

СИНТЕЗ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ДВУХОСНЫХ ЭЛЕКТРОВОЗОВ

Б. В. Жеребкин, к.т.н.

Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г. В. Плеханова

Д. А. Шокарев, ст. преп., Е. И. Скапа, студ.

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского

ул. Первомайская, 20, 39600, г. Кременчуг, Украина

E-mail: seem@kdu.edu.ua

Приведена методика синтеза структуры системы векторного управления тяговым электротехническим комплексом с IGBT – преобразователями и тяговыми асинхронными короткозамкнутым двигателями промышленных двухосных электровозов. Показаны результаты работы многодвигательной тяговой системы.

Ключевые слова: синтез, структура, тяговый электромеханический комплекс.

Введение. Основным видом промышленного транспорта горнорудных предприятий с подземными видами производств являются двухосные электровозы сцепной массой 7–14 кН.

Анализ предыдущих исследований. Выпускаемые отечественной промышленностью электровозы оборудуются энергонезэффективными системами тяговых электротехнических комплексов (ТЭТК) постоянного тока с контактно–резистивной системой управления [1]. В последние пять лет в стране возродился интерес к разработке новых электроэнергоэффективных систем ТЭТК на основе современной преобразовательной и микропроцессорной техники [2–4]. Создаются новые образцы тяговых комплексов, в том числе переменного тока: IGBT – преобразователь – автономный инвертор. При этом, как правило, используется векторное управление тяговыми асинхронными двигателями (ТАД) [3, 4], при котором регулирование тока (напряжения) осуществляется по двум каналам, которые соответствуют проекции вектора на оси вращающейся системы координат, совмещенной с вектором потокосцепления. При этом, проблема регулирования заключается в необходимости точной настройки системы, поскольку она (система) нелинейная.

Цель работы. Синтез структуры и расчет результатов системы векторного управления двухдвигательным тяговым электротехническим комплексом.

Материал и результаты исследования. Поскольку каналы регулирования в системе векторного управления разделены, анализ канала регулирования потокосцепления ротора производится в режиме короткого замыкания двигателя, а канала регулирования момента и частоты вращения двигателя – в режиме холостого хода, когда электромагнитные переходные процессы в канале регулирования потокосцепления ротора уже завершились. В режиме короткого замыкания двигателя частота вращения $\omega = 0$, а, следовательно, электромагнитный момент асинхронного двигателя, тоже равен нулю. Это возможно только в том случае, если пространственный угол между осью u и вектором потокосцепления ротора равен нулю, т. е. $\cos \gamma = 1$;

$\sin \gamma = 0$. Тогда для составляющих переменных состояния асинхронного двигателя по оси u справедливы следующие соотношения:

$$U_{su} = U_{s1} = U_{sm};$$

$$i_{su} = i_{s1} = i_{sm};$$

$$\psi_{ru} = \psi_{rm},$$

а по оси v составляющие напряжения, тока статора и потокосцепления ротора равны нулю. При этих условиях канал регулирования потокосцепления ротора асинхронного двигателя описывается линейной системой уравнений:

$$i_{sm} = \frac{1}{R_s} (T_r p + 1) U_{sm} / (\sigma T_s T_r p^2 + (T_s + T_r) p + 1)$$

$$\psi_{rm} = \frac{L_m}{T_r p + 1} i_{sm},$$

где $T_s = \frac{L_s}{R_s}$ – электромагнитная постоянная времени

статорной цепи двигателя, $T_r = \frac{L_r}{R_r}$ – электромагнитная

постоянная времени роторной цепи двигателя.

