



СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЧАСТОТНЫМ АСИНХРОННЫМ СИНХРОНИЗИРОВАННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

В.Н. Мещеряков¹, Д.С. Сибирцев¹, С. Валтчев³, Е.И. Грачева²

¹Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия

²Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

³Новый Лиссабонский университет; ТУ София и БФУ Болгария

mesherek@stu.lipetsk.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. В регулируемых приводах переменного тока, применяемых на механизмах непрерывного действия, к которым относятся конвейеры, транспортеры, краны, наибольшее распространение получили асинхронные двигатели с фазным ротором, управляемые в основном по цепи ротора с помощью различных регуляторов с низкими показателями энергоэффективности. Для повышения энергоэффективности электропривода на основе АДФР предлагается разработать систему управления, сочетающую принципы частотного управления двигателем по цепи статора и питание цепи ротора постоянным напряжением, что позволяет считать электропривод синхронизированным. МЕТОДЫ. Наличие в преобразователе частоты звена постоянного тока дает принципиальную возможность включения обмотки ротора последовательно в это звено. Однако при этом для обеспечения частотного принципа регулирования выходных характеристик электропривода потребуется регулирование выпрямленного тока на входе инвертора и, соответственно в обмотках ротора, что потребует существенного изменения стандартной системы управления преобразователем частоты. Предложено использование дополнительного регулируемого коммутатора в звене постоянного тока. РЕЗУЛЬТАТЫ. Исследование предложенной нестандартной системы управления частотным асинхронным синхронизированным электроприводом выполнено методом имитационного моделирования в пакете программ Matlab Simulink. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Разработана и исследована на компьютерной модели система управления частотным асинхронным синхронизированным электроприводом. Предложена система коррекции, позволяющая в пусковом режиме поддерживать постоянную величину угла нагрузки. Скалярная система релейного частотного управления электроприводом дополнена векторной коррекцией переменных, что позволяет непрерывно обеспечивать необходимую взаимную ориентацию векторов тока статора и потока сцепления ротора.

Ключевые слова: асинхронный синхронизированный электропривод; асинхронный двигатель с фазным ротором; автономный инвертор тока; частотное управление; коррекция; управляемый транзисторный коммутатор; компьютерное моделирование; преобразователь частоты; релейный регулятор тока.

Информация о поддержке: Статья написана при поддержке гранта РФФИ №19-48-48001 «Разработка, исследование и оптимизация энергосберегающих электротехнических и электроприводных автоматизированных комплексов для плазменных, электрометаллошлаковых и индукционных технологий и агрегатов».

Для цитирования: Мещеряков В.Н., Сибирцев Д.С., Валтчев С., Грачева Е.И. Система управления частотным асинхронным синхронизированным электроприводом // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 3. С. 116-126. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-116-126.

CONTROL SYSTEM FOR A FREQUENCY SYNCHRONIZED ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE

VN. Meshcheryakov¹, DS. Sibirtsev¹, S. Valtchev³, EI. Gracheva²

¹Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

²Kazan State Energy University, Kazan, Russia

³New University of Lisbon; TU Sofia and BFU Bulgaria

mesherek@stu.lipetsk.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* In controlled AC drives used on continuous-action mechanisms, which include conveyors, conveyors, cranes, the most widespread are asynchronous motors with a phase rotor, controlled mainly along the rotor circuit using various regulators with low energy efficiency. To improve the energy efficiency of an electric drive based on ADFR, it is proposed to develop a control system that combines the principles of frequency control of the motor along the stator circuit and powering the rotor circuit with constant voltage, which allows the electric drive to be considered synchronized. *METHODS.* The presence of a DC link in the frequency converter makes it possible in principle to connect the rotor winding in series to this link. However, in order to ensure the frequency principle of regulating the output characteristics of the electric drive, it will be necessary to regulate the rectified current at the input of the inverter and, accordingly, in the rotor windings, which will require a significant change in the standard control system of the frequency converter. The use of an additional adjustable switch in the DC link is proposed. *RESULTS.* The study of the proposed non-standard control system for a frequency asynchronous synchronized electric drive was carried out by the method of simulation modeling in the Matlab Simulink software package. *CONCLUSION.* A control system for a frequency asynchronous synchronized electric drive has been developed and investigated on a computer model. A correction system is proposed that allows maintaining a constant value of the load angle in the starting mode. The scalar system of relay frequency control of the electric drive is supplemented with vector correction of the variables, which makes it possible to continuously provide the necessary mutual orientation of the stator current vectors and the rotor flux linkage.

Keywords: asynchronous synchronized electric drive; asynchronous motor with a wound rotor; autonomous current inverter; frequency control; correction, controlled transistor switch; computer simulation; frequency converter, relay current regulator.

Acknowledgments: The paper was powered by research grant RFBR 19-48-480001 «Development, investigation and optimization of energy-saving electrical and electrically driven automated systems for plasma, electrometal slag and induction technologies and units».

For citation: Meshcheryakov VN, Sibirtsev DS, Valtchev S, Gracheva EI. Control system for a frequency synchronized asynchronous electric drive *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021;23(3):116-126. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-116-126.

