

УДК 621.318.562.5

МОДАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Коротков Максим Федорович,

аспирант кафедры «Электротехнические комплексы и системы»
(Политехнического института) СФУ Россия, 660041, г. Красноярск,
пр. Свободный, 79. E-mail: hamsterboo@mail.ru

Пахомов Александр Николаевич,

канд. техн. наук, доцент кафедры «Электротехнические комплексы
и системы» (Политехнического института) СФУ,
Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79. E-mail: pnalex@mail.ru

Федоренко Александр Александрович,

канд. техн. наук, доцент кафедры «Электротехнические комплексы
и системы» (Политехнического института) СФУ,
Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79. E-mail: alfedor47@mail.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью создания быстродействующих замкнутых систем асинхронного электропривода, находящих все большее применение в промышленности.

Цель работы: построение замкнутой системы преобразователь частоты с широтно-импульсной модуляцией выходного напряжения – асинхронный двигатель с модальным управлением.

Методы исследования: теоретические исследования выполнены с привлечением современной теории электропривода и методов теории автоматического управления. Теоретические исследования подтверждены модельным экспериментом.

Результаты: Описан способ формирования линейных уравнений состояния асинхронного двигателя с компенсацией перекрестных обратных связей по току с помощью технических средств и заданием определенного алгоритма функционирования замкнутой системы, обеспечивающего возможность расчета коэффициентов модального регулятора. Разработана модель асинхронного электропривода, учитывающая дискретные свойства преобразователя частоты с широтно-импульсной модуляцией выходного напряжения. Исследованы динамические режимы работы замкнутой системы преобразователь частоты – асинхронный двигатель с модальным управлением в среде имитационного моделирования Simulink пакета MatLab.

Выводы: рассмотренная в работе методика построения системы асинхронного электропривода с модальным управлением позволяет существенно увеличить его быстродействие в динамических режимах работы.

Ключевые слова:

Модальный регулятор, асинхронный электропривод, векторная система, широтно-импульсная модуляция, математическая модель.

В настоящее время системы управления асинхронным электроприводом (АЭП) с преобразователем частоты (ПЧ) с автономным инвертором напряжения (АИН) строятся на принципах подчиненного регулирования, что не позволяет достичь предельного быстродействия [1–3]. Вопросы синтеза модальных регуляторов, как правило, рассматриваются на базе электроприводов постоянного тока [4–15], не смотря на сложившуюся тенденцию перехода на АЭП. Снабдив АЭП модальным регулятором, построенным на основе суммирования обратных связей по вектору состояния, можно обеспечить быстродействие в динамических режимах работы, близкое к предельному. Целью работы является определение структуры и параметров модальных регуляторов частотно управляемого АЭП и проверки эффективности принятых при этом решений методами имитационного моделирования в среде *MatLab*.

На рис. 1 приведена функциональная схема ПЧ с АИН с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ).

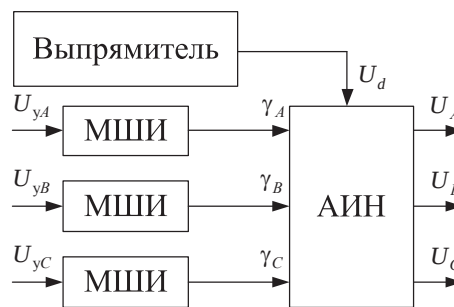


Рис. 1. Функциональная схема ПЧ с АИН с ШИМ

Модулятор широтно-импульсный (МШИ) i -й фазы ($i \in \{A, B, C\}$) ПЧ по сигналу управления U_{yi} формирует скважность включения вентилей γ_i АИН с целью формирования из постоянного напряжения выпрямителя U_d трехфазного напряжения U_i требуемой частоты и амплитуды, подаваемого на статорную обмотку асинхронного двигателя (АД).

Функциональная схема МШИ приведена на рис. 2.

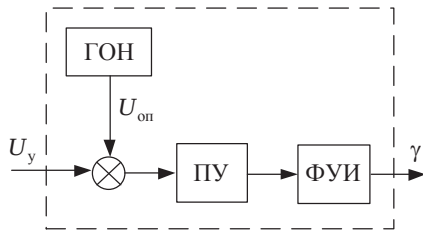


Рис. 2. Функциональная схема МШИ ПЧ

Модулятор широтно-импульсный включает в себя [16]:

- генератор опорного напряжения (ГОН), вырабатывающий напряжение пилообразной формы $U_{оп}$;
- пороговое устройство (ПУ), выдающее сигнал минимального уровня (нулевой сигнал) при разнице опорного и напряжения управления $(U_{оп} - U_y) > 0$ и сигнал максимального уровня (единичный сигнал) при $(U_{оп} - U_y) < 0$;
- формирователь управляющих импульсов (ФУИ), преобразующий сигнал ПУ в соответствующие управляющие импульсы γ для силовых вентилях АИН.