Электропривод рудничного электровоза предъявляет высокие требования к динамическим режимам работы, поэтому канал регулирования потокосцепления ротора необходимо выполнять двухконтурным. Регулятор потокосцепления РТ во внешнем контуре регулирования для астатической системы выполняется в виде ПИ–регулятора. Внутренний канал регулирования составляющей тока статора i_{s1} строится с ПИД–регулятором. При разработке практических систем векторного управления дифференцирующую составляющую ПИД–регулятора в контуре регулирования составляющей тока статора i_{s1} опускают, так как величина коэффициента рассеяния асинхронного двигателя мала. Аperiodическое звено фильтра тоже можно опустить. Вся система управления при этом упрощается. Расчетные и экспериментальные иссле-

дования показали, что указанные допущения существенного влияния на качество регулирования не оказывают. Структурная схема упрощенного канала регули-

рования потокосцепления ротора двигателя приведена на рис. 1.

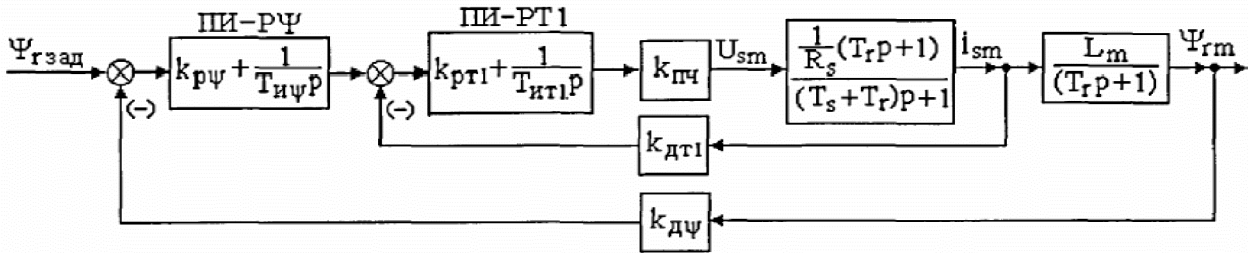


Рисунок 1 – Структура канала регулирования потокосцепления ротора асинхронного двигателя с двумя ПИ-регуляторами

Предварительный расчет параметров регуляторов с учетом сделанных допущений может быть выполнен по приближенным формулам для регулятора составляющей тока статора тока i_{s1} РТ1:

$$k_{pT1} \approx \frac{L_s}{T_\mu k_{nc} k_{\delta T1}}; \quad (4)$$

$$T_{иT1} \approx \frac{T_\mu k_{nc} k_{\delta T1}}{R_s}.$$

А для регулятора потокосцепления ротора двигателя РΨ:

$$k_{p\Psi} \approx \frac{T_r k_{\delta T1}}{2T_\mu k_{\delta\Psi} L_m}; \quad (5)$$

$$T_{и\Psi} \approx \frac{2T_\mu k_{\delta\Psi} L_m}{k_{\delta T1}}.$$

Если величиной коэффициента рассеяния двигателя σ пренебречь, то внутренний контур канала регулирования угловой скорости по составляющей тока статора i_{s2} можно построить с ПИ-регулятором РТ2. Внешний контур регулирования скорости с П-регулятором, если нет строгих требований к статической ошибке регулирования в установившемся режиме, то аналитический расчет регуляторов канала регулирования скорости двигателя производится, ис-

ходя из предположения, что переходные процессы в канале регулирования потокосцепления ротора завершились. В этом случае выражение для электромагнитного момента двигателя в системе координат, ориентированной по вектору потокосцепления ротора, имеет вид:

$$M_\vartheta = \frac{3L_m}{2L_r} i_{s2} \Psi_{rm}. \quad (6)$$

Составляющая тока статора находится из выражения:

$$i_{s2} = \frac{\frac{1}{R_s} (T_{rp} + 1)}{\sigma T_s T_r p^2 + (T_s + T_r) p + 1} U_{sm} \sin 2\gamma, \quad (7)$$

где значение $\sin 2\gamma$ определяется следующим образом:

$$\sin 2\gamma = \sqrt{1 - \cos^2 2\gamma} = \sqrt{1 - \frac{R_s^2 \Psi_{rm}^2}{L_m^2 U_{sm}^2}}. \quad (8)$$

Структурная схема канала регулирования частоты вращения асинхронного двигателя с П-регулятором скорости приведены на рис. 2.