Введение

В настоящее время электрические машины являются потребителями порядка 75% всей производимой в мире электроэнергии. Применение электропривода в промышленности непрерывно растет. В большей части приводов используется асинхронный двигатель. Однако, проанализировав научно-техническую литературу, можно сделать вывод о том, что при эксплуатации асинхронного двигателя в течении года потери в нем сопоставимы с половиной стоимости самого АД [1]. А современные тенденции развития электроэнергетики, связанные с применением энергосберегающих технологий, напрямую зависят от эффективности работы электроприводов. Доля регулируемых приводов в России не превышает 15-20% от всего объема, что является существенной проблемой на пути достижения цели повышения эффективности использования энергоресурсов. Таким образом, приоритетным направлением является внедрение высокоэффективных, производительных систем регулируемого электропривода [2].

Главным аспектом в процессе модернизации электрооборудования является разработка систем управления электроприводами, отвечающих требованиям производственного процесса [2, 3, 4]. Важным фактором является возможность повышения производительности, снижение потребления ресурсов, а, также, надежность внедряемых

систем. В современных реалиях промышленного производства для обеспечения поддержания постоянства скорости при постоянно изменяющихся значениях моментов нагрузки приходится применять замкнутые системы регулирования с датчиками скорости. В большинстве случаев для получения абсолютно жестких механических характеристик применяют системы с обратными связями по току и скорости. Принципы построения систем управления двигателем переменного тока имеют некоторые особенности, в отличие от двигателей постоянного тока:

- величина момента двигателя определяется произведением векторов электромагнитных параметров цепи ротора и статора;
- ток фазы двигателя зависит не только от приложенного напряжения и характеристик машины, но и от двух других фазных токов;
- задачами системы управления является регулирование не только скорости и момента, но и основного потока двигателя для более эффективного использования машины.

Таким образом, разработка эффективных систем управления сводится к созданию многоканальных систем регулирования в основном с использованием микропроцессорных средств [3]. Большинство современных разработок ориентированы на создание систем управления асинхронным короткозамкнутым двигателем (АДКЗ), что обусловлено высокой надежностью применяемого двигателя [5]. Однако в некоторых энергосберегающих областях промышленности (металлургической, горнодобывающей) используются электроприводы, постоянно работающие в тяжелых условиях. В данных агрегатах, как правило, применяются асинхронные двигатели с фазным ротором (АДФР). Эти двигатели также широко применяются в электроприводах кранов, конвейеров, подъемных механизмов, намоточно-размоточных механизмов листовых прокатных и волочильных станов.

Применение системы частотно регулируемого привода с АДКЗ на таких агрегатах ограничено в первую очередь его пониженным пусковым моментом по сравнению с АДФР. Таким образом, сохраняют актуальность задачи изучения и разработки систем электропривода на базе асинхронного двигателя с фазным ротором.

Методы

Одним из известных направлений совершенствования электроприводов на базе АДФР является перевод двигателя в синхронный режим, получаемый в схеме, показанной на рисунке 1, за счет вращения поля статора и протекании постоянного тока по обмоткам ротора, втянутого в синхронизм [4, 6, 7, 8]. Питание обмоток ротора постоянным током, при условии его регулирования, дает возможность реализовать управление величиной реактивной мощности, потребляемой статором двигателя из сети, что позволяет влиять на КПД и другие показатели работы двигателя. Механические характеристики такого асинхронного синхронизированного двигателя являются «абсолютно жесткими», что характерно для синхронного двигателя [7].

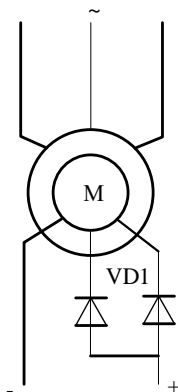


Рис. 1. Схема синхронизированного асинхронного двигателя

Fig. 1. Diagram of a synchronized asynchronous motor

Обмотку статора АДФР, работающего в синхронизированном режиме, можно питать, применяя разные схемы, например, ее можно подключить напрямую в трехфазной сети, что характерно для схем питания синхронной машины [9]. Рассмотрим векторную диаграмму синхронной неявнополюсной машины, приведенную на рисунке 2. Регулирование тока возбуждения приводит к изменению потребления реактивного тока, момент двигателя возрастает при увеличении угла нагрузки θ , область устойчивой работы ограничена значениями угла нагрузки в пределах от -90 до $+90$ градусов [10].

