

В.Д. ДМИТРИЕНКО, д-р техн. наук, проф. НТУ "ХПИ", Харьков,
Н.И. ЗАПоловский, канд. техн. наук, проф., НТУ "ХПИ",
Харьков,
Н.В. МЕЗЕНЦЕВ, ст. преп., НТУ "ХПИ", Харьков

СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ ДИЗЕЛЬ-ПОЕЗДА С УЧЕТОМ РАБОТЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ В РЕЖИМЕ ШИМ

Рассматривается синтез оптимальных регуляторов для дизель-поезда с тяговым асинхронным приводом на основе метода аналитического конструирования регуляторов по критерию обобщенной работы. Разработана улучшенная математическая модель дизель-поезда, позволяющая проводить исследования с учетом применения в преобразователе частоты алгоритма широтно-импульсной модуляции. Ил.: 3. Библиогр.: 8 назв

Ключевые слова: оптимальные регуляторы, тяговый асинхронный привод, аналитическое конструирование регуляторов по критерию обобщенной работы, преобразователь частоты, широтно-импульсная модуляция.

Постановка проблемы и анализ литературы. Широкое применение тяговых электроприводов с асинхронным электродвигателем (ТАД) с короткозамкнутым ротором на дизель-поездах в Украине во многих случаях ограничивается отсутствием надежных и экономичных систем управления этими приводами. В связи с этим актуальными являются работы, направленные на разработку и модернизацию систем управления данными объектами с учетом применения современных методов теории оптимального управления. Математическая модель движения дизель-поезда с учетом некоторых допущений может быть представлена системой нелинейных дифференциальных уравнений высокого порядка. Для таких нелинейных объектов синтез оптимальных регуляторов можно осуществить с помощью ряда методов оптимального управления [1 – 3]. Известны работы, в которых выполнена адаптация метода аналитического конструирования регуляторов по критерию обобщенной работы (АКОР) для объектов с несколькими нелинейно входящими управляющими воздействиями [4 – 7]. На их основе предлагается выполнить синтез регуляторов для дизель-поезда с учетом специфики работы преобразователя частоты, а именно до скорости 35 км/ч на данном объекте используется режим широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Поэтому необходимо получить адекватную модель объекта управления, которая позволит выполнить синтез и провести исследования полученных регуляторов.

Целью статьи является синтез оптимальных регуляторов для дизель-поезда с тяговым асинхронным приводом с помощью метода АКОР с учетом работы преобразователя частоты в режиме ШИМ, а также уточнение известной математической модели дизель-поезда, которая позволит выполнить синтез регуляторов, а также провести их исследование.

Основной раздел. Рассмотрим синтез оптимальных регуляторов с использованием модификаций метода АКОР для дизель-поезда с тяговым асинхронным электроприводом. При этом в качестве одного из этапов движения рассмотрим этап разгона исследуемого объекта до скорости 35 км/ч (т.е. когда преобразователь частоты использует алгоритм ШИМ для управления ключами инвертора напряжения). При этом математическую модель эквивалентного асинхронного двигателя целесообразно описать в неподвижной прямоугольной системе координат в осях α , β [8], т.к. это позволит исследовать процессы, протекающие в двигателе, в мгновенных значениях. В этом случае движение дизель-поезда в режиме тяги описывается системой дифференциальных уравнений вида (1):