Поскольку в ПЧ с АИН с ШИМ автономный инвертор формирует не только частоту, но и амплитуду выходного напряжения, влияние звена постоянного тока на динамические свойства системы при синтезе можно не учитывать. Допущения, принятые при математическом описании АИН как элемента системы автоматического управления:

- все вентили инвертора – идеальные ключи;
- время переключения вентилях равно нулю;
- влияние процессов коммутации на форму выходного напряжения АИН не учитывается.

Математическая модель АД в форме Куши в декартовой системе координат $u-v$, вращающейся с произвольной скоростью ω_k , имеет вид [17, 18]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{di_{1u}}{dt} &= \frac{1}{R_e T_e} u_{1u} - \frac{1}{T_e} i_{1u} + \frac{k_2}{T_2 R_e T_e} \Psi_{2u} + \\ &+ \frac{k_2 Z_p}{R_e T_e} \omega \Psi_{2v} + \omega_k i_{1v}; \\ \frac{di_{1v}}{dt} &= \frac{1}{R_e T_e} u_{1v} - \frac{1}{T_e} i_{1v} + \frac{k_2}{T_2 R_e T_e} \Psi_{2v} - \\ &- \frac{k_2 Z_p}{R_e T_e} \omega \Psi_{2u} - \omega_k i_{1u}; \\ \frac{d\Psi_{2u}}{dt} &= R_2 k_2 i_{1u} - \frac{1}{T_2} \Psi_{2u} + (\omega_k - Z_p \omega) \Psi_{2v}; \\ \frac{d\Psi_{2v}}{dt} &= R_2 k_2 i_{1v} - \frac{1}{T_2} \Psi_{2v} - (\omega_k - Z_p \omega) \Psi_{2u}; \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{3Z_p k_2}{2J} i_{1v} \Psi_{2u} - \frac{3Z_p k_2}{2J} i_{1u} \Psi_{2v} - \frac{1}{J} M_c, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $u_{1u}, u_{1v}, i_{1u}, i_{1v}, \Psi_{2u}, \Psi_{2v}$ – проекции на оси u и v декартовой системы координат результирующих векторов напряжения статора u_1 , тока статора i_1 , пото-

косцепления ротора Ψ_2 соответственно; ω – угловая скорость вращения ротора; ω_k – скорость вращения системы координат $u-v$; M_c – момент статического сопротивления на валу двигателя; Z_p – число пар полюсов; J – момент инерции механической части привода; T_e и R_e – эквивалентные электромагнитная постоянная времени и активное сопротивление цепи статора АД; R_2 и T_2 – активное сопротивление и электромагнитная постоянная времени цепи ротора АД; k_2 – коэффициент электромагнитной связи ротора АД. Выражения для расчета параметров двигателя можно найти в [17, 18].

Уравнения (1) справедливы при следующих допущениях [17, 18]:

- машина симметрична и имеет равномерный воздушный зазор;
- магнитопровод машины ненасыщен;
- магнитодвижущая сила обмоток имеет синусоидальное распределение по рабочему зазору;
- параметры двигателя имеют постоянное значение.

Уравнения динамики АД (1) носят выраженный нелинейный характер и в векторно-матричной форме имеют вид:

$$\dot{X} = F(X, G),$$

где X и G – векторы переменных состояния и входных воздействий:

$$X = \begin{pmatrix} i_{1u} \\ i_{1v} \\ \Psi_{2u} \\ \Psi_{2v} \\ \omega \end{pmatrix} \text{ и } G = \begin{pmatrix} u_{1u} \\ u_{1v} \\ \omega_k \\ M_c \end{pmatrix}.$$

Процедура синтеза модального регулятора предполагает линейность объекта управления. Линеаризация уравнений динамики (1) методом малых приращений путем разложения в ряд Тейлора дает достаточно громоздкую структуру линеаризованных уравнений, которые справедливы только в окрестностях отклонений переменных состояния относительно центра разложения [19].