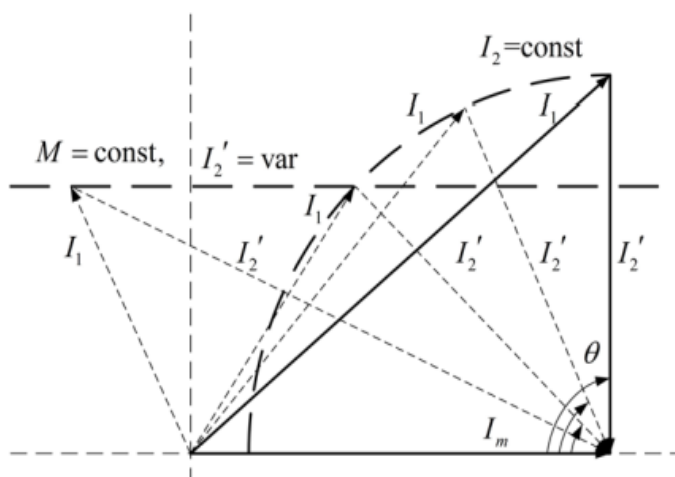


Рис. 2. Векторная диаграмма синхронной неявнополюсной машины

Fig. 2. Vector diagram of a synchronous implicit pole machine

В системах частотного управления, построенных на основе автономного инвертора тока, следует оценивать устойчивость всей системы в целом, так как при формировании мгновенных значений фазных токов, отсутствует контроль за мгновенными значениями фазных напряжений статора, и при возникновении внезапных возмущающих воздействий, устойчивость всей системы определяется не только величиной угла θ , но и реакцией на возникающие возмущения. [11]. При построении векторной диаграммы (рисунок 3), позволяющей вести анализ поведения синхронизированного электропривода, зафиксируем положение вектора тока статора в направлении вертикальной оси [12, 13].

Для обеспечения условия поддержания потокосцепления двигателя на постоянном уровне, конец вектора намагничивающего тока должен находиться на окружности, центр которой расположен в начале вектора тока статора. В рассматриваемом наглядном случае на векторной диаграмме модули токов статора и ротора приняты равными между собой. На основании теоремы косинусов, можно выделить следующие особенности:

- площадь треугольника, две стороны которого образованы векторами токов, максимальна при угле 90 градусов между ними;
- при тупом угле между векторами в случае уменьшения этого угла площадь треугольника, образованного этими векторами, увеличивается;
- при остром угле между векторами, в случае уменьшении этого угла площадь треугольника, образованного этими векторами, уменьшается.

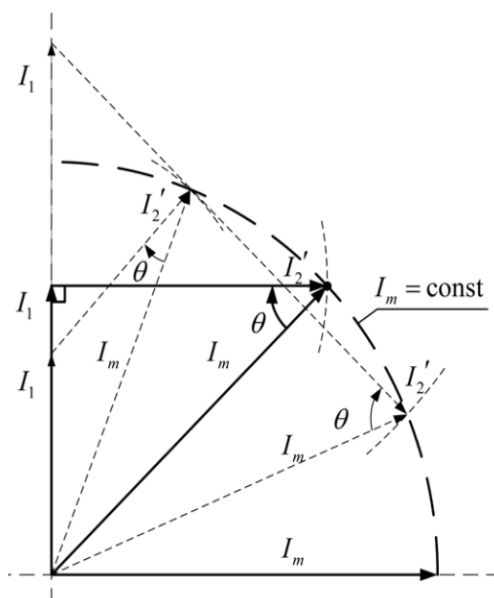


Рис. 3. Векторная диаграмма синхронизированной асинхронной машины

Fig. 3. Vector diagram of a synchronized asynchronous machine

Любое изменение - наброс или сброс нагрузки на валу двигателя приводит к

изменению угла поворота вектора тока ротора относительно неподвижного вектора тока статора. Наброс нагрузки сопровождается снижением угла между векторами токов, сброс нагрузки - ростом угла между векторами токов [14,15].

На основании анализа векторной диаграммы (рисунок 3) можно сделать следующее заключение: при постоянных по величине токах статора I_1 и ротора I_2 , синхронизированный двигатель обладает устойчивостью только в тех режимах, где угол между векторами токов статора и ротора составляет величину, большую или равную 90 градусам. Поскольку в номинальном режиме угол между векторами токов статора и ротора оказывается меньше 90 градусов, то для обеспечения устойчивости электропривода необходима коррекция системы управления с введением дополнительного контура стабилизации угла нагрузки.

На рисунке 4 приведена функциональная схема частотного синхронизированного электропривода, выполненного на базе автономного инвертора тока. Преобразователь частоты, питающий обмотку статора, построен на основе стандартной схемы с нерегулируемым выпрямителем, конденсаторным фильтром C в звене постоянного тока и автономным инвертором на IGBT-транзисторах. Его особенностью является включение в силовую часть дополнительных элементов: ключевого транзистора $VT7$, шунтирующего диода $VD1$, необходимого для обеспечения протекания тока в моменты, когда ключевой транзистор $VT7$ заперт, реактора L . Обмотки ротора через диод $VD2$ включены последовательно между выпрямителем и инвертором в звено постоянного тока преобразователя частоты. При таком изменении схемы силовой части преобразователя частоты автономный инвертор приобретает свойства инвертора тока.