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} - k\Omega &= 0; \\ \frac{d\Omega}{dt} - \frac{p}{J} \left(\frac{6k_r}{\sigma L_s} (\Psi_{\alpha_2} \Psi_{\beta_1} - \Psi_{\alpha_1} \Psi_{\beta_2}) - M_c \right) &= 0; \\ \frac{d\Psi_{\alpha_1}}{dt} + \alpha'_s \Psi_{\alpha_1} - \alpha'_s k_r \Psi_{\alpha_2} &= U_B \mu \cos(\omega_s t); \\ \frac{d\Psi_{\beta_1}}{dt} + \alpha'_s \Psi_{\beta_1} - \alpha'_s k_r \Psi_{\beta_2} &= U_B \mu \sin(\omega_s t); \\ \frac{d\Psi_{\alpha_2}}{dt} + \alpha'_r \Psi_{\alpha_2} - \alpha'_r k_s \Psi_{\alpha_1} + \Omega \Psi_{\beta_2} &= 0; \\ \frac{d\Psi_{\beta_2}}{dt} + \alpha'_r \Psi_{\beta_2} - \alpha'_r k_s \Psi_{\beta_1} + \Omega \Psi_{\alpha_2} &= 0, \end{aligned} \tag{1}$$

где S – путь, пройденный дизель-поездом; t – время; k – постоянный коэффициент для данного типа тягового асинхронного электропривода;

Ω – угловая скорость вращения ротора ТАД; p , $k_r = \frac{L_m}{L_r}$, L_m , L_s ,

$$\sigma = 1 - k_r k_s = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}, \quad L_r, \quad k_s = \frac{L_m}{L_s}, \quad a_s' = \frac{1}{\sigma T_s}, \quad T_s = \frac{L_s}{r_1}, \quad r_1, \quad a_r' = \frac{1}{\sigma T_r},$$

$T_r = \frac{L_r}{r_2}$, r_2 , – постоянные параметры и коэффициенты для данного типа

тягового асинхронного электропривода; J – момент инерции двигателя и механизма, приведенный к валу двигателя; $\Psi_{\alpha 1}, \Psi_{\beta 1}, \Psi_{\alpha 2}, \Psi_{\beta 2}$ – соответственно проекции на оси α и β потокосцеплений обмоток статора и ротора; M_c – момент сопротивления движению.

Систему (1) удобно записать в более простом виде, введя обозначения: $x_1 = S$; $a_{12} = -k$; $x_2 = \Omega$; $a_{20} + a_{22}x_2 = M_c$;

$$a_{245} = -a_{236} = -\frac{6pk_r}{J\sigma L_s}; \quad x_3 = \Psi_{\alpha 1}; \quad a_{33} = a_{44} = a_s'; \quad a_{35} = a_{46} = -a_s' k_r;$$

$$x_5 = \Psi_{\alpha 2}; \quad u_1 = U_B; \quad u_2 = \mu; \quad u_3 = \omega_s; \quad x_4 = \Psi_{\beta 1}; \quad x_6 = \Psi_{\beta 2}; \quad a_{55} = a_{66} = a_r';$$

$a_{53} = a_{64} = -a_r' k_s$, где a_{20}, a_{22} – коэффициенты аппроксимации момента сопротивления движению M_c . В результате получим следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} + a_{12}x_2 &= 0; \\ \frac{dx_2}{dt} + a_{245}x_4x_5 + a_{236}x_3x_6 + a_{22}x_2 + a_{20} &= 0; \\ \frac{dx_3}{dt} + a_{33}x_3 + a_{35}x_5 &= u_1u_2\cos(u_3t); \\ \frac{dx_4}{dt} + a_{44}x_4 + a_{46}x_6 &= u_1u_2\sin(u_3t); \\ \frac{dx_5}{dt} + a_{55}x_5 + a_{53}x_3 + x_2x_6 &= 0; \\ \frac{dx_6}{dt} + a_{66}x_6 + a_{64}x_4 + x_2x_5 &= 0. \end{aligned} \tag{2}$$

Сформулируем задачу оптимального управления для рассматриваемого объекта (2): необходимо найти такие управляющие воздействия u_1, u_2, u_3 , которые бы обеспечивали перевод объекта управления из заданной точки в конечную точку с учетом минимизации функционала обобщенной работы [3 – 6]

$$J = V_k(x_1(t_2), \dots, x_n(t_2), t_2) + \int_{t_1}^{t_2} Q(x_1, \dots, x_n, t) dt + \\ + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m \int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{u_j}{k_j} \right)^2 dt + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m \int_{t_1}^{t_2} \left(k_j \sum_{l=1}^n \varphi_{lj} \frac{\partial V}{\partial x_l} \right)^2 dt.$$