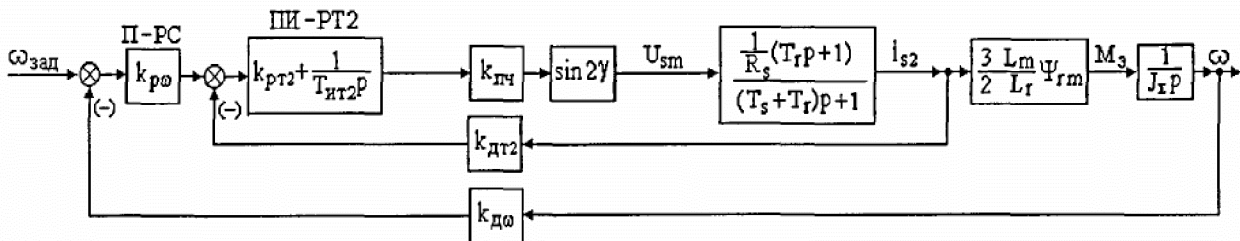


Рисунок 2 – Двухконтурная схема канала регулирования частоты вращения ротора двигателя с П-регулятором скорости

Расчет параметров ПИД-регулятора составляющей тока статора i_{s2} РТ2 производится из условия настройки контура по критерию технического оптиму-

ма. Выражение для настроек регулятора имеет следующий вид: коэффициент усиления ПИ-регулятора РТ2

$$k_{PT2} = \frac{(T_s + T_r)R_s}{2T_\mu k \sin 2\gamma k_{dT2}}, \quad (9)$$

где $k_{PT2} = \frac{\omega_{r\max}}{i_{s2\max}}$, – коэффициент усиления датчика

обратной связи по составляющей тока статора i_{s2} ;

$i_{s2\max} = \frac{2L_r M_k}{3L_m \Psi_{rm}}$ – максимальное значение составляющей тока i_{s2} , соответствующей критическому

моменту двигателя M_k .

Коэффициент усиления регулятора скорости РС для данной структурной схемы можно определить по формуле:

$$k = \frac{J_\Sigma k_{dT2}}{4T_\mu k_{oc} \Psi_{rm}}, \quad (10)$$

где J_Σ – суммарный момент инерции ротора двигателя

и подвижной части механизма, $k_{oc} = \frac{\omega_{r\text{зад}}}{\omega_{r\max}}$ – ко-

эффициент усиления датчика скорости.

При построении контура регулирования скорости двигателя с ПИ–регулятором РС параметры регулятора можно определить следующим образом:

$$T_{pc} = 8T_\mu; \quad (11)$$

$$T_{uc} = \frac{32T_\mu^2 k_{oc} \Psi_{rm}}{J_\Sigma k_{om2}}. \quad (12)$$

На выходах регуляторов скорости РТ1 и РТ2 образуются сигналы, пропорциональные составляющим вектора напряжения статора двигателя в осях координат, ориентированных по вектору потокосцепления ротора двигателя U_{s1} и U_{s2} . Для перехода из системы координат (1 – 2) в систему координат ($u - v$) используется обратный преобразователь координат в соответствии со следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} U_{su} &= U_{s1} \cos \gamma + U_{s2} \sin \gamma; \\ U_{sv} &= -U_{s1} \sin \gamma + U_{s2} \cos \gamma. \end{aligned} \quad (13)$$

Задание амплитуды выходного напряжения преобразователя частоты в электроприводе с векторным управлением осуществляется в соответствии с выражением:

$$U_{sm} = \sqrt{U_{su}^2 + U_{sv}^2}. \quad (14)$$

Задание частоты выходного напряжения преобразователя осуществляется следующим образом:

$$\omega_0 = \frac{(U_{sv} - R_s i_{sv}) \Psi_{su} - (U_{su} - R_s i_{su}) \Psi_{sv}}{\Psi_{su}^2 + \Psi_{sv}^2}. \quad (15)$$

На рис. 3. представлена структурная схема динамической модели системы управления асинхронным частотно-регулируемым электроприводом.

