

УДК 629.423.24

Д. О. Кулагін, канд. техн. наук,  
П. Д. Андрієнко, д-р техн. наук

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

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

*Ключові слова:* система автоматичного керування, тяговий інвертор, тягова електропередача, регулятори.

Kulagin D., Ph.D.,  
Andrienko P., Sc.D

### CONSIDERATION OF THE ELASTIC TIES EFFECT ON TRACTION POWER LINE OF AUTONOMOUS LOCOMOTIVE

*Abstract.* Results of the synthesis of frequency regulator of the system of automatic control of traction inverter diesel-train DEL-02 are given. Action of the elastic ties is considered on the basis of the method of polynomials.

*Keywords:* system of automatic control, traction inverter, tractive power transmission, regulators.

Д. А. Кулагин, канд. техн. наук,  
П. Д. Андриенко, д-р техн. наук

### УЧЕТ ДЕЙСТВИЯ УПРУГИХ СВЯЗЕЙ НА РАБОТУ ТЯГОВОЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ АВТОНОМНОГО ЛОКОМОТИВА

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

*Ключевые слова:* система автоматического управления, тяговый инвертор, тяговая электропередача, регуляторы.

**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 [2, 9, 11]. Застосування даного методу під час розробки 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 [2, 9, 11].

При цьому питання зменшення залежності від зміни параметрів об'єкта керування методами синтезу регуляторів системи автоматичного керування (САК) та оптимального синтезу регуляторів є актуальним і розглядається багатьма авторами [1, 8, 13].

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 САК [1, 11, 13].

Рекомендації та проаналізований досвід авторів [1, 2, 6, 7] показують, що складні системи з пружними зв'язками між елементами можна описувати та синтезувати у вигляді двомасових електромеханічних систем (ДЕМС), в яких комплекс пружних зв'язків замінюється еквівалентною дією одного пружного зв'язку без значних якісних порушень синтезованої САК за такого припущення. Даний підхід є актуальним для використання у разі синтезу САК дизель-поїзда,

© Кулагін Д.О., Андрієнко П.Д., 2012

де існує цілий ряд пружних елементів в системі тягової електропередачі (муфти, демпфери, амортизатори, пружини, ресори) [10].

**Мета роботи.** Синтез регулятора частоти для системи автоматичного регулювання частоти обертання ротора тягового двигуна 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 зворотним зв'язком за частотою потокозчеплення статора, при рівності сталої часу каналу зворотного зв'язку за частотою електромеханічній сталій часу тягової електропередачі, еквівалентна відомим системам зі зворотним зв'язком за частотою обертання ротора [10].

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 має 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). В даній роботі в САК буде враховано лише дію пружних зв'язків тягової електропередачі. Спрощення дії дисипативних сил та врахування зазору пов'язане з практичним завданням, що виконували автори: питання дії пружних зв'язків виникло внаслідок виходу з ладу тягового редуктора одного з дизель-поїздів ДЕЛ-02. Тому першочергово було

вирішено задачу врахування коливальних процесів пружних елементів. Дія дисипативних сил та врахування зазору безперечно є важливим питанням і буде впроваджене в розроблену систему в подальших дослідженнях.

При дослідженні динамічних процесів в тяговій електропередачі є припустимим представлення АД та механічних частин тягової електропередачі у вигляді системи з зосередженими параметрами [4]. Тоді системі тягової електропередачі, що містить АД та певну механічну частину з пружними зв'язками для дослідження перехідних процесів можна представити у вигляді двомасової електромеханічної системи [4], що показана на рис. 1.

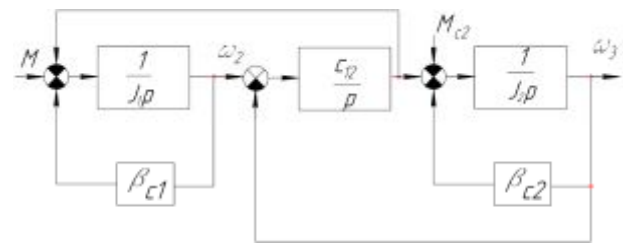


Рис. 1. Структурна схема ДЕМС:

$M$  – момент АД;  $J_1$  – 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;  $\beta_{c1}$  – значення модуля жорсткості механічної характеристики АД;  $\beta_{c2}$  – значення жорсткості механічної характеристики навантаження;  $\omega_3$  – кутова частота обертання другої маси;  $M_{c2}$  – 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 у тяговій електропередачі згідно зі схемою рис. 1. Відповідно до аналізу в [4,6] розрахунок і формування сигналу  $\omega_3$  та врахування дії пружних зв'язків на кутову частоту обертання вала ротора АД  $\omega_2$  можна здійснювати непрямым чином на основі математичної реалізації даної частини схеми в блоці системи керування автономним інвертором напруги.