Управления могут быть получены по выражениям (3) – (5).

$$u_1 = -k_1^2 \left[\frac{\partial V}{\partial x_3} u_2 \cos(u_3 t) + \frac{\partial V}{\partial x_4} u_2 \sin(u_3 t) \right]; \quad (3)$$

$$u_2 = -k_2^2 \left[\frac{\partial V}{\partial x_3} u_1 \cos(u_3 t) + \frac{\partial V}{\partial x_4} u_1 \sin(u_3 t) \right]; \quad (4)$$

$$u_3 = -\frac{k_3^2}{u_3} \left[\frac{\partial V}{\partial x_3} u_1 u_2 \cos(u_3 t) + \frac{\partial V}{\partial x_4} u_1 u_2 \sin(u_3 t) \right]. \quad (5)$$

Однако при этом необходимо задаться функциями Q и V_3 .

Удовлетворительные переходные процессы для объекта (2) в заданном режиме тяги можно получить, используя следующие функции Q и V_3 :

$$Q = \beta_0 + \beta_1(a_{44}x_4 + a_{46}x_6)^2 + \beta_2(x_{20} - x_2)^2(a_{33}x_3 + a_{35}x_5)^2; \quad (6)$$

$$V_3 = \rho_1(a_{33}x_3 + a_{35}x_5) + \rho_2(a_{44}x_4 + a_{46}x_6) + \rho_3(x_{20} - x_2)(a_{33}x_3 + a_{35}x_5)^2 + \\ + \rho_4(a_{44}x_4 + a_{46}x_6)^2 + \rho_5(x_{20} - x_2)^2(a_{33}x_3 + a_{35}x_5)^2, \quad (7)$$

где $x_{20} = \Omega_2$ – заданная скорость, $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \rho_1, \rho_2, \dots, \rho_5$ – постоянные коэффициенты.

При этом решение уравнения в частных производных целесообразно искать в следующем виде:

$$V = A_1(a_{33}x_3 + a_{35}x_5) + A_2(a_{44}x_4 + a_{46}x_6) + A_3(x_{20} - x_2)(a_{33}x_3 + a_{35}x_5)^2 + \\ + A_4(a_{44}x_4 + a_{46}x_6)^2 + A_5(x_{20} - x_2)^2(a_{33}x_3 + a_{35}x_5)^2 \quad (8)$$

из уравнения

$$\frac{\partial V}{\partial t} - \sum_{i=1}^n \frac{\partial V}{\partial x_i} f_i = -Q,$$

при граничном условии $V_{t=t_2} = V_k$, где f_i – левые части системы уравнения (2) без производных; $V_k = V_3$ – заданное значение функции V в конечный момент времени t_2 .

Подставляя соотношения (6), (8) в уравнение для нахождения функции V [3 – 6], несложно получить систему обыкновенных дифференциальных уравнений, для определения коэффициентов A_i ($i = \overline{1, 5}$):

$$\begin{aligned} \frac{dA_1}{dt} - a_{33}A_1 &= 0; \quad \frac{dA_2}{dt} - a_{44}A_2 = 0; \\ \frac{dA_3}{dt} - 2a_{33}A_3 - 2a_{20}A_5 &= 0; \\ \frac{dA_4}{dt} - 2a_{44}A_4 &= \beta_1; \\ \frac{dA_5}{dt} - 2a_{33}A_5 &= \beta_2. \end{aligned}$$

