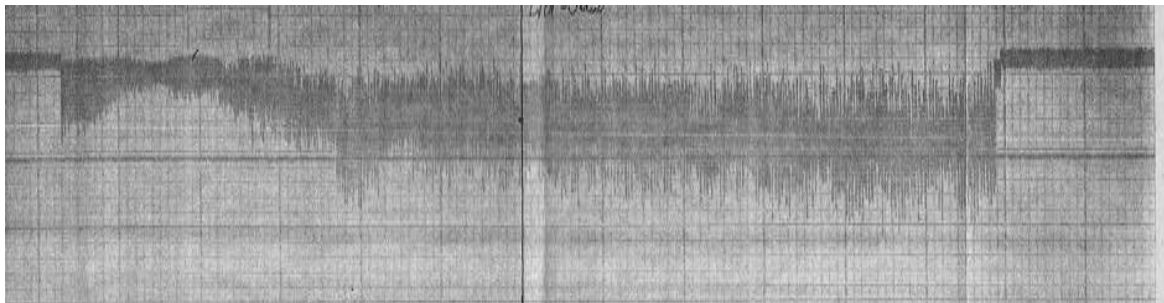


Рис. 5. Осцилограма активної складової струму при вмиканні та вимиканні системи опалення під час руху дизель-поїзда з попередньою структурою САК

На рис. 5 масштаб за віссю часу (вісь абсцис) складає 500 в.о./поділку, за віссю струму (вісь ординат) – 0,5 в.о./поділку.

При порівнянні рис. 3, 4 та рис. 4 видно, що модернізована система, на відміну від існуючої, підтримує стабільне значення активної складової струму при появі збурення в електричному колі тягової електропередачі.

Висновки

1. Досліджено динаміку САК дизель-поїзда ДЕЛ-02 при збуренні за навантаженням. При використанні регулятора частоти точність підтримання частоти обертання АД при збуренні за навантаженням визначається величиною ковзання АД.

2. При підтримці сталого номінального значення модуля вектора поточозчеплення жорсткість статичних механічних характеристик на ділянці зміни моменту навантаження до номінального моменту АД практично рівна жорсткості лінійної частини природної характеристики АД. В діапазоні понад номінального моменту навантаження АД жорсткість характеристик електропередачі значно перевищує жорсткість природної характеристики тягового АД.

3. Досліджено роботу тягової електропередачі при появі характерного збурення для системи – вмиканні системи опалення та вимиканні її в процесі руху дизель-поїзда. Отримані осцилограми показують стійку роботу системи тягової електропередачі при появі даного виду збурення в системі живлення тягового АД.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Басов Г. Г. Прогнозування розвитку дизель-поїздів для залізниць України : Монографія. Ч. 1 / Басов Г. Г. – Х. : Апекс+, 2004. – 240 С.
2. Дизель-поезда с механической передачей // Железные дороги мира. – 2006. – № 10. – С. 25–27.
3. Локомотив для Европы без границ // Железные дороги мира. – 2008. – № 4. – С. 35–41.
4. Григораш О. В. Современное состояние и перспективы применения асинхронных генераторов в автономной энергетике / Григораш О. В. // Промышленная энергетика. – 1995. – № 3. – С. 29–33.
5. Кулагін Д. О. Двоступенне квазівекторне регулювання швидкості обертання тягового двигуна дизель-поїзда ДЕЛ-02 / Кулагін Д. О., Качур О. С., Андрієнко П. Д. // Вісник КДУ ім. М. Остроградського. – 2010. – № 4 (63). – С. 15–18.
6. Павленко А. П. Динамика тяговых приводов магистральных локомотивов / А. П. Павленко. – М. : Машиностроение, 1991. – 192 С.
7. Демин Ю. В. Автоколебания и устойчивость движения рельсовых экипажей / Ю. В. Демин, Л. А. Длугач, М. Л. Коротенко, О. М. Маркова. – К. : Наукова думка, 1984. – 159 С.
8. Борцов Ю. А. Тиристорные системы электроприводов с упругими связями / Борцов Ю. А., Соколовский Г. Г. – Л. : Энергия, 1979. – 160 С.
9. Башарин А. В. Управление электроприводами / А. В. Башарин, В. А. Новиков, Г. Г. Соколовский. – Л. : Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. – 392 С.
10. Волянский Р. С. Оптимальное управление двухмассовым асинхронным электроприводом с люфтом / Р. С. Волянский, А. В. Садовой, // Электротехника. – 2004. – №6. – С. 11–14.
11. Акимов Л. В. Синтез упрощенных структур двухмассовых электроприводов с нелинейной нагрузкой / Акимов Л. В., Долбня В. Т., Клепиков В. Б., Пирожок А. В. – Х. : НТУ «ХПИ», Запорожье : ЗНТУ, 2002. – 160 С.
12. Клепиков В. Б. О проблеме фрикционных автоколебаний в электроприводах машин и механизмов / Клепиков В. Б. // Электричество. – 1986. – № 4. – С. 59–62.
13. Высокоточное управление скоростью двухмассовой неопределенной электромеханической системой / Е. М. Потапенко, А. Е. Казурова, Е. В. Душинова, Н. В. Ивочка. // Радіоелектроніка, інформатика, управління. Науковий журнал. – 2009. – № 1(20). – Запоріжжя : ЗНТУ, 2009. – С. 147–154.
14. Потапенко Е. М. Высокоточное управление упругой электромеханической системой

- с нелинейным трением [текст] / Е. М. Потапенко, А. Е. Казурова // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – 2008. – № 1 (21). – С. 118–125.
15. Толочко О. І. Аналіз та синтез електромеханічних систем зі спостерігачами стану: Навчальний посібник / Толочко О. І. – Донецьк : Норд-Прес, 2004. – 298 С.
16. Андриенко П. Д. Динамика двухконтурной системы регулирования скорости асинхронного двигателя с обратной связью по частоте / Андриенко П. Д., Шрейнер Р. Т., Волков А. В. // ЭП. Электропривод. – 1982. – № 9. – С. 5–8.

Кулагин Д.А., Андриенко П.Д. Исследование работы тяговой электропередачи дизель-поезда ДЕЛ-02 при возмущениях в электрических цепях

Проведено исследование работы тяговой электропередачи дизель-поезда ДЕЛ-02 при появлении возмущений в электрических цепях тягового инвертора. Получено, что включение системы отопления, компрессоров и т.п. возмущающие факторы не приводят к значительным колебаниям в цепях тягового автономного инвертора напряжения или потери устойчивости.

Ключевые слова: динамика, возмущения, система автоматического управления, тяговый инвертор, мощность отопления, тяговая электропередача.

Kulagin D., Andrienko P. A study of the traction power of diesel-trains DEL-02 during the disturbances in electric circuits

Conducted a study of the traction power of diesel-trains DEL-02 when there are the disturbances in electric circuits of traction inverter. It is obtained that the inclusion of heating systems, compressors, etc. the perturbing factors does not lead to considerable fluctuations in the circuits of traction autonomous inverter voltage or loss of stability.

Key words: dynamics, perturbation, automatic control system, traction inverter, heating power, the pulling power transmission.