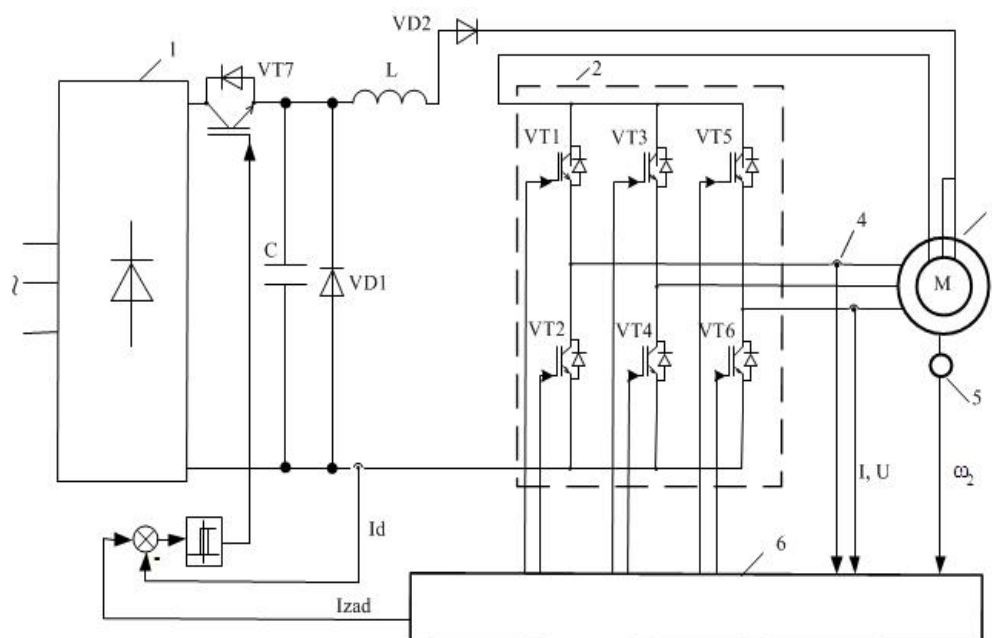


Рис. 4. Функциональная схема частотного асинхронного синхронизированного электропривода на базе АИТ с подключением ротора к звену постоянного тока

Fig. 4. Functional diagram of a frequency asynchronous synchronized electric drive based on AIT with the connection of the rotor to the DC link

Система управления 6 обрабатывает сигналы, поступающие от датчиков 4 напряжений и токов, а также датчика скорости 5, установленного на валу двигателя. Транзистор $VT7$ управляется релейным регулятором тока, работающим на основе сравнения, заданного и действительного значений тока в выпрямленной цепи. Релейный регулятор тока статора (рисунок 5) выполняет сравнение на выходах сумматоров заданных и действительных значений фазных токов [16, 17].

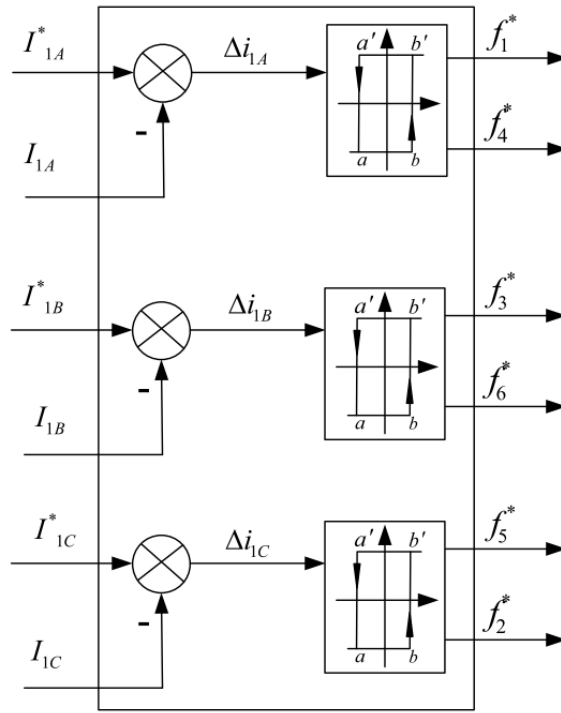


Рис. 5. Функциональная схема релейных регуляторов фазных токов обмотки статора

Fig. 5. Functional diagram of relay regulators of phase currents of the stator winding

Сигналы рассогласования определяются по формуле (1):

$$\begin{cases} \Delta i_{1A} = i_{1A}^* - i_{1A} \\ \Delta i_{1B} = i_{1B}^* - i_{1B} \\ \Delta i_{1C} = i_{1C}^* - i_{1C} \end{cases} \quad (1)$$

где i_{1A}^* , i_{1B}^* , i_{1C}^* , i_{1A} , i_{1B} , i_{1C} - заданные и действующие значения токов в фазах статора.

Сигналы рассогласования сравниваются с пороговым значением τ , и на выходе регулятора тока вырабатываются сигналы (2):

$$\begin{cases} \text{если } \Delta i_1 \leq \tau / 2, \text{ то на выходе (0),} \\ \text{если } \Delta i_1 > \tau / 2, \text{ то на выходе (1);} \end{cases} \quad (2)$$

где τ - зона нечувствительности, определяющая точность и быстродействие релейного регулятора. Сигналы с выходов регуляторов поступают в схему управления силовыми транзисторами инвертора тока.

Блок-схема системы управления асинхронным синхронизированным электроприводом, собранная в пакете прикладных программ *Matlab Simulink*, приведена на рисунке 6.