Данную систему целесообразно решить аналитически. В результате решения с учетом граничных условий получим следующие выражения:

$$\begin{aligned} A_1 &= \rho_1 e^{a_{33}(t-t_2)}; \\ A_2 &= \rho_2 e^{a_{44}(t-t_2)}; \\ A_3 &= \left[\rho_3 - \frac{a_{20}\beta_2}{2a_{33}^2} + a_{20} \left(2\rho_5 - \frac{\beta_2}{a_{33}} \right) (t_2 - t) \right] e^{2a_{33}(t-t_2)} + \frac{a_{20}\beta_2}{2a_{33}^2}; \\ A_4 &= \left[\rho_4 - \frac{\beta_1}{2a_{44}} \right] e^{2a_{44}(t-t_2)} + \frac{\beta_1}{2a_{44}}; \\ A_5 &= \left[\rho_5 - \frac{\beta_2}{2a_{33}} \right] e^{2a_{33}(t-t_2)} + \frac{\beta_2}{2a_{33}}. \end{aligned} \quad (9)$$

Подставив коэффициенты A_i ($i = \overline{1, 5}$), определяемые по соотношениям (9), в выражения (3) – (5) для определения управляющих воздействий, получим:

$$\begin{aligned} u_1 &= -k_1^2 \left[\frac{\partial V}{\partial x_3} u_2 \cos(u_3 t) + \frac{\partial V}{\partial x_4} u_2 \sin(u_3 t) \right] = -k_1^2 u_2 \left[(A_1 a_{33} + \right. \\ &+ 2A_3 a_{33} (x_{20} - x_2)(a_{33} x_3 + a_{35} x_5) + 2A_5 a_{33} (x_{20} - x_2)^2 (a_{33} x_3 + a_{35} x_5)) \cos(u_3 t) + \end{aligned}$$

$$+ (a_{44}A_2 + 2a_{44}A_4(a_{44}x_4 + a_{46}x_6)) \sin(u_3t)]; \quad (10)$$

$$u_2 = -k_2^2 \left[\frac{\partial V}{\partial x_3} u_1 \cos(u_3t) + \frac{\partial V}{\partial x_4} u_1 \sin(u_3t) \right] = -k_2^2 u_1 [(A_1 a_{33} +$$

$$+ 2A_3 a_{33}(x_{20} - x_2)(a_{33}x_3 + a_{35}x_5) + 2A_5 a_{33}(x_{20} - x_2)^2 (a_{33}x_3 + a_{35}x_5)) \cos(u_3t) +$$

$$+ (a_{44}A_2 + 2a_{44}A_4(a_{44}x_4 + a_{46}x_6)) \sin(u_3t)]; \quad (11)$$

$$u_3 = -\frac{k_3^2}{u_3} \left[\frac{\partial V}{\partial x_3} u_1 u_2 \cos(u_3t) + \frac{\partial V}{\partial x_4} u_1 u_2 \sin(u_3t) \right] = -\frac{k_3^2}{u_3} u_1 u_2 [(A_1 a_{33} +$$

$$+ 2A_3 a_{33}(x_{20} - x_2)(a_{33}x_3 + a_{35}x_5) + 2A_5 a_{33}(x_{20} - x_2)^2 (a_{33}x_3 + a_{35}x_5)) \cos(u_3t) +$$

$$+ (a_{44}A_2 + 2a_{44}A_4(a_{44}x_4 + a_{46}x_6)) \sin(u_3t)]. \quad (12)$$

Метод АКОР не дает возможности однозначно определить коэффициенты $k = (k_1, k_2, k_3)$; $\beta = (\beta_1, \beta_2)$; $\rho = (\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_5)$. Поэтому целесообразно предложить алгоритм поиска этих коэффициентов. Учитывая затраты на реализацию алгоритма, поскольку в данном случае необходима постоянная оценка человеком полученных коэффициентов с точки зрения качества переходных процессов, применяется человеко-машинный метод поиска коэффициентов. Предлагается осуществить этот поиск с помощью эволюционного метода – генетических алгоритмов. В результате моделирования были найдены значения коэффициентов k , β , и ρ , которые позволяют получить приемлемые переходные процессы в синтезированной системе управления.