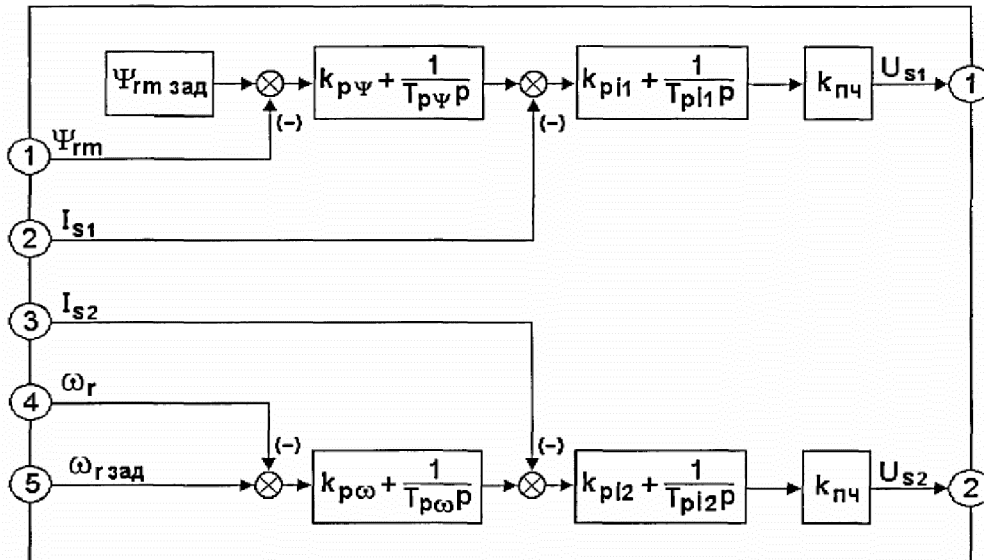


Рисунок 3 – Структурная схема системы регулирования при векторном управлении асинхронным частотно-управляемым электроприводом

