

Д.О. Кулагін

П.Д. Андрієнко, д-р техн. наук

## ВРАХУВАННЯ ДІЇ ПРУЖНИХ ЗВ'ЯЗКІВ ТА ЧАСТИН НА РОБОТУ ТЯГОВОЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ АВТОНОМНОГО ЛОКОМОТИВА

*Наведено результати синтезу регулятора частоти системи автоматичного керування тяговим інвертором дизель-поїзда ДЕЛ-02 з врахуванням дії пружних зв'язків та частин на основі методу поліномів.*

*Приведены результаты синтеза регулятора частоты системы автоматического управления тяговым инвертором дизель-поезда ДЕЛ-02 с учетом действия упругих связей и частей на основе метода полиномов.*

*Given the results of the synthesis of frequency regulator of the system of automatic control of traction inverter diesel-train DEL-02 with taking into account action of the elastic ties and parts on the basis of the method of polynomials.*

### Вступ

Дизель-поїзд є різновидом моторвагонного рухомого складу, що отримує енергію від дизеля. Для підвищення ефективності роботи автономних локомотивів з асинхронною тяговою електропередачею необхідно використовувати методи проектування та синтезу систем керування тяговою електропередачею, що дозволяють отримати високу динаміку руху дизель-поїзда, стійкість системи керування до збурень та варіації параметрів контурів тягової електропередачі в процесі роботи.

Метод поліномів, що використовується для синтезу регуляторів та структур систем керування, дозволяє виконати перелічені вимоги та отримати більш стійку роботу об'єкта керування в порівнянні з традиційними підходами до проектування [1-3]. Використання даного методу при розробці системи тягової електропередачі дизель-поїздів ДЕЛ-02 є перспективним для оптимізації та покращення тягових, динамічних та енергетичних характеристик.

### Аналіз попередніх досліджень

Використання регуляторів, синтезованих методом поліномів у системах електроприводів апробовано та обґрунтовано з точки зору отриманих перехідних характеристик [1-3].

© Кулагін Д.О., Андрієнко П.Д., 2012.

При цьому питання зменшення залежності від зміни параметрів об'єкта керування методами синтезу регуляторів САК та оптимального синтезу регуляторів є актуальним, та розглядається багатьма авторами [4-6].

Метод поліномів дозволяє проводити оцінку параметрів процесів тягової електропередачі на основі використання усереднених характеристик у вигляді коефіцієнтів характеристичних поліномів як даних, що описують процеси у системі автоматичного керування (САК) [1, 3, 4, 6].

Рекомендації та проаналізований досвід авторів [1, 4, 7, 8] показують, що складні системи з пружними зв'язками між елементами можна описувати та синтезувати у вигляді двомасових електромеханічних систем (ДЕМС), в яких комплекс пружних мас замінюється еквівалентною дією однієї пружної маси без значних якісних порушень синтезованої САК за такого припущення. Даний підхід є актуальним для використання при синтезі САК дизель-поїзда, де існує цілий ряд пружних елементів в системі тягової електропередачі (муфти, демпфери, амортизатори, пружини, ресори) [9].

**Мета роботи** - синтез регулятора частоти системи автоматичного керування тяговою електропередачею автономного локомотива, який буде враховувати наявні пружні зв'язки між елементами передачі дизель-поїзда.

## Матеріал і результати дослідження

САК регулювання частоти обертання ротора асинхронного двигуна (АД) з регулятором частоти та зворотнім зв'язком за частотою потокозчеплення статора при рівності постійної часу каналу зворотного зв'язку за частотою електромеханічній постійній часу тягової електропередачі еквівалентна відомим системам зі зворотнім зв'язком за частотою обертання ротора [9].

Комплексний пристрій автоматики (КПА), що керує роботою дизель-поїзда, містить в собі регулятор ковзання тягового АД, тобто задає тяговий момент електропередачі. Для врахування завдання ковзання САК повинна враховувати змінність в часі ковзання АД, тобто зміну модуля жорсткості механічної характеристики АД.

Для керування реальними механізмами САК 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 розподілено 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 [10]. Тоді систему тягової електропередачі, що містить АД та певну механічну частину з пружними зв'язками для дослідження перехідних процесів можна представити у вигляді двомасової електромеханічної системи [10] рис. 1.