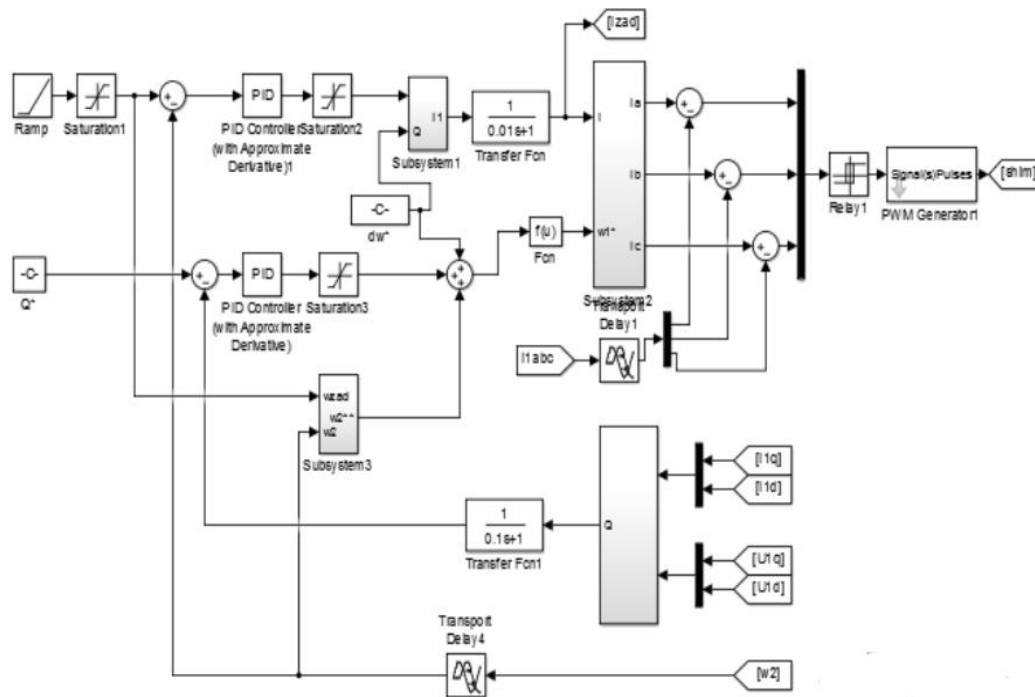


Рис. 6. Блок-схема системы управления

Fig. 6. Control system block diagram

Особенностью системы управления синхронизированным асинхронным двигателем является необходимость контроля угла нагрузки [16,17], величина которого определяется в соответствии с формулой (3):

$$\theta_{эл} = \int \omega_1 dt - \int \omega_{эл} dt \quad (3)$$

где ω_1 – частота напряжения цепи статора; $\omega_{эл} = \omega p_n$; ω – частота ротора; p_n – число пар полюсов.

Для обеспечения стабильности работы системы в процессе пуска и изменения нагрузки требуется корректировать частоту тока статора. Это обеспечивается введением в систему управления дополнительного контура контроля и регулирования в заданном диапазоне значения угла нагрузки θ . При настройке контура регулирования угла θ необходимо руководствоваться следующими принципами:

- характер колебаний угла θ определяется механическими параметрами механизма;
- на величину статического момента влияет среднее за период колебаний значение угла нагрузки; [18,19];
- для снижения амплитуды колебаний сигнал коррекции должен быть синфазен сигналу колебаний системы.

Величина коэффициента k определяется требованиями быстроты регулирования угла θ . Чем он больше, тем выше быстродействие системы, но снижается ее устойчивость. Для каждого механизма рекомендуется определять свой расчетный коэффициент. Постоянная времени T контура стабилизации угла нагрузки выбирается исходя из величины частоты колебаний системы.

Значение T должно быть больше этой частоты. Однако, слишком большое увеличение этого параметра приводит к снижению динамики переходного процесса. Сигналы задания фазных токов с учетом коррекции частоты рассчитываются по формулам (4):

$$\begin{aligned} I_a^* &= I_m \sin(\omega t + \varphi_0) \\ I_b^* &= I_m \sin(\omega t + 120^\circ + \varphi_0) \\ I_c^* &= I_m \sin(\omega t + 240^\circ + \varphi_0) \end{aligned} \quad (4)$$

где φ_0 – выходной сигнал контура регулирования угла θ .

При питании статора синхронизированного двигателя от преобразователя частоты с АИН, а ротора - от звена постоянного тока преобразователя частоты, в цепь звена

постоянного тока необходимо включать специальный транзисторный коммутатор.

Назначением его является преобразование постоянного напряжения с выхода неуправляемого выпрямителя в постоянное напряжение необходимой величины. Подобный коммутатор необходим для обеспечения стабильным напряжением статора и ротора синхронизированного электропривода, а также для компенсации падения напряжения, возникающего за счет подключенного в ЗПТ ротора. Схема такого стабилизатора напряжения представлена на рисунке 7.