В роботі використано зворотний зв'язок за сигналом  $\omega_3$  Дію пружних зв'язків на ро-

боту об'єкта можна врахувати за допомогою апроксимованої ланки з передаточною функцією

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

де стала часу вільних коливань ДЕМС [5]

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

стала часу коливань другої маси ДЕМС [5]

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

На рис. 2 наведено схему системи регулювання частоти ДЕМС з врахуванням ланки (1).

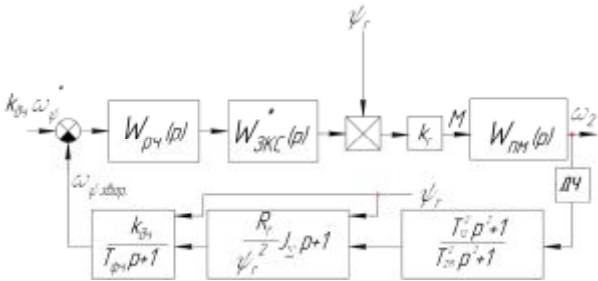


Рис. 2. Структурна схема системи регулювання частоти ДЕМС:

ДЧ – давач частоти;  $W_{рч}(p)$  – 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;  $T_{фч}$  – стала часу фільтра каналу зворотного зв'язку за частотою;  $k_r$  – коефіцієнт приведення обмоток ротора АД;  $J_{\Sigma}$  – приведений до вала ротора АД момент інерції елементів тягової передачі

Стала часу фільтра  $T_{фч}$  обирається з умови [3]

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

Тоді з (4) маємо

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

Запишемо передаточну функцію ДЕМС  $W_{\text{АДН}}^*(p)$ , виконаної згідно з рис. 2.

Коефіцієнт підсилення об'єкта

$$k_0^* = \frac{k_{\text{АД}} \cdot k_U \cdot k_{\text{АН}}}{\beta_{C1} \cdot \beta_{C2}} \quad (6)$$

де  $k_{ВП}$  – коефіцієнт передачі вентильного перетворювача за напругою;  $k_U$  – модуль комутаційної функції інвертора;  $k_{dc}$  – коефіцієнт передачі зворотного каналу струму.

Прийmemo стандартні для ДЕМС позначення відповідно до рекомендацій [2]:

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

Тоді для передаточної функції ДЕМС з урахуванням (7) на основі методу напрямлених графів [2] одержимо

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

$$\left. \times \frac{1}{(T_s p + 1)(T_{\mu} p + 1)(R_d X_c p + 1) R_s} \right) \times \frac{1}{+ \left( T_1 - \frac{\beta_{C2}}{C_{12}} \right) p + \left( 1 - \frac{\beta_{C2}}{\beta_{N1}} \right)},$$

де  $R_d$  – активний опір фільтра ланки постійного струму, що також враховує внутрішній опір синхронного генератора як джерела електричної енергії для роботи тягової електропередачі;  $X_c$  – ємнісний опір фільтра ланки постійного струму перетворювача частоти;  $T_{\mu}$  – стала часу випрямляча;  $R_s$  – активний опір статорної обмотки АД;  $T_s$  – стала часу статорної обмотки АД.

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

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

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

де  $T_{1c}$  – еквівалентна стала часу форсуючої частини передаточної функції контуру регулювання струму;  $T_{2c}$  – еквівалентна стала часу знаменника передаточної функції контуру регулювання струму;  $T_{3c}$  – еквівалентна стала 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:

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

де складові сталі часу згідно із першим правилом Ц. Кеслера знаходяться так:

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

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

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

Значення середньо-геометричних коренів поліномів контуру частоти та контуру струму приймаємо рівними, бо регулятор частоти що синтезується, не є регулятором зниженого порядку та з умов оптимальної швидкодії і фізичної реалізованості отриманого регулятора.

