УДК 681.513:620.1

Н.И. ЗАПОЛОВСКИЙ, канд. техн. наук, НТУ "ХПИ",
В.И. НОСКОВ, канд. техн. наук, ГП «Электротяжмаш»,
Н.В. МЕЗЕНЦЕВ

СИНТЕЗ СИСТЕМЫ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЯГОВЫМ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ЛОКОМОТИВА

Висвітлено питання розробки математичної моделі та синтезу на її основі законів управління, які дають можливість формування сили тяги локомотива згідно заданому критерію якості. Приведено моделі об’єкту управління та співвідношення для проведення розрахунків закону зміни модуля та аргументу вектора струму статора тягового двигуна та сили тяги дизель-потяга.

The question of development of mathematical model and synthesis on her basis of laws of management which formations of force of draft of the locomotive enable according to the set criterion of quality is considered. Models of object of management and a ratio for carrying out of calculations of the law of change of the module and argument of a current of a stator of the traction engine and force of draft of a diesel engine - train are resulted.

Постановка проблемы. Развитие тягового асинхронного электропривода и вытеснение им других типов управляемых электроприводов, в первую очередь, связано с эксплуатационными свойствами асинхронного двигателя. Однако управление им до недавнего времени вызывало большие проблемы. В случае частотного управления изменение скорости вращения ротора осуществляется с помощью частоты и амплитуды трехфазного напряжения, подаваемого на двигатель [1]. Другим, более перспективным способом управления, является векторное управление. При векторном управлении, в отличие от частотного, управление скоростью вращения тягового асинхронного двигателя (ТАД) осуществляется с помощью регулирования амплитуды и фазы вектора поля двигателя. Такое управление является более экономичным и обеспечивает лучшие характеристики привода в статических и динамических режимах.

Как при частотном, так и при векторном способе управления, необходимо осуществлять управление процессами движения локомотива с учетом протекания электромагнитных процессов и оптимизации энергетических затрат, что требует, в свою очередь, создания эффективных систем управления движением. Задача синтеза системы управления тяговым электроприводом является составной частью общей задачи создания оптимальной системы управления локомотивом, обеспечивающей выполнение графика движения при заданных ограничениях и в соответствии с заданным критерием оптимальности. В последние годы решение этих задач предлагается выполнять с использованием современных технологий, в основе которых лежат методы анализа и синтеза сложных технических систем.

Решению подобного рода задач посвящено значительное число

публикаций [2 – 5]. До последнего времени, в связи с недостаточным развитием средств микропроцессорной техники, возможность решения подобного рода задач с использованием современных методов, было проблематичным. Однако создание первых украинских дизель-поездов с тяговыми асинхронными электродвигателями и системой управления на основе микроконтроллеров открыло перспективы создания и внедрения систем, в основе которых заложены современные методы анализа и синтеза.

Анализ литературы. Известны результаты анализа оптимальных процессов в асинхронных электроприводах, полученные при различных подходах к постановке и решению задач оптимального управления, а также при неодинаковой степени учета основных факторов, характеризующих поведение ТАД в динамике [2, 6, 7]. В ряде работ исследования проведены без учета электромагнитных явлений, влияние которых оказывается довольно значительным на динамику процессов разгона локомотива [7]. В других случаях оптимальные процессы проанализированы при существенной идеализации машины, что вносит определенную погрешность в результаты исследований [2, 6]. Применение прямых вариационных методов или принципа максимума для отыскания закона оптимального управления амплитудой и частотой напряжения питания ТАД в процессе движения локомотива не позволяет получить результаты в наглядной аналитической форме из-за высокого порядка системы дифференциальных уравнений, описывающих объект управления, что существенно ограничивает их область применения [2]. Это касается и исследований, связанных с построением систем управления скоростью вращения ТАД с помощью регулирования амплитуды и фазы вектора поля двигателя.