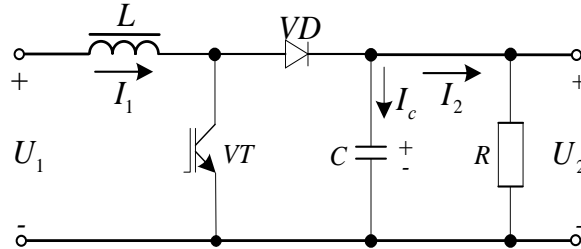


Рис. 7. Схема устройства для повышения напряжения в звене постоянного тока частотного преобразователя

Fig. 7. Diagram of the device for increasing the voltage in the DC link of the frequency converter

Управление преобразователем постоянного напряжения возможно осуществлять, также используя релейный регулятор, принцип действия которого описан выше.

Результаты и обсуждения

Описанная система управления, собранная в среде *Matlab Simulink* [20] изображена на рисунке 8. Результаты компьютерного моделирования процесса пуска электропривода приведены на рисунке 9. Полученные графики переходных процессов показывают, что в разработанной системе электропривода обеспечивается стабилизация пускового момента и поддержание постоянства ускорения, что требуется для механизмов циклического действия.

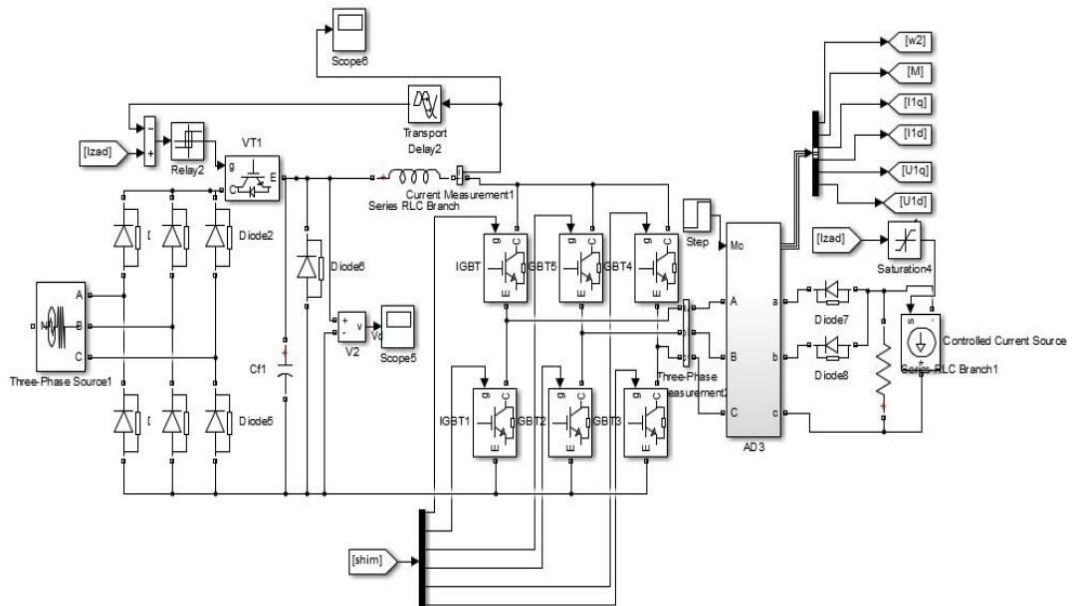


Рис. 8. Схема синхронизированного электропривода

Fig. 8. The scheme of the synchronized electric drive

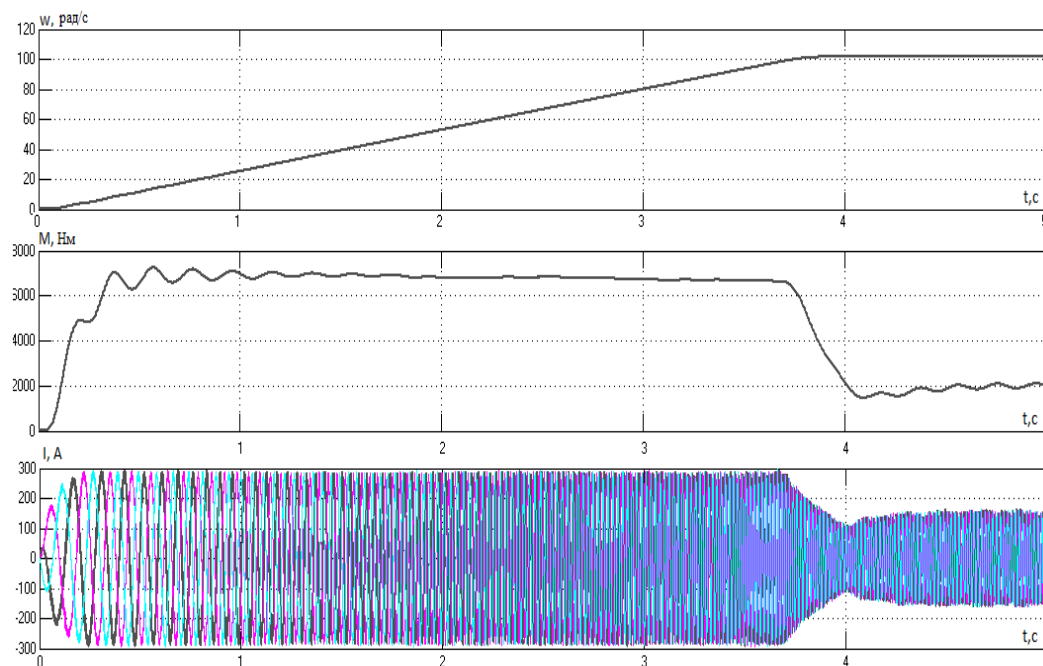


Рис. 9. Результаты моделирования разработанной системы электропривода

Fig. 9. Simulation results of the developed electric drive system

Выводы

В работе описана и смоделирована система управления частотным асинхронным синхронизированным электроприводом. Для обеспечения устойчивости электропривода в системе управления выполняется коррекция сигнала задания частоты тока статора за счет введения дополнительного контура регулирования угла нагрузки двигателя. Подобная коррекция необходима для стабилизации момента за счет ориентации в каждый момент времени вектора тока статора относительно вектора тока ротора. Данная система управления рекомендуется к применению в электроприводах с циклическим режимом работы.

Литература

1. Мещеряков В.Н. Системы регулируемого асинхронного электропривода для подъемно-транспортных механизмов: монография. Липецк: ЛГТУ, 2005. 112 с.
2. Грачева Е.И., Горлов А.Н., Шакурова З.М. Анализ и оценка экономии электроэнергии в системах внутризаводского электроснабжения. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22(2). С. 65-74. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-2-65-74>.
3. Онищенко Г.Б., Юньков В.Ю. Основные тенденции развития автоматизированного электропривода // АЭП 2016: Труды IX Международной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу. Пермь, 2016. С.81-83.
4. Грачева Е.И., Шакурова З.М., Абдуллазянов Р.Э. Сравнительный анализ наиболее распространенных детерминированных методов определения потерь электроэнергии в цеховых сетях. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019;21(5):87-96.
5. Мещеряков В.Н., Башлыков А.М. Синхронизированный асинхронный электропривод // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2010. №3. Ч. 4. С. 101-104.
6. Беспалов В.Я., Кобелев А.С., Кругликов О.В и др. Разработка и освоение производства энергоэффективных асинхронных двигателей массовых серий // Электротехника. 2015. № 4. С. 34-40.