На рис. 1 приведены изменения во времени синтезированных управляющих воздействий u_1, u_2, u_3 при разгоне дизель-поезда без пассажиров до скорости 35 км/ч. Значения коэффициентов для "лучшей" хромосомы в этом случае следующие: $\rho_1 = 218.38$; $\rho_2 = 395.21$; $\rho_3 = 677.13$; $\rho_4 = 452.7$; $\rho_5 = -144.67$; $\beta_1 = 0.000025$; $\beta_2 = 0.098$; $k_1 = -0.73$; $k_2 = -0.4$; $k_3 = -0.03$.

На рис. 2 приведено изменение скорости V и пройденного пути S , полученные на обобщенной модели с синтезированным регулятором (V_1, S_1) и без него (V_2, S_2).

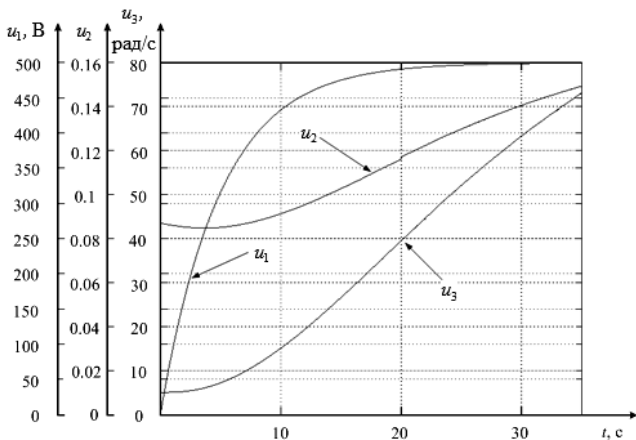


Рис. 1. Зависимости u_1, u_2, u_3 при разгоне дизель-поезда до 35 км/ч

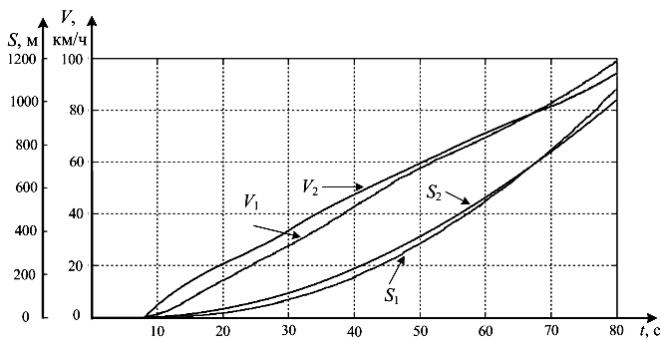


Рис. 2. Изменение скорости и пройденного пути с использованием регулятора (V_1, S_1) и без него (V_2, S_2).

На рис. 3 приведен расход топлива для случая разгона дизель-поезда с различной загрузкой (Q_3 – без пассажиров; Q_2 – заняты только места для сидения; Q_1 – максимальная загрузка). Данный расход получен на обобщенной модели с использованием синтезированного регулятора (Q_1, Q_2, Q_3) и без него (Q_1^*, Q_2^*, Q_3^*).

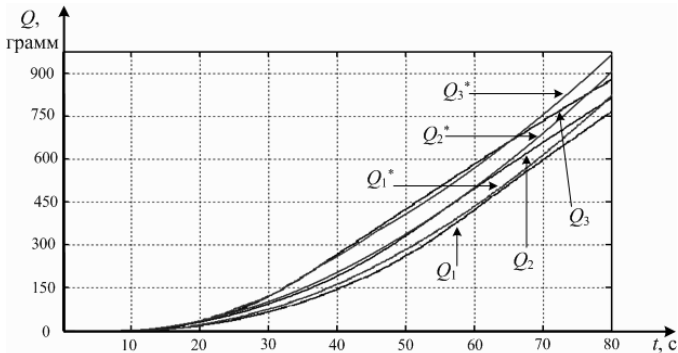


Рис. 3. Расход топлива при различной нагрузке дизель-поезда

Как видно из рис. 3, применение регуляторов, синтезированных по методу АКОР, позволяет снизить расход в среднем на 9% при различной нагрузке дизель-поезда.