Как следует из [2 – 4], проблема оптимизации энергетических показателей частотно-регулируемых электроприводов с ТАД, независимо от способа управления, может быть решена на основе использования метода аналитического конструирования регуляторов по критерию обобщенной работы (АКОР).

Целью статьи является синтез с помощью метода АКОР системы оптимального управления скоростью вращения тяговых асинхронных двигателей, тяговый момент которых обеспечивается регулированием амплитуды и фазы вектора поля двигателя.

Реализация решения задачи синтеза. Для описания ТАД используется система уравнений, отражающая с учетом насыщения стали основной электромагнитный процесс – изменение потокосцеплений ротора двигателя [7]:

$$\dot{\psi}_{\alpha r} = -\alpha_{\text{r}}\psi_{\alpha r} + (\omega_k - z_p\omega)\psi_{\beta r} + k_r r_r i_{\alpha s}\,; \qquad (1)$$

$$\dot{\psi}_{\beta r} = -\alpha_r \psi_{\beta r} + (\omega_k - z_p \omega)\psi_{\alpha r} + k_r r_r i_{\beta s};$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{J}\left[z_p k_r \left(\psi_{\alpha r} i_{\beta s} - \psi_{\beta r} i_{\alpha s}\right) - \mu_c\right], \tag{1}$$

где $\psi_{\alpha r}$, $\psi_{\beta r}$ – проекции вектора потокосцепления ротора $\overline{\psi_r}$; ω_k – угловая скорость вращения системы координат; $i_{\alpha s}$, $i_{\beta s}$ – проекции вектора тока статора на соответствующие оси координат; z_p – число пар полюсов ТАД; $\alpha_r = \dfrac{r_r}{L_2^{'} + L_\tau}$, $k_r = \dfrac{L_\tau}{L_2^{'} + L_\tau}$ – общепринятые функции параметров машины; $L_\tau = \dfrac{\psi_\delta}{i_\mu} = f(\psi_\delta)$ – тангенциальная динамическая индуктивность машины [7], являющаяся функцией потокосцепления ψ_δ; μ_c – момент сопротивления движению, зависящий от скорости движения локомотива. В процессе разгона без учета процессов боксования его можно представить в виде:

$$\mu_c = c\omega, \tag{2}$$

где c – коэффициент аппроксимации кривой момента сопротивления движению, зависящий от типа локомотива.

В системе координат, жестко связанной с вектором потокосцепления ротора, уравнения (1) могут быть представлены в виде:

$$\dot{\psi}_r = -\alpha_r \psi_r + k_r r_r i_s \cos\theta; \tag{3}$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{J}\left(z_p k_r \psi_r i_s \sin\theta - \mu_c\right); \tag{4}$$

$$\psi_r(\omega_{\overline{\psi_r}} - z_p \omega) - k_r r_r i_s \sin\theta = 0, \tag{5}$$

где ψ_r – модуль вектора потокосцепления ротора $\overline{\psi_r}$; i_s, θ – модуль и угол вектора тока статора $\overline{i_s}$; ω – скорость вращения ротора; $\omega_{\overline{\psi_r}}$ – скорость вращения вектора $\overline{\psi_r}$.

Задача заключается в том, что для объекта, описываемого уравнениями (3) – (5), требуется определить такие законы изменения во времени управляющих воздействий $i_s(t)$ и $\theta(t)$, а также фазовых координат (потокосцеплений, скорости вращения ротора), которые соответствовали бы минимуму энергетических затрат в процессе разгона локомотива при выполнении заданного графика движения. Особенностью данного объекта

является то, что управляющие воздействия входят в виде произведения $i_s \cos\theta$ и к тому же управление θ входит под знак тригонометрической функции. Для такого вида объектов управления авторами проведена адаптация метода АКОР [8]. Показано, что для объекта, который описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений

$$\frac{dX_i}{dt} + f_i(X_1, \ldots, X_n, t) = \sum_{j=1}^{m} \varphi_{ij}(X_1, \ldots, X_n, t) u_1 \psi_{ij}(u_2, t), \qquad (6)$$