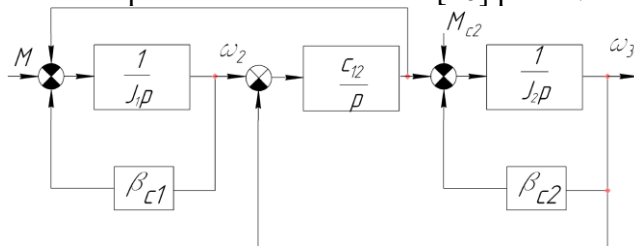


Рис. 1. Структурна схема ДЕМС

На рис. 1 позначено:

$J_1$  – момент інерції ротора АД;

$J_2$  – приведений сумарний момент інерції механічних частин тягової електропередачі;

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

$\beta_{\text{п1}} = \frac{2 \cdot M}{s_{\psi} \cdot \omega_s}$  – значення модуля жорсткості механічної характеристики АД;

$\omega_s$  – синхронна кутова частота (швидкість) ротора АД;

$\beta_{\text{п2}} = \frac{dM}{d\omega_3}$  – значення жорсткості механічної характеристики навантаження;

$\omega_3$  – кутова частота (швидкість) обертання коліс вагона;

$M_{c2}$  – статичний момент опору.

В САК немає безпосереднього зворотного зв'язку за сигналом  $\omega_3$ , що необхідний для врахування дії пружних зв'язків та корекції процесів в тяговій електропередачі згідно зі схемою рис. 1. Згідно з аналізом в [8, 10] розрахунок і формування сигналу  $\omega_3$  та врахування дії пружних зв'язків на кутову частоту (швидкість) обертання вала ротора АД  $\omega_2$  можна здійснювати непрямим чином на основі математичної реалізації даної частини схеми в блоці системи керування автономним інвертором напруги.

Відповідно до досліджень [11] за відсутності безпосереднього зворотного зв'язку за сигналом  $\omega_3$  дію пружних зв'язків на роботу об'єкта можна врахувати за допомогою апроксимованої ланки з передаточною функцією

Відповідно до досліджень [11] за відсутності безпосереднього зворотного зв'язку за сигналом  $\omega_3$  дію пружних зв'язків на роботу об'єкта можна врахувати за допомогою апроксимованої ланки з передаточною функцією

$$W_{i1}(p) = \frac{T_{2i}^2 p^2 + 1}{T_{12}^2 p^2 + 1}, \quad (1)$$

де постійна часу вільних коливань ДЕМС [11]

$$T_{12} = \sqrt{\frac{J_1 + J_2}{J_{\Sigma} C_{12}}}, \quad (2)$$

постійна часу коливань другої маси ДЕМС [11]

$$T_{2i} = \sqrt{\frac{J_2}{C_{12}}}. \quad (3)$$

На рис. 2 наведена схема системи регулювання частоти ДЕМС з врахуванням ланки (1).

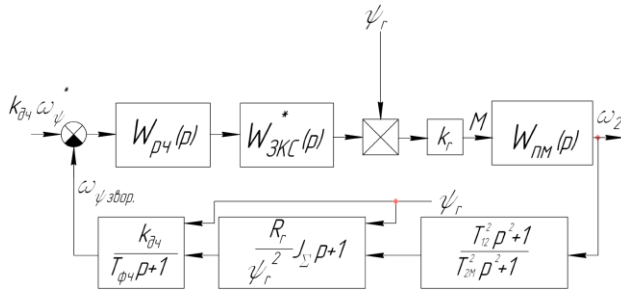


Рис. 2. Структурна схема системи регулювання частоти ДЕМС

На рис. 2 позначено:

$W_{рч}(p)$  – передаточна функція регулятора частоти;

$k_{дч}$  – коефіцієнт передачі каналу зворотного зв'язку за частотою ДЕМС;

$\omega^* \psi$  – завдання на частоту;

$W_{зкц}(p)$  – передаточна функція замкнутого контуру регулювання струму;

$T_{фч}$  – постійна часу фільтра каналу зворотного зв'язку за частотою;

$J_{\Sigma}$  – приведений до вала ротора АД момент інерції елементів тягової передачі.

Постійна часу фільтра  $T_{фч}$  обирається з умови

$$\frac{R_r}{\psi_r} J_{\Sigma} p + 1 = T_{\delta \div} p + 1 \quad (4)$$

Тоді з (4) маємо:

$$T_{\delta \div} = \frac{R_r \cdot J_{\Sigma}}{\psi_r} \quad (5)$$

Запишемо передаточну функцію ДЕМС, виконаної згідно з рис. 2.