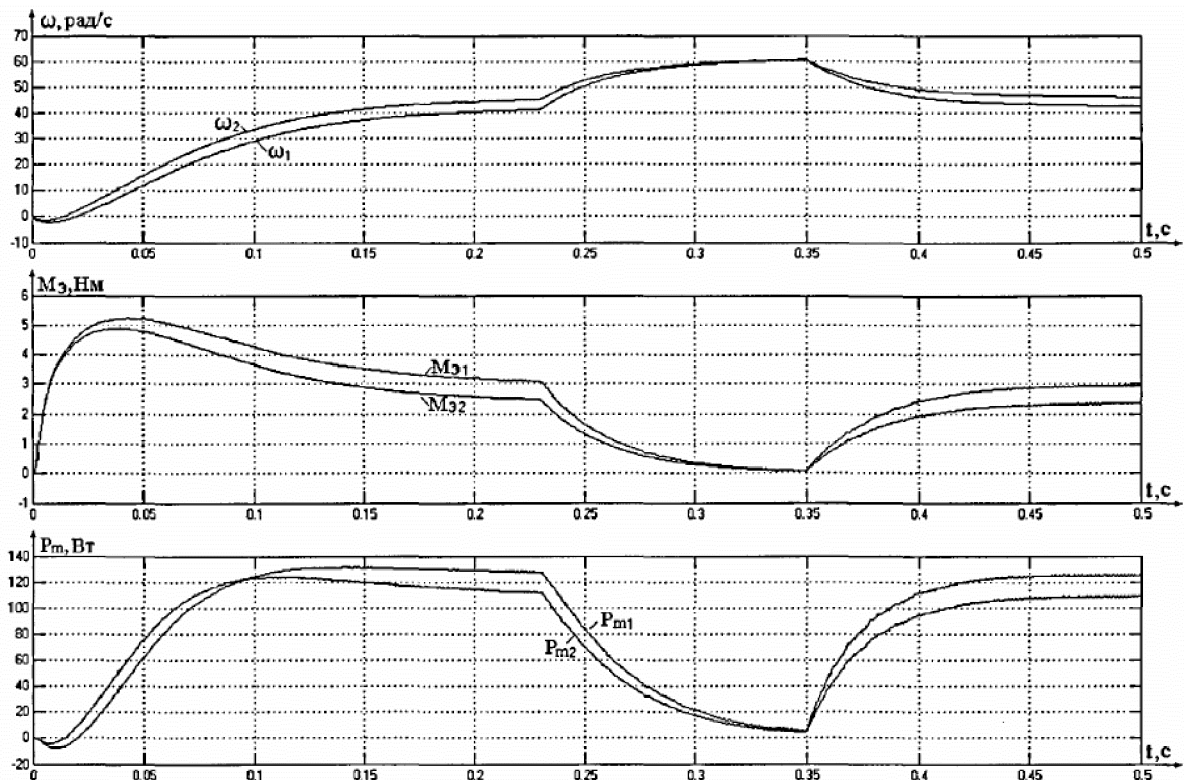


Рисунок 4 – Механические характеристики асинхронных электроприводов многодвигательной электромеханической системы

Выходными параметрами этой модели являются составляющие напряжения на выходе преобразователя частоты U_{s1} , U_{s2} в осях (1 – 2). Входными управляющими воздействиями являются модуль потокосцепления ротора двигателя ψ_{rm} , составляющие тока статора I_{s1} , I_{s2} в системе координат (1 – 2), частота вращения ротора ω_r и сигнал задания частоты вращения ротора $\omega_{зад}$, являющийся выходным сигналом датчика интенсивности. Ненулевые начальные условия в этой модели отсутствуют. Внутреннее возмущающее воздействие представляет собой сигнал задания потокосцепления ротора двигателя $\psi_{rmзад}$.

На представленных графиках видно, что установившаяся частота вращения ротора ТАД при нагрузке 3 Нм (ω_1) составляет $41,1 \text{ рад/с}$, а при моменте сопротивления $2,4 \text{ Нм}$ равна $45,2 \text{ рад/с}$ (ω_2). Отклонение от заданной частоты вращения составило $34,5 \%$ для ω_1 и 28% – для ω_2 . Рассогласование скоростей вращения роторов ТАД составило $9,1 \%$. Неодинаковыми получились электромагнитные моменты двигателей M_{e1} и M_{e2} , выходные механические мощности на валах ТАД P_{m1} и P_{m2} . Разница по мощности на валах ТАД в установившемся режиме составила $12,8 \%$.

Похожие результаты получены при набросе и сбросе ступенчатого сигнала задания скорости вращения роторов ТАД амплитудой 1 В , соответствующего

частоте вращения $15,7 \text{ рад/с}$. Рассогласование скоростей электроприводов составило $6,7 \%$. Для электропривода с нагрузкой $2,4 \text{ Нм}$ фактическое значение скорости вращения ротора, полученное при набросе ступеньки 1 В , оказалось практически равным значению заданной скорости вращения до наброса ступеньки. Разница выходных мощностей при набросе ступеньки задания составила $13,9 \%$. Таким образом, в условиях неравномерной нагрузки на асинхронные электроприводы многодвигательной электромеханической системы, с ростом сигнала задания скорости вращения роторов ТАД, снижается отклонение фактической скорости вращения от заданного значения и рассогласование скоростей вращения между электроприводами, а значение выходной мощности на валах двигателей растет.

Выводы. Классическая система векторного управления, выполненная по двухканальной схеме регулирования по потокосцеплению ротора и электромагнитному моменту двигателя с двухконтурным подчиненным регулированием в каждом канале, обеспечивает высокое качество управления асинхронным электроприводом при изменениях как управляющего, так и возмущающего воздействий.