7. Omelchenko E.Y., Telezhkin O.A., Enin S.S., et al. Computer Model of a Synchronized Asynchronous Motor. Procedia Engineering, 2015. V. 129. pp. 629-634.
8. Ma S.H. Study on the application of permanent magnet synchronous motors in underground belt conveyors // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2017. № 253.
9. Омельченко Е.Я., Тележкин О.А., Енин С.С. и др. Математическая и компьютерная модель синхронизированного асинхронного двигателя // Электроприводы переменного

тока: Труды международной 15 научно-технической конференции. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2015. С.137-140.

10. Tlali P.M, Wang R and Gerber S. Comparison of PM Vernier and Conventional Synchronous 15 kW Wind Generators. 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM), Alexandroupoli, 2018.

11. Meshcheryakov V, Sibirtsev D, Mikhailova E. Mathematical Simulation of the Synchronized Asynchronous Electric Drive // E3S Web of Conferences V. 178 (2020), High Speed Turbomachines and Electrical Drives Conference 2020 (HSTED-2020).

12. Якимов С.Б. Проблема больших токов. Поиск оптимальных путей решения. / Инженерная практика. Производственно-технический нефтегазовый журнал // 2016. №3. С. 14- 19.

13. Rodriguez J., Kennel R.M., Espinoza J.R., et al. High performance control strategies for electrical drives: an experimental assessment. IEEE Trans. Ind. Electron, 2012, 59, pp 812–82

14. Голубев А.Н., Белоногов В.Г. Разработка многоканальной системы управления многофазным синхронным электроприводом с улучшенными виброшумовыми характеристиками // Вестник ИГЭУ. 2020. № 3. С. 43–50.

15. Bin Wu. High-Power Converters and ac Drives. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 2006. 333 p.

16. Вдовин В.В., Адаптивные алгоритмы оценивания координат бездатчиковых электроприводов переменного тока с расширенным диапазоном регулирования [Текст]: диссертация. ... Вдовин В.В. Новосибирск, 2014. 244 с.

17. Meshcheryakov V.N., Sibirtsev D.S. Frequency asynchronous electric drive with correction of phase shift between moment-forming vectors (Control systems and information technologies, 2017. № 2 (68). P. 48-57.

18. Yang Yu., Mi Z., Guo X., et al. Low speed control and implementation of permanent magnet synchronous motor for mechanical elastic energy storage device with simultaneous variations of inertia and torque // IET Electr. Power Appl. 2016. № 10. pp. 172–180.

19. Meshcheryakov V.N., Sibirtsev D.S. Frequency asynchronous electric drive with correction of phase shift between moment-forming vectors (Control systems and information technologies, 2017. №2 (68). P. 48-57.)

20. Meshcheryakov V.N., Lastochkin D.V., Shakurova Z.M., et al. Energy saving system of cascade variable frequency induction electric drive (SES 2019. Kazan, E3S Web of Conferences. 2019. C. 01037.