оптимальными в смысле минимума функционала

$$I = V_з[X_1(t_2), \ldots, X_n(t_2), t_2] + \int_{t_1}^{t_2} Q dt + \int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{u_1^2}{k_1^2} + \frac{u_2^2}{k_2^2} \right) dt, \qquad (7)$$

являются управления

$$u_1 = -k_1^2 \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} \frac{\partial V}{\partial X_i} \varphi_{ij} \psi_{ij} / 2; \qquad (8)$$

$$u_2 = -k_2^2 \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} \frac{\partial V}{\partial X_i} \varphi_{ij} u_1 \psi_{ij} / 2u_2, \qquad (9)$$

где V – решение линейного уравнения в частных производных

$$\frac{\partial V}{\partial t} - \sum_{i=1}^{n} \frac{\partial V}{\partial X_i} f_i = -Q \qquad (10)$$

при граничном условии

$$V[X_1(t_2), \ldots, X_n(t_2), t_2] = V_з[X_1(t_2), \ldots, X_n(t_2), t_2]. \qquad (11)$$

Здесь $X_i (i = \overline{1, n})$ – фазовые координаты объекта управления; f_i, φ_{ij} $(i = \overline{1, n},\ j = \overline{1, m})$ – непрерывные заданные функции; $V_з[X_1(t_2), \ldots, X_n(t_2), t_2]$ – положительно определенная непрерывная функция, задающая точность приведения объекта управления в момент времени t_2 в заданную точку фазового пространства; $Q(X_1, \ldots, X_n, t)$ – положительно определенная непрерывная функция, задающая требования к качеству переходных процессов объекта по фазовым координатам в интервале времени управления $[t_1, t_2]$; p, q – положительные числа, удовлетворяющие условиям: $1/p + 1/q = 1$ и X^p, X^q – четные функции X; k_j $(j = \overline{1, m})$ – заданные числа [5].

Используя выражения (8) – (10) и уравнения (3) – (4), описывающие модель объекта, несложно получить аналитические соотношения для определения управляющих воздействий $i_s(t)$ и $\theta(t)$. Для этого уравнения (3) и

(4) преобразуем к виду (12) – (13), как того требует метод АКОР. В результате преобразований получим:

$$\frac{dX_1}{dt} + a_1 X_1 = b_1 u_1 \cos(u_2)\,; \tag{12}$$

$$\frac{dX_2}{dt} + a_2 X_2 = b_2 u_1 \sin(u_2)\,, \tag{13}$$

где $X_1 = \psi_r$; $a_1 = \alpha_r$; $b_1 = k_r r_r$; $X_2 = \omega$; $b_2 = z_p k_r / J$; $a_2 = c/J$; c – коэффициент, полученный из аппроксимации кривой момента сопротивления движению; $u_1 = i_s$; $u_2 = \theta$.

Согласно методу АКОР функцию Q назначим в виде:

$$Q = \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{12} X_1 X_2\,. \tag{14}$$

Решение уравнения (10) будем искать в виде:

$$V = A_{11} X_1^2 + A_{12} X_1 X_2 + A_{22} X_2^2\,, \tag{15}$$

где A_{11}, A_{12}, A_{22} в общем случае функции времени, которые могут быть определены из системы обыкновенных дифференциальных уравнений [5]:

$$\frac{dA_{ij}}{dt} - \sum_{p=1}^{n} (\alpha_{pi} A_{pj} + \alpha_{pj} A_{pi}) = -\beta_{ij}\,;\ i = 1,\ 2;\ j = 1,\ 2. \tag{16}$$