Поэтому в работе выполнена компенсация внутренних перекрестных связей по току внешними звеньями [20]. В результате в системе координат $x-u$, ориентированной по вектору потокоцепления ротора ($\Psi_2 = \Psi_{2x}, \Psi_{2y} = 0$), математическая модель АД примет вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{di_{1u}}{dt} &= \frac{1}{R_e T_e} u_{1u} - \frac{1}{T_e} i_{1u} + \frac{k_2}{T_2 R_e T_e} \Psi_{2u}; \\ \frac{di_{1v}}{dt} &= \frac{1}{R_e T_e} u_{1v} - \frac{1}{T_e} i_{1v} - \frac{k_2 Z_p}{R_e T_e} \omega \Psi_{2u}; \\ \frac{d\Psi_{2u}}{dt} &= R_2 k_2 i_{1u} - \frac{1}{T_2} \Psi_{2u}; \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{3Z_p k_2}{2J} i_{1v} \Psi_{2u} - \frac{1}{J} M_c. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Заметим, что скорость вращения координат х-у равна скорости вращения вектора потокосцепления ротора $\omega_k = \omega_0$, которая определяется значениями переменных состояния асинхронной машины на основании четвертого уравнения системы (1) и становится внутренней координатой.

Нелинейные компоненты второго и четвертого уравнений (2) с помощью технических средств нейтрализовать не удастся. Однако это можно сделать, обеспечив определенный алгоритм функционирования системы. Если обеспечить постоянство потокосцепления ротора в процессе регулирования скорости, то второе и четвертое уравнение (2) становятся линейными [20].

Синтез модальных регуляторов осуществляется для двух линейных подсистем – подсистемы стабилизации Ψ_2 и подсистемы управления ω . Матрицы динамики и входа уравнений состояния для первой подсистемы определяются первым и третьим уравнениями системы (2), в которых переменными состояниями являются Ψ_2 и формирующий его ток i_{1x} :

$$A_1 = \begin{pmatrix} -\frac{1}{T_s} & \frac{k_2}{T_2 R_3 T_s} \\ R_2 k_2 & -\frac{1}{T_2} \end{pmatrix} \text{ и } B_1 = \begin{pmatrix} \frac{k_n}{R_3 T_s} \\ 0 \end{pmatrix}.$$

В уравнениях второй подсистемы (второе и четвертое уравнения системы (2)) переменными состояниями являются ток i_{1y} и скорость вращения ротора ω , при этом предполагается постоянство потокосцепления Ψ_2 , которое поддерживается подсистемой стабилизации Ψ_2 на номинальном уровне. В результате получаются линейные уравнения состояния со следующими матрицами входа и выхода:

$$A_2 = \begin{pmatrix} -\frac{1}{T_s} & -\frac{k_2 Z_p}{R_3 T_s} \Psi_{2n} \\ \frac{3Z_p k_2}{2J} \Psi_{2n} & 0 \end{pmatrix} \text{ и } B_2 = \begin{pmatrix} \frac{k_n}{R_3 T_s} \\ 0 \end{pmatrix}.$$

В матрицах входа учтен коэффициент передачи ПЧ АИН с ШИМ k_n , который определяется отношением амплитуд основной гармоники выходных напряжений АИН и выходных сигналов преобразователя координат прямого тракта. Статический момент при синтезе регулятора принимается равным $M_c = 0$, но учитывается при моделировании системы.

Коэффициенты модальных регуляторов K_{11} и K_{12} подсистемы стабилизации Ψ_2 и K_{21} и K_{22} подсистемы управления ω рассчитаны по методике, приведенной в [20]. Замкнутая подсистема Ψ_2 настраивается на модульный оптимум, а подсистема регулирования скорости вращения ротора АД – на биномиальную настройку [20]. Некомпенсируемая постоянная времени, определяемая инерционностью и временем чистого запаздывания МШИ, наличием фильтров в каналах регулирования и дискретностью АИН принята равной $T_\mu = 3,5$ мс [21].

На рис. 3 приведена функциональная схема, полученная в результате синтеза замкнутой системы частотно-управляемого асинхронного электропривода.

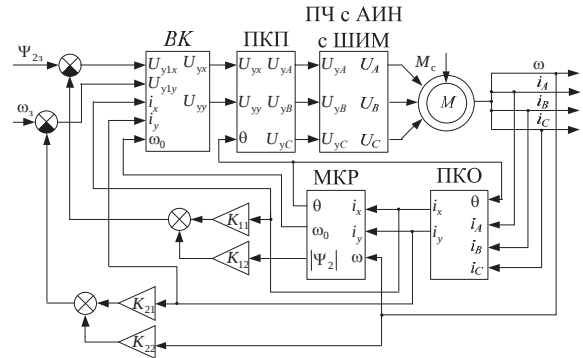


Рис. 3. Функциональная схема замкнутой системы асинхронного электропривода

На функциональной схеме приняты следующие обозначения: M – модель трехфазного АД (в работе принят двигатель серии RA100L4 с номинальными данными $P_n = 3$ кВт, $n_n = 1420$ об/мин); BK – блок компенсаций перекрестных связей по току статора (рассмотрен в [20]); Ψ_{2s} и ω_s – заданные значения потокосцепления и скорости ротора АД; K_{ij} – коэффициенты обратных связей модального регулятора; ПКП, ПКО – преобразователи координат прямого и обратного каналов [17]; МКР – модель электромагнитного контура ротора АД.