Авторы публикации

Мещеряков Виктор Николаевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электропривода, Липецкий государственный технический университет.

Сибирцев Дмитрий Сергеевич – инженер, кафедра электропривода, Липецкий государственный технический университет.

Валтчев Станимир – профессор, Новый Лиссабонский университет; ТУ София и БФУ Болгария.

Грачева Елена Ивановна – д-р. техн. наук., профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Meshcheryakov VN. *The systems of the adjustable asynchronous electric drive for hoisting-and-transport mechanisms*. Lipetsk: LGTU Publ., 2005. 112 pp.

2. Gracheva EI, Gorlov AN, Shakurova ZM. Calculation of the economy of electric energy in industrial electrical supply systems. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(2):65-74. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-2-65-74>.

3. Onishchenko GB, Yun'kov VYu. *Osnovnye tendentsii razvitiya avtomatizirovannogo elektroprivoda*. AEP 2016; Trudy 9 Mezhdunarodnoi (XX Vserossiiskoi) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu. Perm', 2016. pp.81-83.

4. Gracheva EI, Shakurova ZM, Abdullazyanov RE. A comparative analysis of the most common deterministic methods for the calculation of electricity losses in industrial

networks. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019;21(5):87-96. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-5-87-96>.

5. Meshcheryakov VN, Bashlykov AM. Sinkhronizirovannyi asinkhronnyi elektropriwod. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2010;3(4):101-104.

6. Bepalov VYa, Kobelev S, Kruglikov OV, et al. Razrabotka i osvoenie proizvodstva energoeffektivnykh asinkhronnykh dvigatelei massovykh serii. *Elektrotehnika*. 2015;4:34-40.

7. Omelchenko EY, Telezhkin OA, Enin SS, et al. *Computer Model of a Synchronized Asynchronous Motor*. *Procedia Engineering*. 2015;129:629-634.

8. Ma SH. *Study on the application of permanent magnet synchronous motors in underground belt conveyors*. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2017;253. doi: 10.1088/1757-899X/283/1/012006.

9. Omel'chenko EYa, Telezhkin OA, Enin SS. *Matematicheskaya i komp'yuternaya model' sinkhronizirovannogo asinkhronnogo dvigatelya*. Elektroprirody peremennogo toka: Trudy mezhdunarodnoi 15 nauchno-tehnicheskoi konferentsii. Ekaterinburg. 2015. C.137-140.

10. Tlali PM, Wang R and Gerber S. *Comparison of PM Vernier and Conventional Synchronous 15 kW Wind Generators*. 2018. 13 International Conference on Electrical Machines (ICEM), Alexandroupoli, 2018.

11. Meshcheryakov V, Sibirtsev D, Mikhailova E. *Mathematical Simulation of the Synchronized Asynchronous Electric Drive*. E3S Web of Conferences V. 178 (2020), High Speed Turbomachines and Electrical Drives Conference 2020 (HSTED-2020).

12. Yakimov SB. Problema bol'shikh tokov. Poisk optimal'nykh putei reshe-niya. *Inzhenernaya praktika. Proizvodstvenno-tehnicheskii neftegazovyi zhurnal*. 2016;3:14-19.

13. Rodriguez J, Kennel RM, Espinoza JR, et al. *High performance control strategies for electrical drives: an experimental assessment*. (IEEE Trans. Ind. Electron, 2012, 59, pp 812–82

14. Golubev AN, Belonogov VG. Razrabotka mnogokanal'noi sistemy upravleniya mnogofaznym sinkhronnym elektropriwodom s uluchshennymi vibroshumovymi kharakteristikami. *Vestnik IGEU*. 2020;3:43-50.

15. Bin Wu. High-Power Converters and ac Drives. *The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc*. 2006. 333 p.

16. Vdovin VV. *Adaptivnye algoritmy otsenivaniya koordinat bezdatchiko-vykh elektropriwodov peremennogo toka s rasshirennym diapazonom regulirova-niya*: dissertatsiya. Novosibirsk. 2014. 244 p.

17. Meshcheryakov VN, Sibirtsev DS. *Frequency asynchronous electric drive with correction of phase shift between moment-forming vectors*. Control systems and information technologies. 2017, 2 (68):48-57.

18. Yang Yu, Mi Z, Guo X, et al. *Low speed control and implementation of permanent magnet synchronous motor for mechanical elastic energy storage device with simultaneous variations of inertia and torque*. IET Electr. Power Appl. 2016;10:172-180.

19. Meshcheryakov VN, Lastochkin DV, Shakurova ZM, et al. *Energy saving system of cascade variable frequency induction electric drive*. SES 2019. Kazan, E3S Web of Conferences. 2019. C. 01037.

Authors of the publication

Viktor N. Meshcheryakov – Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia. Email: mesherek@stu.lipetsk.ru

Dmitry S. Sibirtsev – Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia.

Stanimir Valtchev – New University of Lisbon; TU Sofia and BFU Bulgaria.

Elena I. Gracheva – Kazan State Energy University, Kazan, Russia.

Получено

06.04.2021 г.

Отредактировано

13 04 2021 г.

Принято

26 04.2021 г.