

УДК 621.9.01

В.Д. Дмитриенко, Н.И. Заполовский, Н.В. Мезенцев

Национальный технический университет "ХПИ", Харьков

## СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ ДИЗЕЛЬ-ПОЕЗДА С СИСТЕМОЙ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЯГОВЫМ АСИНХРОННЫМ ПРИВОДОМ

Рассматривается проектирование оптимальных регуляторов для дизель-поезда с тяговым асинхронным приводом с применением метода аналитического конструирования регуляторов по критерию обобщенной работы (АКОР). Предлагается выполнить декомпозицию модели объекта управления на две модели. Для первой модели с помощью метода АКОР выполнен синтез оптимального регулятора, определяющего необходимый момент для перевода объекта из исходной точки в конечную за заданный интервал времени. С помощью второй модели для реального привода синтезирована система векторного управления, реализующая этот момент.

**Ключевые слова:** оптимальные регуляторы, тяговый асинхронный привод, аналитическое конструирование регуляторов по критерию обобщенной работы, декомпозиция модели, векторное управление.

### Введение

**Постановка проблемы и анализ литературы.** Опыт эксплуатации электроприводов транспортных средств в развитых странах мира показывает, что с учетом основных требований, предъявляемых к современному тяговому электроприводу, наиболее приемлемым типом двигателя для подобных систем является тяговый асинхронный электродвигатель (ТАД) с короткозамкнутым ротором. К этим требованиям, прежде всего, относятся: минимизация массогабаритных показателей, простота и удобство в эксплуатации, высокая надежность, экологическая чистота, низкий уровень шума. Вследствие стремительного развития микропроцессорной техники в последние десятилетия данный тип привода начал активно внедряться и на отечественном подвижном составе, в частности, на дизель-поездах. Однако широкое применение прогрессивных приводов 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 данным объектом с учетом применения современных методов теории оптимального управления, а также способов управления ТАД. С учетом некоторых допущений математическая модель движения дизель-поезда 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 предпринята попытка на основе метода АКОР получить регуляторы для данного типа объектов [4, 5]. Однако в них не рассматривалось применение более перспективного способа векторного управления ТАД, обладающего рядом преимуществ по сравнению с амплитудно-частот-

ным способом. Поэтому целесообразно применить уже имеющиеся наработки [4, 5] и дополнить их перспективным способом управления ТАД.

**Целью статьи** является синтез оптимальных регуляторов для дизель-поезда с тяговым асинхронным приводом с помощью метода АКОР на основе декомпозиции исходной математической модели объекта управления, а также применения векторного способа управления ТАД.

### Основной раздел

В работе [5] с целью упрощения синтеза регуляторов по методу АКОР предлагается выполнить декомпозицию исходной математической модели на две модели: модель, описывающую движение дизель-поезда, и модель процессов в асинхронном двигателе. Тогда задача оптимального управления движением дизель-поезда может быть сформулирована следующим образом: на первой модели необходимо найти оптимальный тяговый момент  $M$ , который обеспечит перевод объекта управления из исходной точки в конечную за заданный интервал времени, а на второй модели – найти такие управляющие воздействия на тяговый асинхронный электродвигатель, которые реализуют момент  $M$  первой модели. Данный подход можно усовершенствовать в плане построения для второй модели системы векторного управления, входом для которой является необходимый момент  $M$ , который должен быть реализован ТАД.

Синтез оптимального регулятора по методу АКОР для первой модели осуществим аналогично [5]. Для второй модели основная идея ориентирования потока заключается в приведении системы уравнений трёхфазного ТАД к ортогональной системе координат  $d-q$ , вращающейся со скоростью вектора потока ротора, в которой переменные представляются как установившиеся величины постоянного тока. Фазу и амплитуду тока статора регулируют так, что-

бы составляющая тока статора  $i_{sd}$ , определяющая поток, оставалась постоянной, а регулирование момента осуществлялось только изменением составляющей тока статора  $i_{sq}$ , создающей момент двигателя.