Рассмотренная система векторного управления трехфазным асинхронным двигателем содержит модель косвенного определения модуля и скорости вращения вектора потокосцепления ротора. Структурная схема МКР показана на рис. 4. В основе этой структуры лежат уравнения роторной цепи АД, записанные в системе координат, ориентированной по вектору потокосцепления ротора [22]:

$$|\Psi_2| = \frac{L_m}{T_2 s + 1} i_{1x} \text{ и } \omega_0 = \frac{L_m i_{1y}}{T_2 |\Psi_2|} + Z_p \omega,$$

где s – оператор Лапласа; L_m – амплитудное значение взаимной индуктивности обмоток статора и ротора; $|\Psi_2|$ – модуль вектора потокосцепления ротора; θ – угловое положение вектора потокосцепления ротора относительно неподвижной в пространстве системы координат.

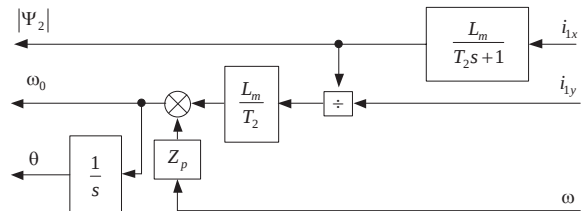


Рис. 4. Структурная схема МКР

С целью сравнительной оценки эффективности введения модальных регуляторов, правомерности принятых при расчете их параметров подходов и влияния дискретных свойств ПЧ с ШИМ на про-