Коефіцієнт підсилення об'єкта:

$$k_0^* = \frac{k_0}{\beta_{C1} \cdot \beta_{C2}} \quad (6)$$

Прийmemo стандартні для ДЕМС позначення відповідно до рекомендацій [1]:

$$\begin{cases} \gamma = \frac{J_1 + J_2}{J_2}; \\ \Omega_{12}^2 = \frac{C_{12} \gamma}{J_2}; \\ T_1 = \frac{J_1 + J_2}{\beta_{C1}}. \end{cases} \quad (7)$$

Тоді для передаточної функції ДЕМС з урахуванням (7) одержимо:

$$W_{\text{дв}}^*(p) = \frac{k_0^* \left( \frac{\gamma}{\Omega_{12}^2} p^2 - \frac{\beta_{C2}}{C_{12}} p + 1 \right) \times}{\left( \frac{T_1}{\Omega_{12}^2} p^3 + \frac{\gamma}{\Omega_{12}^2} \left( 1 - \frac{\beta_{C2}}{\beta_{N1}(\gamma-1)} \right) p^2 + \right.} \quad (8)$$

$$\left. \times \frac{1}{(T_s p + 1)(T_{\mu} p + 1)(R_d X_c p + 1) R_s} \right) \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{1}{\left( T_1 - \frac{\beta_{C2}}{C_{12}} \right) p + \left( 1 - \frac{\beta_{C2}}{\beta_{N1}} \right)}.$$

Для синтезу регулятора частоти знайдемо передаточну функцію замкнутого контуру струму. За [12] запишемо апроксимовані передаточні функції внутрішнього контуру струму та об'єкта регулювання:

$$W_{\text{дн}}^*(p) = \frac{T_{1н} \delta + 1}{(T_{2c} p + 1) T_{\mu} p k_0}, \quad (9)$$

$$W_{\text{іа}}^*(p) = \frac{T_{3н} p + 1}{B_1 p^3 + B_2 p^2 + B_3 p + B_4}, \quad (10)$$

де  $T_{1c}$  – еквівалентна постійна часу форсуючої частини передаточної функції контуру регулювання струму;

$T_{2c}$  – еквівалентна постійна часу знаменника передаточної функції контуру регулювання струму;

$T_{3c}$  – еквівалентна постійна часу форсуючої частини передаточної функції об'єкта регулювання.

Коефіцієнти знаменника функції (10):

$$\begin{cases} B_1 = \frac{T_1}{\Omega_{12}^2}; \\ B_2 = \frac{\gamma}{\Omega_{12}^2} \left( 1 - \frac{\beta_{C2}}{\beta_{C1}(\gamma-1)} \right); \\ B_3 = T_M - \frac{\beta_{C2}}{C_{12}}; \\ B_4 = 1 - \frac{\beta_{C2}}{\beta_{C1}}. \end{cases} \quad (11)$$

Згідно зі схемою рис. 2 та відповідно до першого правила Ц. Кеслера [12] запишемо передаточну функцію замкнутого контуру регулювання струму:

$$W_{\text{ЧЭН}}^*(p) = \frac{T_1^* p^2 + T_2^* p + 1}{T_3^* p^5 + T_4^* p^4 + T_5^* p^3 + T_6^* p^2 + T_7^* p + 1} \times \frac{1}{k_0^*}, \quad (12)$$

де складові постійні часу згідно із першим правилом Ц. Кеслера знаходяться як:

$$\begin{cases} T_1^* = T_{1c} T_{3\bar{n}}; \\ T_2^* = T_{1c} + T_{3\bar{n}}; \\ T_3^* = T_{2c} T_{\mu} B_1; \\ T_4^* = T_{2c} T_{\mu} B_2 + T_{\mu} B_1; \\ T_5^* = T_{2c} T_{\mu} B_3 + T_{\mu} B_2; \\ T_6^* = T_{2c} T_{\mu} + T_{\mu} B_3; \\ T_7^* = T_{\mu} B_4. \end{cases} \quad (13)$$

Передаюча функція системи, на вході якої встановлено регулятор частоти відповідно до рис. 2 має вигляд:

$$W_{\text{і.а.}}(p) = W_{\text{ЧЭН}}^*(p) \cdot \psi_r \cdot k_r \cdot \frac{k_{\text{а.}}}{J_{\Sigma} p}. \quad (14)$$

Безпосередньо для синтезу регулятора частоти спростимо отриману передаючу функцію (12) в силу малості коефіцієнтів при  $p^5$ ,  $p^4$ ,  $p^3$  та  $p^2$ . Тоді на основі (13) та (14) маємо:

$$W_{\text{і.а.}}(p) = \frac{T_2^* p + 1}{T_7^* p + 1} \cdot \frac{1}{k_0^*} \cdot \psi_r \cdot k_r \cdot \frac{k_{\text{а.}}}{J_{\Sigma} p}. \quad (15)$$

Значення середньгеометричного кореня характеристичного полінома контуру частоти приймаємо рівним значенню середньгеометричного кореня внутрішнього контуру струму, оскільки синтезується регулятор частоти не є регулятором зниженого порядку та з умов оптимальної швидкодії (перевіряється на основі побудови графічних залежностей коефіцієнтів регулятора від значення середньгеометричного кореня) і фізичної реалізованості отриманого регулятора.