Передаточна функція регулятора частоти, отримана на основі методу поліномів,

$$W_{\text{Дк}}(p) = \frac{m_1^* p + m_0^*}{(n_1^* p + n_0^*) p k_{0\div}} = \frac{\left( \frac{m_1^*}{m_0^*} p + 1 \right) \frac{m_0^*}{n_0^*}}{\left( \frac{n_1^*}{n_0^*} p + 1 \right) p k_{0\div}}, \quad (15)$$

де  $m_1^*$  та  $m_0^*$  – коефіцієнти полінома чисельника (14);  $n_1^*$  та  $n_0^*$  – коефіцієнти полінома знаменника (14).

На рис. 3 наведено діаграму частоти обертання ротора АД у відносних одиницях (в.о.) з розробленою САК при русі дизель-поїзда рівною ділянкою шляху (розгін – усталений рух – гальмування). При розрахунку відносних одиниць як базисні величини обрано за [12]:

для кутової частоти – номінальне значення кутової частоти статорної напруги машини  $\Omega_{\text{а}} = 212,26 \text{ с}^{-1}$ ;

$$\text{для часу } \dot{\Omega}_{\text{а}} = \frac{1}{\Omega_{\text{а}}} = \frac{1}{212,26} = 0,00471 \text{ с};$$

для кутової частоти обертання  $\omega_{\text{а}} = \frac{\Omega_{\text{а}}}{z} = \frac{212,26}{3} = 70,75 \text{ с}^{-1}$ , де  $z$  – кількість пар полюсів машини.

Параметри режиму роботи АД та тягової електропередачі виражаємо через їх відповідні відносні значення за формулою:

$$A_{\text{відн}} = -A_{\text{а.і.}} = \frac{\dot{A}_{\text{а.і.}}}{\dot{A}_{\text{а}}}, \quad (16)$$

де  $A_{\text{а.і.}}$  – відносне значення певного параметра АД;  $\dot{A}_{\text{а.і.}}$  – абсолютне значення певного параметра АД;  $\dot{A}_{\text{а}}$  – базисне значення певного параметра АД.

Приймаємо, що при переході від абсолютних до їх відносних значень позначення відповідних параметрів повністю зберігаються.

Зворотний перехід до абсолютних одиниць здійснюється відповідно до (16).

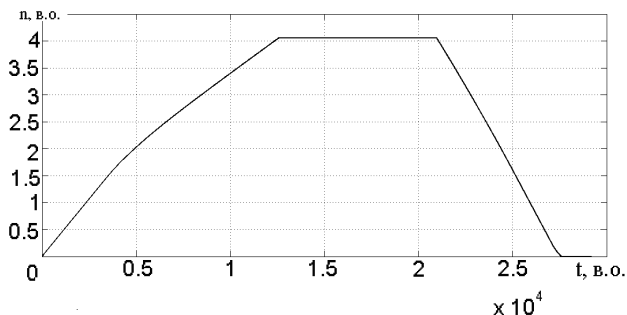


Рис. 3. Діаграма частоти обертання ротора тягового двигуна при русі дизель-поїзда по рівній ділянці шляху

На приведеній діаграмі відсутні коливання перехідних процесів, пов'язані з дією пружних зв'язків. Моделювання проводилося відповідно до схеми на рис. 1.

**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.

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

#### Список використаної літератури

1. Акимов Л. В. Астатические регуляторы скорости для двухмассового электропривода ТРН-АД с нелинейной характеристикой нагрузки / Л. В. Акимов, В. Т. Долбня, А. В. Пирожок // *Электротехника*. – № 10. – 2002. – С. 36–44.
2. Акимов Л. В. Синтез упрощенных структур электроприводов с нелинейной нагрузкой / Л. В. Акимов, В. Т. Долбня, В. Б. Клепиков, А. В. Пирожок // *НТУ «ХПИ»*. – Запорожье : ЗНТУ, 2002. – 160 с.
3. Андриенко П.Д. Динамика двухконтурной системы регулирования скорости

асинхронного двигателя с обратной связью по частоте / П. Д. Андриенко., Р.Т. Шрейнер, А. В. Волков // *ЭП. Электропривод*. – 1982. – № 9. – С. 5–8.