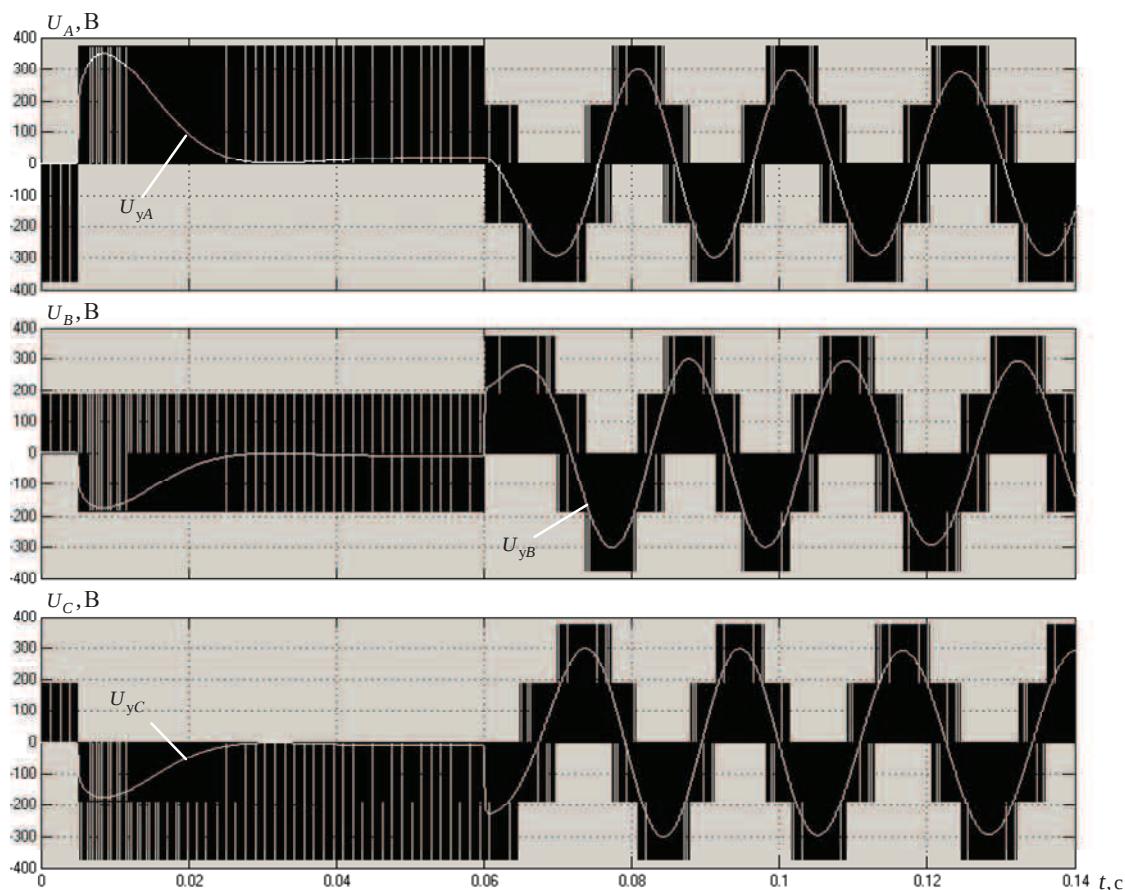


Рис. 5. Графики выходных напряжений ПЧ с ШИМ и сигналов управления

цессы в системах векторного частотного управления асинхронным электроприводом, снабженным модальным регулятором, разработана и реализована в пакете MatLab соответствующая функциональная схема рис. 3 имитационная модель.

Исследования, выполненные с помощью этой модели, частично представлены на рис. 5, 6.

На рис. 5 приведены графики выходных фазных напряжений автономного инвертора с ШИМ, наложенные на соответствующие графики фазных сигналов управления, поступающих на входы МШИ.

На рис. 6 представлены графики изменения выходных координат электропривода: модуля вектора потокосцепления ротора $|\Psi_2|$, скорости вращения ротора ω и электромагнитного момента M .

Графики иллюстрируют три этапа (режима) работы системы автоматического управления:

- 1) формирование заданного значения модуля вектора потокосцепления ротора (этап возбуждения);
- 2) разгон двигателя до заданной скорости при постоянном потокосцеплении;
- 3) наброс статической нагрузки.

Как следует из графиков, качество динамических режимов в рассматриваемой системе достаточно близко к теоретически ожидаемому. При выбранном значении некомпенсированной постоянной времени $T_\mu = 3,5$ мс время переходного процесса

подсистемы стабилизации $|\Psi_2|$ равно $t_{\text{пер} \Psi_2} = 15,2$ мс, а подсистемы регулирования $\omega t_{\text{пер} \omega} = 16,7$ мс. Теоретические значения при том же значении T_μ при настройке на модульный оптимум $t_{\text{пер} \Psi_2} = 4,14 T_\mu = 14,49$ мс, а при биномиальной настройке $t_{\text{пер} \omega} = 4,74 T_\mu = 16,59$ мс. В системе с подчиненным регулированием переменных при тех же исходных данных быстродействие ниже, как минимум в два раза [21].

Существенные пульсации (дискретность) напряжений формируемых АИН, не смотря на высокое быстродействие, обеспечиваемое модальным регулятором, не приводят к сбоям в работе системы. Управляющие сигналы МШИ остаются гладкими и практически отсутствуют пульсации и в выходных переменных электропривода.

Выводы

1. Рассмотренная система частотного управления асинхронным электроприводом с модальным регулятором обладает примерно вдвое большим быстродействием относительно аналогичных систем с подчиненным управлением.
2. Рассмотренный подход к построению и выбору параметров модального регулятора позволяет обеспечить динамические характеристики системы близкие к теоретически ожидаемым.
3. Дискретные свойства преобразователя с ШИМ, при соответствующем выборе некомпенсиро-