Математическая модель движения дизель-поезда в данном случае может быть записана в виде:

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} &= k\Omega; \\ \frac{d\Omega}{dt} &= \frac{p}{J}(4M - M_c); \\ \frac{d\Psi_{sd}}{dt} &= u_{sd} - r_s i_{sd} + \omega_k \Psi_{sq}; \\ \frac{d\Psi_{sq}}{dt} &= u_{sq} - r_s i_{sq} - \omega_k \Psi_{sd}; \\ \frac{d\Psi_{rd}}{dt} &= -r_r i_{rd} + (\omega_k - \Omega)\Psi_{rq}; \\ \frac{d\Psi_{rq}}{dt} &= -r_r i_{rq} - (\omega_k - \Omega)\Psi_{rd}; \\ M &= \frac{3pk_r}{2} |\Psi_r \times i_s|, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $S$  – путь, пройденный дизель-поездом;  $t$  – время;  $k$  – постоянный коэффициент для данного типа тягового асинхронного электропривода;  $\Omega$  – угловая скорость вращения ротора;  $p$  – число пар полюсов;  $J$  – момент инерции двигателя и механизма, приведенный к валу двигателя;  $\Psi_{sd}$ ,  $u_{sd}$ ,  $i_{sd}$ ,  $\Psi_{sq}$ ,  $u_{sq}$ ,  $i_{sq}$  – проекции соответственно потокосцепления, напряжения и тока в статорной обмотке на оси  $d$  и  $q$ ;  $\Psi_{rd}$ ,  $i_{rd}$ ,  $\Psi_{rq}$ ,  $i_{rq}$  – проекции соответственно потокосцепления и тока в роторной обмотке на оси  $d$  и  $q$ ;  $r_s$ ,  $r_r$  – сопротивления статорной и роторной обмоток;  $\omega_k$  – скорость вращения системы координат;  $k_r$  – коэффициент связи ротора;  $|\Psi_r \times i_s|$  – векторное произведение вектора потокосцепления ротора  $\Psi_r$  на вектор тока статора  $i_s$ .

Если скорость вращения координат совпадает со скоростью вектора потока ротора  $\omega_k = \omega_\psi$ , то вектор  $\Psi_r$  будет на оси  $d$  представлен своим модулем  $\Psi_{rm}$ , а его проекция на ось  $q$  равна нулю.

Используя выражения  $\Psi_r = i_r L_r + i_s L_m$  и  $\Psi_s = i_s L_s + i_r L_m$ , получим:

$$i_r = \frac{\Psi_r}{L_r} - i_s \frac{L_m}{L_r}; \quad (2)$$

$$\Psi_s = i_s L_s + \frac{L_m}{L_r} \Psi_r - i_s \frac{L_m^2}{L_r} = i_s L'_s + k_r \Psi_r, \quad (3)$$

где  $L'_s = L_s - \frac{L_m^2}{L_r}$ ,  $k_r = \frac{L_m}{L_r}$ .

Подставив проекции на оси  $d$  и  $q$  величин, определяемых по выражениям (2) и (3), в (1) получим:

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} &= k\Omega; \\ \frac{d\Omega}{dt} &= \frac{p}{J}(4M - M_c); \\ \frac{di_{sd}}{dt} L'_s + \frac{d\Psi_{rd}}{dt} k_r &= u_{sd} - r_s i_{sd} + \omega_\psi i_{sq} L'_s; \\ \frac{di_{sq}}{dt} L'_s &= u_{sq} - r_s i_{sq} - \omega_\psi k_r \Psi_{rm} - i_{sd} L'_s \omega_\psi; \\ \frac{d\Psi_{rm}}{dt} &= i_{sd} \frac{L_m r_r}{L_r} - \frac{r_r}{L_r} \Psi_{rm}; \\ 0 &= (\omega_\psi - \Omega) \Psi_{rm} - \frac{r_r L_m}{L_r} i_{sq}; \\ M &= \frac{3pk_r}{2} \Psi_{rm} i_{sq}. \end{aligned} \quad (4)$$

Система управления должна стабилизировать поток ротора  $\Psi_{rm}$  и, следовательно, ток  $i_{sq}$ . При этом выражения (4) упрощаются:

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} &= k\Omega; \\ \frac{d\Omega}{dt} &= \frac{p}{J}(4M - M_c); \\ 0 &= u_{sd} - r_s i_{sd} + \omega_\psi i_{sq} L'_s; \\ \frac{di_{sq}}{dt} L'_s &= u_{sq} - r_s i_{sq} - \omega_\psi k_r \Psi_{rm} - i_{sd} L'_s \omega_\psi; \\ 0 &= i_{sd} \frac{L_m r_r}{L_r} - \frac{r_r}{L_r} \Psi_{rm}; \\ 0 &= (\omega_\psi - \Omega) \Psi_{rm} - \frac{r_r L_m}{L_r} i_{sq}; \\ M &= \frac{3pk_r}{2} \Psi_{rm} i_{sq}. \end{aligned} \quad (5)$$

Из выражений (5), получаем закон формирования тока:

$$\begin{aligned} i_{sd} &= \frac{\Psi_{rm}}{L_m}; \\ i_{sq} &= \frac{2M}{3pk_r \Psi_{rm}}. \end{aligned} \quad (6)$$

Таким образом, для управления ТАД, с учетом поддержания постоянства модуля потокосцепления ротора  $\Psi_{rm}$ , необходимо формировать только момент на ТАД. Данный момент в классической системе векторного управления определяется исходя из соотношения, описывающего механическую часть привода. Он получается на выходе регулятора скорости, реализованного в виде ПИ-регулятора, на вход которого подается требуемая скорость. Структурная схема системы векторного управления [6] приведена на рис. 1, где приняты следующие обозначения:

$\phi_{rm}^*$  – задаваемое значение модуля потокосцепления ротора;  $i_{sd}^*$ ,  $i_{sq}^*$  – вычисляемые значения токов  $i_{sd}$  и  $i_{sq}$ ;  $i_a^*$ ,  $i_b^*$ ,  $i_c^*$  – вычисляемые значения токов

$i_a, i_b, i_c$ ;  $\omega^*$  – задаваемое значение частоты вращения вала ТАД; РС – блок регулятора скорости, на выходе которого получается необходимый момент  $M^*$ ;  $i_{sq}^*$  – рассчитываемое значение тока  $i_{sq}$  по выражению (6); блок «Расчет  $\vartheta_1$ » – блок вычисления

угла поворота системы координат  $\vartheta_1$ ; блок «Расчет  $\Psi_{rm}$ » – блок расчета  $\Psi_{rm}$ ; блоки «dq→abc» и «abc→dq» соответственно блоки преобразования из системы координат d-q в реальную систему координат abc и наоборот; ПЧ – преобразователь частоты; ТАД – тяговый асинхронный двигатель.