В результате, для определения значений A_{ij}, после подстановки выражения (15) в уравнение (10), получим систему дифференциальных уравнений:

$$\frac{dA_{11}}{dt} - 2a_1 A_{11} = -\beta_{11}; \tag{17}$$

$$\frac{dA_{12}}{dt} - (a_1 + a_2) A_{12} = -\beta_{12}\,; \tag{18}$$

$$\frac{dA_{22}}{dt} - 2a_2 A_{22} = -\beta_{22}\,. \tag{19}$$

Используя соотношения (8), (9) для определения управлений, уравнения (12), (13), описывающие математическую модель объекта и дифференциальные уравнения (17) – (19) для определения коэффициентов A_{ij}, в результате получим выражения для нахождения законов изменения во времени управляющих воздействий $i_s(t)$ и $\theta\,(t)$:

$$i_s = -\frac{k_1^2}{2}\left(k_r r_r \frac{\partial V}{\partial \psi_r}\cos\theta + \frac{z_p k_r}{J}\psi_r \frac{\partial V}{\partial \theta}\sin\theta\right); \qquad (20)$$

$$\theta = \sqrt{-k_2^2 i_s\left(k_r r_r \frac{\partial V}{\partial \psi_r}\cos\theta + \frac{z_p k_r}{J}\psi_r \frac{\partial V}{\partial \theta}\sin\theta\right)}. \qquad (21)$$

Соотношения (20) и (21) определяют структуру регулятора, оптимального в смысле минимума функционала (7).

Проверка синтезированных законов управления, заданных соотношениями (20) и (21), осуществлялась путем моделирования с использованием пакета MatLab, где в качестве объекта управления рассматривался тяговый электропривод дизель-поезда. Результаты исследований подтвердили перспективность использования данного подхода к синтезу управляющих воздействий для рассматриваемого способа управления с помощью регулирования амплитуды и фазы вектора поля двигателя.

Выводы. Таким образом, осуществлен синтез системы управления скоростью движения локомотива с помощью регулирования амплитуды и фазы вектора поля двигателя. Это дает возможность построения более эффективных систем управления тяговыми электроприводами локомотивов и дизель-поездов по сравнению с традиционными системами, построенными по принципу амплитудно-частотного управления.

В дальнейшем предполагается обобщение полученных результатов и разработка реальной системы управления электроприводом дизель-поезда.

Список литературы: **1.** Перспективы и проблемы внедрения асинхронного электропривода на тепловозах. *Носков В.И., Марченко В.С., Михневич Г.А. и др.* // Сб. науч. трудов НИИ завода ”Электротяжмаш” и МЭТП. Вып. 1. – 1989. – С. 40–44. **2.** *Носков В.И., Дмитриенко В.Д., Заполовский Н.И., Леонов С.Ю.* Моделирование и оптимизация систем управления и контроля локомотивов. – Х.: ХФИ Транспорт Украины, 2003. – 248 с. **3.** *Дмитриенко В.Д., Заполовский Н.И., Носков В.И. и др.* Равновесные математические модели динамических процессов электропривода переменного тока // Научные ведомости БелГУ. Серия "Информатика, прикладная математика, управление". – Т. 1. – Вып. 1 (19). – Белгород: БелГУ, 2004. – С. 52 – 64. **4.** *Даниленко А.Ф., Дмитриенко В.Д., Заполовский Н.И.* Математические модели оптимальных систем управления тяговым асинхронным приводом тепловозов // Электронное моделирование. – 1991. – Т. 13. – № 2. – С. 40 – 44. **5.** *Красовский А.А.* Системы автоматического управления полетом и их аналитическое конструирование. – М.: Наука, 1973. – 560 с. **6.** *Сандлер А.С., Сарбатов Р.С.* Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями. – М.: Энергия. – 1974. – 328 с. **7.** *Шрейнер Р.Т., Кривицкий М.Я.* Оптимальное по минимуму потерь частотное управление асинхронным электроприводом в электромеханическом переходном процессе // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 1975. – № 1. – С. 75–81. **8.** *Дмитриенко В.Д., Носков В.И., Мезенцев Н.В.* Оптимизация функционала обобщенной работы при нелинейно входящих управлениях // Праці Луганського відділення міжнародної академії інформатизації. – 2005. – № 1 (10). – С. 17 – 22.

Поступила в редакцию 29.10.2005