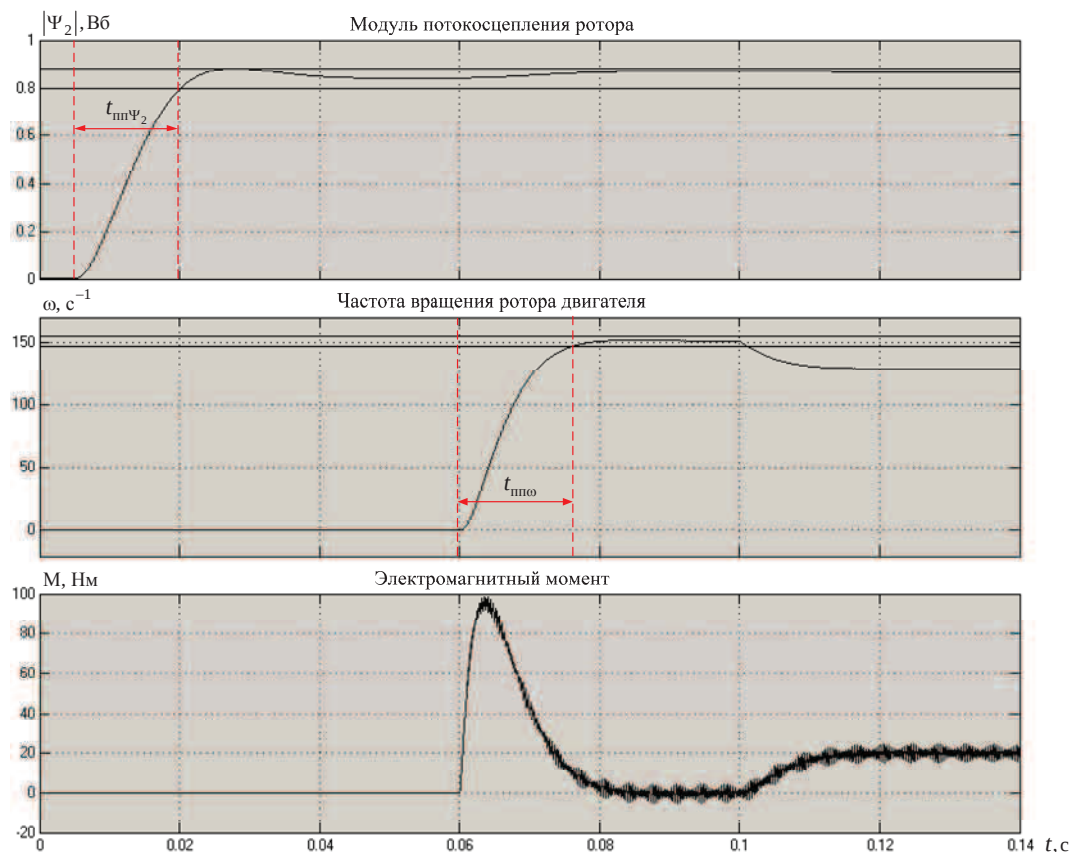


Рис. 6. Графики переходных процессов замкнутой системы ПЧ–АД

мой постоянной времени, не влияют на работоспособность системы и практически не влияют на характер изменения выходных переменных электропривода. Это подтверждает правомер-

ность представления ПЧ с ШИМ безынерционным линейным звеном и обосновывает возможность синтеза регуляторов методами теории непрерывных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев В.В., Козырук А.Е. Влияние структуры и алгоритмов САУ на энергетические и динамические показатели асинхронного привода горного оборудования // Горное оборудование и электромеханика. – 2013. – № 3. – С. 15–18.
- Усольцев А.А. Частотное управление асинхронными двигателями. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. – 94 с.
- Моторина Н.П., Винокуров Е.Б. О возможностях построения замкнутых систем управления частотными электроприводами // Вопросы современной науки и практики. – 2012. – № 3. – С. 61–64.
- Паршуков А.Н. Методы синтеза модальных регуляторов. – Тюмень: Тюменский государственный нефтегазовый университет, 2008. – 58 с.
- Лозгачев Г.И., Безрядин М.М. Синтез модального регулятора с компенсацией внешнего возмущения для объекта с параметрической неопределенностью по критерию максимальной робастности // Труды СПИИРАН. – 2012. – Вып. 21. – С. 157–169.
- Мирошниченко В.Г. Вопросы синтеза модальных регуляторов приводов станков. – Ростов н/Д: Изд. центр ДГТУ, 2009. – 133 с.
- Analysis of parametric sensitivity and structural optimization of modal control systems with state controllers / A.A. Anisimov, D.G. Kotov, S.V. Tararykin, V.V. Tyutikov // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2011. – Т. 50. – № 5. – С. 698–713.
- Анисимов А.А., Тарарыкин С.В. Особенности синтеза параметрически грубых систем модального управления с наблюдателями состояния // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2012. – № 5. – С. 3–14.
- Тарарыкин С.В., Аполонский В.В., Терехов А.И. Исследование влияния положительных обратных связей на робастные свойства систем автоматического управления с регуляторами состояния // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2013. – № 3. – С. 9–15.
- Копылов С.А., Шаров В.В. Синтез робастных модальных регуляторов для стабилизирующих систем автоматического управления // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2010. – № 5–6. – С. 111–121.
- Осина А.В., Ягодкина Т.В. Синтез систем модального управления с идентификаторами // Вестник Московского энергетического института. – 2013. – № 2. – С. 109–114.
- Лиходедов А.Д., Портнягин Н.Н. Анализ использования модального регулирования на водонасосных станциях // Вестник Камчатского государственного технического университета. – 2011. – № 17. – С. 50–58.
- Система управления асинхронным электроприводом с нелинейным модальным регулятором переменной структуры / А.Б. Виноградов, В.Ф. Глазунов, Н.Е. Гнездов, С.К. Лебедев // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2005. – № 2. – С. 87–90.