При неизменном сигнале задания скорости вращения роторов ТАД и росте нагрузки на электроприводы наблюдается отклонение фактической скорости вращения от заданного значения. Удержать на заданном уровне скорости вращения электроприводов можно путем изменения самого сигнала задания. В случае

неравномерной нагрузки на электроприводы необходимо изменять сигнал задания индивидуально для каждого электропривода.

Распределение нагрузки между тяговыми двигателями рудничных электровозов с учетом всех специфических особенностей его работы классическими методами выполнить затруднительно. Эта задача может быть решена на основе экспертных оценок системой управления, построенной на теории нечетких множеств и нечеткой логики. Система управления многодвигательным асинхронным тяговым электроприводом рудничных электровозов должна содержать на нижнем уровне систему векторного управления тяговыми двигателями, а на верхнем уровне – систему формирования сигналов задания скорости вращения индивидуально для каждого электропривода с использованием аппарата нечеткой логики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волотковский С.А. Рудничная электровозная тяга. 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1981. – 389 с.
2. Синчук О.Н., Юрченко Н.Н., Синчук И.О. и др. Комбинаторика преобразователей напряжения современ-

ных тяговых электроприводов рудничных электровозов.–К.: Институт электродинамики НАНУ, 2006. – 250 с.

3. Жабоев М.Н., Озеров М.И., Косинцев В.А., Чумаков В.В. Возможности совершенствования тягового привода контактных рудничных электровозов // Электротехника. – 1993. – № 5.

4. Жеребкин Б.В., Рудаков В.В. Алгоритм управления тяговым электроприводом. Материалы II международной науч.-практ. конф., «Интеллектуальные электромеханические устройства, системы и комплексы». – Новочеркасск : Изд. ЮРГТУ (НПИ), 2001. – С. 25–26.

5. Козярук А.Е., Рудаков В.В. Современное и перспективное алгоритмическое обеспечение частотно-регулируемых электроприводов. – С-Пб.: Изд. Санкт-Петербургская электротехническая компания, 2004. – 127 с.

Стаття надійшла 17.04.2011 р.
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.
Сінчуком О.М.

СИНТЕЗ СТРУКТУРИ СИСТЕМИ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ ДВООСНИХ ЕЛЕКТРОВОЗІВ

Б. В. Жеребкин, к.т.н.

Санкт-Петербурзький державний гірничий інститут ім. Г. В. Плеханова

Д. А. Шокарьов, ст. викл., Є. І. Скапа, студ.

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

вул. Першотравнева, 20, 39600, м. Кременчук, Україна

E-mail: seem@kdu.edu.ua

Приведена методика синтезу структури системи векторного управління тяговим електротехнічним комплексом з IGBT – перетворювачами і тяговими асинхронними короткозамкнутими двигунами промислових двоохосьових електровозів. Показані результати роботи багатодвигунної тягової системи.

Ключові слова: синтез, структура, тяговий електромеханічний комплекс.

SYNTHESIS OF STRUCTURE OF SYSTEM OF VECTORIAL MANAGEMENT OF HAULING ELECTROMECHANICS COMPLEXES OF DIAXONIC ELECTRIC LOCOMOTIVES

B. Zherebkin Cand. Sc.Eng.

St. Petersburg Georgi Plekhanov State Mining Institute

D. Shokarev, Sen. Lect., E. Skapa, stud.

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, 39600, Kremenchuk, Ukraine

E-mail: seem@kdu.edu.ua

Methodology over of synthesis of structure of the system of vectorial management is brought by a hauling electrical engineering complex with IGBT are transformers and by the hauling asynchronous k.z. engines of industrial biaxial electric locomotives. Results are shown robots of the multimotive hauling system.

Key words: synthesis, structure, hauling electromechanics complex.