Выводы. Таким образом, синтезированы оптимальные регуляторы для дизель-поезда с тяговым асинхронным приводом с помощью метода АКОР с учетом работы преобразователя частоты в режиме ШИМ, а также дополнена математическая модель дизель-поезда, для проведения исследований, связанных с работой объекта управления в этом режиме.

Список литературы: 1. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 5-ти томах. Т. 4: Теория оптимизации систем автоматического управления / Под ред. *К.А. Пупкова и И.Д. Егунова*. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 744 с. 2. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 5-и томах. Т. 5: Методы современной теории управления / Под ред. *К.А. Пупкова, Н.Д. Егунова*. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 784 с. 3. *Красовский А.А.* Системы автоматического управления полетом и их аналитическое конструирование / *А.А. Красовский*. – М.: Наука, 1973. – 560 с. 4. *Носков В.И.* Моделирование и оптимизация систем управления и контроля локомотивов / *В.И. Носков, В.Д. Дмитриенко, Н.И. Заполовский, С.Ю. Леонов*. – Х.: ХФИ "Транспорт Украины", 2003. – 248 с. 5. *Мезенцев Н.В.* Новые модификации метода АКОР для случая нелинейного вхождения управлений / *Н.В. Мезенцев* // Вісник НТУ "ХПИ". Тематичний випуск: Інформатика і моделювання. – Харків: НТУ "ХПИ". – 2007. – № 39. – С. 119 – 124. 6. *Дмитриенко В.Д.* Синтез оптимальных регуляторов для дизель-поезда методом аналитического конструирования по критерию обобщенной работы / *В.Д. Дмитриенко, Н.И. Заполовский, Н.В. Мезенцев* // Вісник НТУ "ХПИ". Тематичний випуск: Інформатика і моделювання. – Харків: НТУ "ХПИ". – 2010. – № 31. – С. 87 – 94. 7. *Верлань А.Ф.* Эволюционные методы компьютерного моделирования / *А.Ф. Верлань, В.Д. Дмитриенко, Н.И. Корсунов, В.А. Шорох*. – Киев: Наукова думка. – 1992. – 256 с. 8. *Сандлер А.С.* Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями / *А.С. Сандлер, Р.С. Сарбатов*. – М.: Энергия. – 1974. – 328 с

УДК 621.9.01

Синтез оптимальних регуляторів для дизель-поїзда з урахуванням роботи перетворювача частоти в режимі ШІМ / Дмитрієнко В.Д., Заповольський М.Й., Мезенцев М.В. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика і моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2012. – № 38. – С. 46 – 54.

Розглядається проектування оптимальних регуляторів для дизель-поїзда з тяговим асинхронним приводом на основі методу аналітичного конструювання регуляторів за критерієм узагальненої роботи. Розроблена поліпшена математична модель дизель-поїзда, що дозволяє проводити дослідження з урахуванням застосування в перетворювачі частоти алгоритму широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Іл.: 3. Бібліогр.: 8 назв.

Ключові слова: оптимальні регулятори, тяговий асинхронний привід, аналітичне конструювання регуляторів за критерієм узагальненої роботи, перетворювач частоти, широтно-імпульсна модуляція.

UDC 621.9.01

Optimal controller synthesis for diesel train with the inverter operation in PWM mode / Dmitrienko V.D., Zapolovskyi N.I., Mezentsev N.V. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2012. – № 38. – P. 46 – 54.

We consider the design of optimal controllers for diesel trains with traction induction motor drive based on the method of analytical design of regulators by the generalized work. Developed an improved mathematical model diesel train, allows the study, applying the algorithm to the inverter pulse-width modulation (PWM). Figs.: 3. Refs.: 8 titles.

Keywords: optimal controllers, asynchronous traction drive, the analytical construction of regulators by the criterion of the generalized work, inverter, pulse-width modulation.

Поступила в редакцію 10.05.2012