14. Мазуров В.М., Фам Ван Нгуен. Модальные регуляторы для промышленных объектов с запаздыванием // Автоматизация в промышленности. – 2006. – № 11. – С. 19–22.
15. Bhattacharyya S.P., Chapellat H., Keel L. Robust control: the parametric approach. Prentice-Hall Information & System Science Series. – N.J.: Prentice Hall, 1995. – 672 p.
16. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MatLab 6.0. – СПб.: Корона принт, 2001. – 320 с.
17. Терехов В.М., Осипов О.И. Системы управления электроприводов / под ред. В.М. Терехова. – М.: Изд. центр «Академия», 2005. – 304 с.
18. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. – М.: Изд. центр «Академия», 2006. – 272 с.
19. Федоренко А.А., Карагодин М.С. Линеаризованная модель асинхронного двигателя // Оптимизация режимов работы систем электроприводов: Межвузовский сборник. – Красноярск: КГТУ, 1992. – 160 с.
20. Коротков М.Ф., Пахомов А.Н., Федоренко А.А. Модальное управление электроприводом переменного тока // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева. – 2011. – № 3. – С. 70–74.
21. Лазовский Н.Ф., Пахомов А.Н. Системы управления электроприводов. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т; политехн. ин-т, 2007. – 83 с.
22. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, 2008. – 298 с.

Поступила 02.11.2013 г.

UDC 621.318.562.5

MODAL CONTROL OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE

Maksim F. Korotkov,

Siberian Federal University,

Russia, 660041, Krasnoyarsk, Svobodny pr., 79. E-mail: hamsterboo@mail.ru

Aleksandr N. Pakhomov,

Cand. Sc., Siberian Federal University

Russia, 660041, Krasnoyarsk, Svobodny pr., 79. E-mail: pnalex@mail.ru

Aleksandr A. Fedorenko,

Cand. Sc., Siberian Federal University

Russia, 660041, Krasnoyarsk, Svobodny pr., 79. E-mail: alfedor47@mail.ru

Relevance of the work is caused by the need to develop high-speed closed-loop induction motor, finding wide application in industry.

Objective: To build a closed system frequency converter with pulse-width modulated output voltage – AC induction motor with modal control.

Methods: Theoretical studies were carried out with the involvement of the modern theory of electric drive and automatic control theory methods. Theoretical studies validated the model experiment.

Results: The paper describes the method of forming linear equations of state of the induction motor with compensation of cross-current feedback, through technical means and specifying an algorithm functioning of a closed-loop system which provides the ability to calculate the coefficients of the modal controller. The authors have developed the induction motor model which takes into account the properties of discrete frequency converter with pulse-width modulated output voltage. The dynamic modes of a closed system inverter – induction motor with modal control were studied in Simulink of MatLab.

Conclusions: The discussed methods for building a system of induction motor with modal control can significantly increase its performance under dynamic operating conditions.

Key words:

Modal controller, asynchronous electric drive, vector system, pulse-width modulation, mathematical model.

REFERENCES

1. Alekseev V.V., Kozyaruk A.E. Vliyanie struktury i algoritmov SAU na energeticheskie i dinamicheskie pokazateli asinkhronnogo privoda gornogo oborudovaniya [Effect of structure and ACS algorithms on energy and dynamic performance of asynchronous drive mining equipment]. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*, 2013, no. 3, pp. 15–18.
2. Usoltsev A.A. *Chastotnoe upravlenie asinkhronnymi dvigatelyami* [Frequency control of asynchronous motors]. Saint Petersburg, SPbGU ITMO, 2006. 94 p.
3. Motorina N.P., Vinokurov E.B. O vozmozhnostyakh postroeniya zamknytykh sistem upravleniya chastotnymi elektroprivodami [The possibility of constructing a closed control system for frequency electric drives]. *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki*, 2012, no. 3, pp. 61–64.
4. Parshukov A.N. *Metody sinteza modalnykh regulyatorov* [Methods for modal regulator synthesis]. Tyumen, Tyumenskiy gosudarstvennyy neftegazovyy universitet, 2008. 58 p.
5. Lozgachev G.I., Bezryadin M.M. *Sintez modalnogo regulyatora s kompensatsiyey vneshnego vozmushcheniya dlya obekta s paramet-*