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

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

6. 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.

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

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

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

10. Кулагін Д. О. Двухзонне квазівекторне регулювання швидкості обертання тягового двигуна дизель-поїзда ДЕЛ-02 / Д.О. Кулагін, О.С. Качур, П. Д. Андриенко // *Вісник КДУ ім. М. Остроградського*. – 2010. – № 4 (63). – С. 15–18.

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

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

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

Отримано 29.01.2012

#### References

1. Akimov L. V., Dolbnya V. T., Pirogok A. V. Astatic speed controllers for two of mass drive TVR – AM with nonlinear characteristics-point load / *Electrical Engineering*. – № 10. – 2002. – P. 36–44 [in Russian].

2. Akimov L. V., Klepikov V. B., Pirogok A. V. Synthesis of simplified structures of two-mass actuators with nonlinear load // NTU "KhPI". – Zaporozhye: ZNTU, 2002. – 160 p. [in Russian].

3. Andrienko P. D., Schreiner R. T., Volkov A. V. Dynamics of two-circuit system of regulation of speed of an induction motor with feedback on frequency / *EP. The Drive*. – 1982. – № 9. – P. 5–8 [in Russian].

4. Basharin A. V., Novikov V. A., Sokolovsky G. G. Control of electric drives. – Leningrad: Energoizdat. Leningrad department, 1982. – 392 p. [in Russian].

5. Bortcov Y. A., Sokolovsky G. G. Thyristor systems actuators with elastic links. – Leningrad: Energy, 1979. – 160 p. [in Russian].

6. Gurentiev E. A. Development and research of robust control system often-tno-regulated asynchronous power-drive on the basis of a polynomial method disabilities. Abstract thesis on competition of a scientific degree candidate of technical sciences. – The ural federation university of a name of the first president of the Russia B. N. Yeltsin. – Yekaterinburg: – 2010. – 23 p. [in Russian].

7. Gurentiev E. A., Ishmatov Z. H., Plotnikov Y. V. The robust digital control system asynchronous power-drive / *Electrical Engineering*. – 2009. – № 9. – P. 34–41 [in Russian].

8. Klepikov V. B., Asmolova L. V., Obruch I. V. Elimination of neurocontrol vietnams of frictional self-oscillations in mechanical systems with air gaps / *Bulletin of the National technical university "Kharkiv polytechnic institute"*. – 2005. – № 45. – P. 489–492 [in Russian].

9. Kuzovkov N. T. Modal control and monitoring devices. – Moscow: Mechanical engineering, 1976. – 184 p. [in Russian].

10. Kulagin D. O., Kachur O. S., Andrienko P. D. Two-zoned quasi-vector speed control of the traction motor diesel trains DEL-02 / *News KSU im. M. Ostrogradsky*. – 2010. – № 4 (63). – P. 15–18 [in Ukrainian].

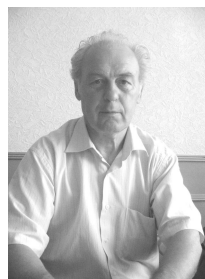
11. Parshukov A. N. Methods of synthesis of modal controllers. – Tyumen: Tajik state national university, 2008. – 59 p. [in Russian].

12. Pivnyak G. G., Volkov A. V. Modern frequency-controlled asynchronous electric drives with pulse-width modulation. – Dnepropetrovsk: 2006. – 421 p. [in Russian].

13. Tolochko O. I. Application of the method of standard polynomials in the synthesis of systems slave control / *News East-Ukrainian national university im. V. Dahl*. – Lugansk: – 2003. – № 4 (62). – P. 114–120 [in Russian].



Кулагін  
Дмитро Олександрович,  
к.т.н., ст. викл. каф. Ел.  
постачання пром. підпр.  
Запорізького нац. техніч.  
ун-ту, т. (066) 236-52-71  
E-mail:  
nemix123@rambler.ru



Андрієнко  
Петро Дмитрович,  
д-р техн. наук, проф., зав.  
каф. Електричні апарати  
Запорізького нац. техніч.  
ун-ту, т. (050) 484-16-71  
E-mail: andrpd@ukr.net