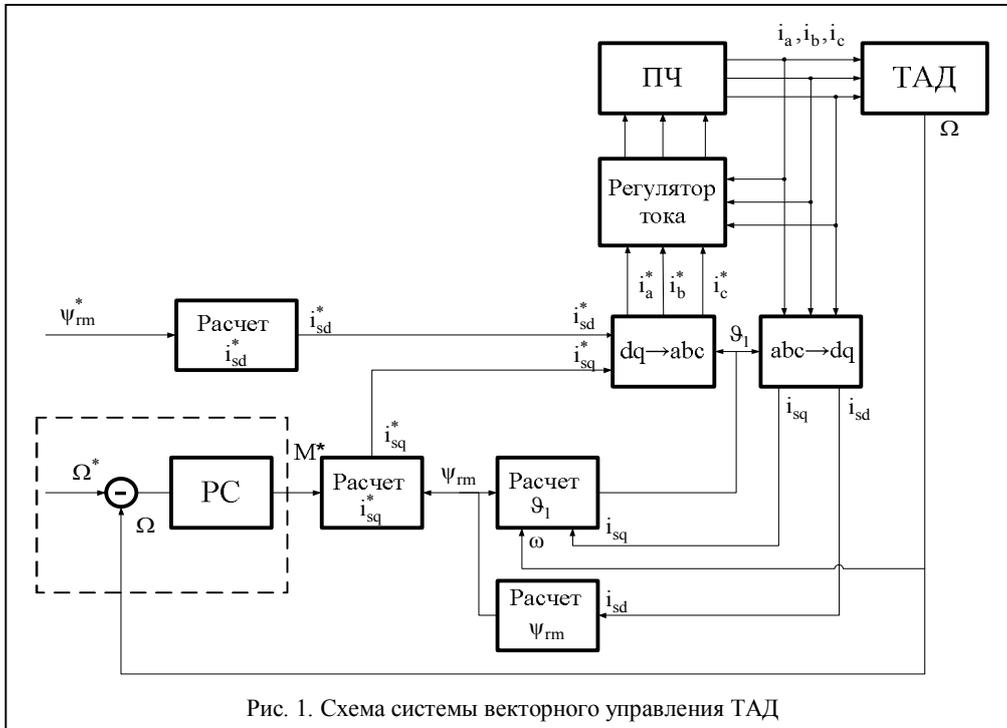


Рис. 1. Схема системы векторного управления ТАД

Данная схема подходит для поддержания двигателем какой-либо заданной скорости. Для рассматриваемого объекта она может использоваться только в частных случаях. Для общего случая управления движением дизель-поездом приведенная схема не подходит.

В работе [5] рассмотрен синтез регуляторов для дизель-поезда с использованием метода АКОР, и предложено разбить исходную модель объекта управления на две подмодели, которые существенно отличаются постоянными времени. Поэтому синтез регуляторов осуществлен для каждой подмодели отдельно. Однако, если посмотреть на исходную математическую модель объекта управления в случае применения векторного управления (5), то в ней можно найти сходства с математической моделью, рассматриваемой в работе [5], а именно выражения, описывающие движение дизель-поезда, в обеих моделях совпадают. Таким образом, целесообразно применить регулятор, синтезированный по методу АКОР для подмодели, описывающей движение дизель-поезда и для объекта, описываемого системой (5). Тогда в системе управления регулятор, синтезированный по методу АКОР, будет определять требуемый момент для перевода дизель-поезда из исходной точки в конечную с учетом минимизации

функционала обобщенной работы, а с помощью подсистемы векторного управления данный момент будет реализовываться на ТАД. В системе управления рис. 1 регулятор, синтезированный по методу АКОР показан пунктиром.

На рис. 2 приведены зависимости расчетной скорости  $V^*$ , которую развивает дизель-поезд при получении на двигателях момента  $M^*$ , а также реальной скорости  $V$ , которую развивает дизель-поезд при отработке задаваемого момента  $M$  системой векторного управления.

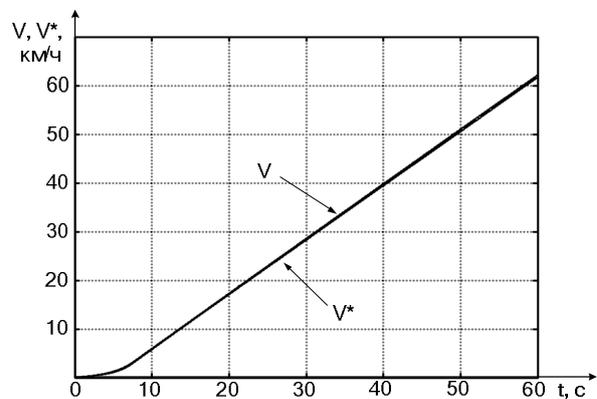


Рис. 2. Расчетная  $V^*$  и реальная  $V$  скорости движения дизель-поезда

На рис. 3 приведены зависимости момента  $M^*$ , синтезированного по методу АКОР, а также реального момента  $M$ , получаемого на двигателях.

Как видно из рис. 3. система векторного управления позволяет с высокой точностью обрабатывать задаваемый (расчетный) момент, что в конечном итоге позволяет экономить энергетические ресурсы.