- richeskoj neopredelennostyu po kriteriyu maksimalnoy robastnosti* [Synthesis of a modal controller with external disturbance compensation for an object with parametric uncertainty by maximal robustness]. *Trudy SPIIRAN*, 2012, Iss. 21, pp. 157–169.
6. Miroshnichenko V.G. *Voprosy sinteza modalnykh regulyatorov privodov stankov* [Issues of modal controller synthesis for drive machines]. Rostov n/D, DGTU Publ., 2009. 133 p.
 7. Anisimov A.A., Kotov D.G., Tararykin S.V., Tyutikov V.V. Analysis of parametric sensitivity and structural optimization of modal control systems with state controllers. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2011, vol. 50, no. 5, pp. 698–713.
 8. Anisimov A.A., Tararykin S.V. Osobennosti sinteza parametricheski grubykh sistem modalnogo upravleniya s nablyudatelyami sostoyaniya [Features of synthesis of parametrically gross modal control systems with state observers]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya*, 2012, no. 5, pp. 3–14.
 9. Tararykin S.V., Apolonskiy V.V., Terekhov A.I. Issledovanie vliyaniya polozhitelnykh obratnykh svyazey na robastnye svoystva sistem avtomaticheskogo upravleniya s regulyatorami sostoyaniya [Investigation of positive feedbacks influence on robust properties of automatic control systems with state regulators]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2013, no. 3, pp. 9–15.
 10. Kopylov S.A., Sharov V.V. Sintez robastnykh modalnykh regulyatorov dlya stabiliziruyushchikh sistem avtomaticheskogo upravleniya [Synthesis of modal robust controllers for stabilizing automatic control systems]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki*, 2010, no. 5–6, pp. 111–121.
 11. Osina A.V., Yagodkina T.V. Sintez sistem modalnogo upravleniya s identifikatorami [Synthesis of modal control systems with identifiers]. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta* 2013, no. 2, pp. 109–114.
 12. Likhodedov A.D., Portnyagin N.N. Analiz ispolzovaniya modalnogo regulirovaniya na vodonasosnykh stantsiyakh [Analysis of using modal control at pump station]. *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2011, no. 17, pp. 50–58.
 13. Vinogradov A.B., Glazunov V.F., Gnezdov N.E., Lebedev S.K. Sistema upravleniya asinkhronnym elektropriivodom s nelineynym modalnym regulyatorom peremennoy struktury [Asynchronous electric control system with nonlinear variable structure modal controller]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya tekstilnoy promyshlennosti*, 2005, no. 2, pp. 87–90.
 14. Mazurov V.M., Fam Van Nguen. Modalnye regulatory dlya promyshlennykh obektov s zapazdyvaniem [Modal controllers for industrial facilities with delay]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*, 2006, no. 11, pp. 19–22.
 15. Bhattacharyya S.P., Chapellat H., Keel L. Robust control: the parametric approach. *Prentice-Hall Information & System Science Series*. N.J., Prentice Hall, 1995. 672 p.
 16. German-Galkin S.G. *Kompyuternoe modelirovanie poluprovodnikovyykh sistem v MatLab 6.0* [Computer simulation of semiconductor systems in MatLab 6.0]. Saint Petersburg, Korona print, 2001. 320 p.
 17. Terekhov V.M., Osipov O.I. *Sistemy upravleniya elektropriivodov* [Electric drives control systems]. Ed. by V.M. Terekhov. Moscow, Akademiya Publ., 2005. 304 p.
 18. Sokolovskiy G.G. *Elektropriivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem* [AC drives with frequency regulation]. Moscow, Akademiya Publ., 2006. 272 p.
 19. Fedorenko A.A., Karagodin M.S. Linearizovannaya model asinkhronnogo dvigatelya [Linearized model of the induction motor]. *Optimizatsiya rezhimov raboty sistem elektropriivodov. Mezhdvuzovskiy sbornik* [Optimization of electric drive system operation modes. High school proceedings]. Krasnoyarsk, KSTU Publ., 1992. 160 p.
 20. Korotkov M.F., Pakhomov A.N., Fedorenko A.A., Modalnoe upravlenie elektropriivodom peremennogo toka [Modal control of AC drive]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika M.F. Reshetneva*, 2011, no. 3, pp. 70–74.
 21. Lazovskiy N.F., Pakhomov A.N. *Sistemy upravleniya elektropriivodov* [Electric drives control system]. Krasnoyarsk, Sib. feder. un-t; politehn. in-t Publ., 2007. 83 p.
 22. Vinogradov A.B. *Vektornoe upravlenie elektropriivodami peremennogo toka* [Vector control AC drives]. Ivanovo, GOUVPO «Ivanovskiy gosudarstvennyy energeticheskiy universitet imeni V.I. Lenina», 2008. 298 p.