Передаюча функція регулятора частоти відповідно до (15), отримана на основі методу поліномів, представляється як

$$W_{\text{Дх}}(p) = \frac{m_1^* p + m_0^*}{(n_1^* p + n_0^*) p k_{0\div}} = \frac{\left(\frac{m_1^*}{m_0^*} p + 1\right) \frac{m_0^*}{n_0^*}}{\left(\frac{n_1^*}{n_0^*} p + 1\right) p k_{0\div}}, \quad (16)$$

де  $m_1^*$  та  $m_0^*$  – коефіцієнти поліному чисельника (15);

$n_1^*$  та  $n_0^*$  – коефіцієнти поліному знаменника (15).

### Висновки

Синтезовано регулятор частоти для системи керування автономним інвертором напруги, побудованої на основі подвійного регулятора струму, який враховує наявні пружні зв'язки між елементами тягової електропередачі дизель-поїзда.

Дана розробка є частиною комплексу елементів тягової електропередачі дизель-поїзда ДЕЛ-02, що разом вносять вклад у реалізацію мети та завдань «Державної програми реформування залізничного транспорту на 2008-2015 роки» (Концепція Програми схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 27 грудня 2006р. № 651-р.) та «Державної цільової програми реформування залізничного транспорту на 2010-2015 роки» (Постанова Кабінету Міністрів України від 16 грудня 2009 р. № 1390) і, таким чином, зменшують імпорتنу залежність України від постачання тягових агрегатів та дизель-поїздів з країн Європи та СНД, а також створюють перспективи для експорту дизель-поїздів ДЕЛ-02 до інших держав світу.

Отримані дані можливо використовувати при синтезі та розробці САК тягових електропередач для типових транспортних та вантажопідйомних, а також загальнопромислових систем електроприводів, які можна звести до двомасової схеми заміщення з пружними зв'язками.

### Список використаної літератури

1. 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.

2. Кузовков Н. Т. Модальное управление и наблюдающие устройства / Кузовков Н. Т. – М. : Машиностроение, 1976. – 184 С.

3. Паршуков А. Н. Методы синтеза модальных регуляторов / Паршуков А. Н. – Тюмень : ТГНУ, 2008. – 59 С.

4. Акимов Л. В. Астатические регуляторы скорости для двухмассового электропривода ТРН - АД с нелинейной характеристикой нагрузки / Акимов Л. В., Долбня В. Т., Пирожок А. В. // Электротехника. – № 10. – 2002. – С. 36–44.

5. Клепиков В. Б. Устранение нейрорегулированием срывных фрикционных автоколебаний в электромеханических системах с зазором / Клепиков В. Б., Асмолова Л. В., Обруч И. В // Вісн. Нац. технік. ун-ту «Харківський політехнічний інститут». – 2005. – № 45. – С. 489–492.

6. 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.

7. Гурентьев Е. А. Робастная цифровая система управления асинхронным электроприводом / Гурентьев Е. А., Ишматов З. Ш., Плотников Ю. В. // Электротехника. – 2009. – № 9. – С. 34–41.

8. 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 / Гурентьев Евгений Александрович. – Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина. – Екатеринбург. – 2010. – 23 С.

9. Кулагін Д. О. Двухзонное квазивекторное регулирование скорости обертання тягового двигателя дизель-поезда ДЕЛ-02 / Кулагін Д. О., Качур О. С., Андрієнко П. Д. // Вісник КДУ ім. М. Остроградського. – 2010. – № 4 (63). – С. 15–18.

10. Башарин А. В. Управление электроприводами / А. В. Башарин, В. А. Новиков, Г. Г. Соколовский. – Л. : Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. – 392 С.

11. Борцов Ю. А. Тиристорные системы электроприводов с упругими связями / Борцов Ю. А., Соколовский Г. Г. – Л. : Энергия, 1979. – 160 С.

12. Пивняк Г. Г. Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией / Пивняк Г. Г., Волков А. В. – Днепропетровск, 2006. – 421 С.

Отримано



Кулагін Дмитро Олександрович,  
ст. викладач кафедри «Електропостачання промислових підприємств» Запорізького національного технічного університету,  
69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64,  
E-mail: nemix123@rambler.ru  
т. 066-236-52-71



Андрієнко Петро Дмитрович,  
д-р техн. наук, професор, зав. кафедрою «Електричні апарати» Запорізького національного технічного університету,  
69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64,  
E-mail: andrpd@ukr.net  
т. 050-484-16-71