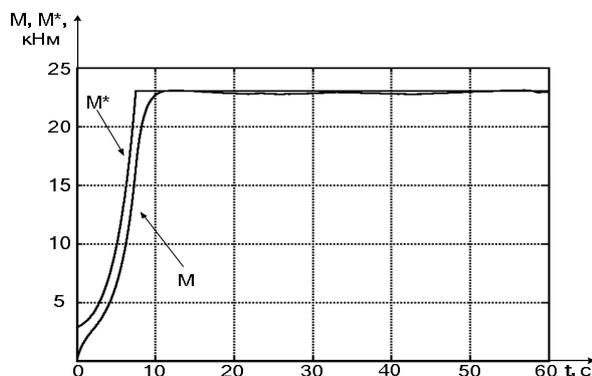


Рис. 3. График зависимостей задаваемого момента  $M^*$  и реального момента на двигателях  $M$

### Выводы

Таким образом, синтезирована комбинированная система управления движением дизель-поезда, включающая в себя регулятор, синтезированный по методу АКОР, определяющий требуемый момент  $M$  для перевода объекта управления из исходной точки в конечную, а также подсистему векторного управления, которая на основе вычисления величин, не поддающихся прямому измерению, позволяет с высоким быстродействием реализовать этот момент на ТАД.

Применение такой системы позволит более точно обрабатывать требуемый момент и, соответственно, экономить топливо.

### 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. Заповольский, С.Ю. Леонов. – Х.: ХФИ "Транспорт Украины", 2003. – 248 с.
5. Дмитриенко В.Д. Синтез оптимальных регуляторов для дизель-поезда методом аналитического конструирования по критерию обобщенной работы / В.Д. Дмитриенко, Н.И. Заповольский, Н.В. Мезенцев // Вісник НТУ "ХПИ". Тематичний випуск: Інформатика і моделювання. – Х.: НТУ "ХПИ", 2010. – № 31. – С. 87 – 94.
6. Рудаков В.В. Асинхронные электроприводы с векторным управлением / В.В. Рудаков, И.М. Столяров, В.А. Дартау. – Л.: Энергоатомиздат. – 1987. – 136 с.

Поступила в редколлегию 4.04.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.А. Серков, Национальный технический университет "ХПИ", Харьков.

### СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНИХ РЕГУЛЯТОРІВ ДЛЯ ДИЗЕЛЬ-ПОЇЗДА З СИСТЕМОЮ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ ТЯГОВИМ АСИНХРОННИМ ПРИВОДОМ

В.Д. Дмитрієнко, Н.І. Заповольський, М.В. Мезенцев

Розглядається проектування оптимальних регуляторів для дизель-поїзда з тяговим асинхронним приводом з застосуванням методу аналітичного конструювання регуляторів за критерієм узагальненої роботи. Пропонується виконати декомпозицію моделі об'єкта управління на дві моделі. Для першої моделі за допомогою методу АКОР виконано синтез оптимального регулятора, що визначає необхідний момент для переведення об'єкта з вихідної точки в кінцеву за заданий інтервал часу. За допомогою другої моделі для реального приводу синтезована система векторного керування, що реалізує цей момент.

**Ключові слова:** оптимальні регулятори, тяговий асинхронний привід, аналітичне конструювання регуляторів за критерієм узагальненої роботи, декомпозиція моделі, векторне управління.

### SYNTHESIS OF OPTIMAL CONTROLLERS FOR DIESEL TRAIN WITH THE SYSTEM OF VECTOR CONTROL OF ASYNCHRONOUS TRACTION DRIVE

V.D. Dmitrienko, N.I. Zapolovsky, N.V. Mezencev

We consider the design of optimal regulators for diesel train with asynchronous traction drive using the method of analytical design of regulators by the criterion of generalized work. Invited to decompose the model of control object into two models. For the first model using the method AKOR synthesized of the optimal regulator, which determines the required torque to transfer an object from a starting point to the destination point for a specific time. With the second model for a real drive synthesized vector control system that realizes this torque.

**Keywords:** optimal regulators, asynchronous traction drive, the analytical construction of regulators by the criterion of the generalized work, the decomposition model, the vector control.