

ВЕКТОРНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ВЕНТИЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ НА БАЗЕ АВТОНОМНОГО ИНВЕРТОРА НАПРЯЖЕНИЯ С РЕЛЕЙНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ ВХОДНОГО ТОКА ИНВЕРТОРА И ФАЗНЫХ ТОКОВ СТАТОРА

В.Н. Мещеряков¹, В.Н. Воеков²

¹ Липецкий государственный технический университет, г. Липецк,

² ООО «Промэлектроника», г. Липецк

Объектом исследования является система векторного управления вентильным электроприводом, выполненная на базе автономного инвертора напряжения с релейными регуляторами тока статора. Область применения – нефтяная промышленность, высокоточные электроприводы станков. Применение современной элементной базы, позволяющей использовать новые алгоритмы управления, расширяет функциональные возможности систем управления вентильным двигателем и помогает добиться энергосбережения. Разработана и исследована модель преобразователя частоты с автономным инвертором напряжения (АИН), построенного на базе IGBT-транзисторов с обратными диодами, и релейным регулированием токов статора. В цепи постоянного тока содержится транзисторный ключ, позволяющий регулировать выпрямленный ток и мощность, подаваемую на вход инвертора. Данная система позволяет получить форму напряжения и тока на зажимах обмотки статора близкую к синусоидальной и уменьшить пульсации напряжения за счет использования релейных регуляторов. Построена модель исследуемой системы с использованием программной среды MATLAB. Результаты моделирования совпадают с аналитическими исследованиями и показывают, что система полностью соответствует предъявляемым требованиям.

Ключевые слова: вентильный электропривод, автономный инвертор напряжения, релейный регулятор тока статора, транзисторный ключ с релейным управлением, преобразователь частоты.

Введение

В современной промышленности находит все большее применение вентильный электропривод малой и средней мощности, выполненный на базе синхронного двигателя с возбуждением от высокоэнергетических постоянных магнитов, управление которым строится в функции положения ротора, определяемого датчиком положения ротора или косвенными методами. Двигатель обычно питается от преобразователя частоты, содержащего нерегулируемый выпрямитель и автономный инвертор напряжения. Данный электропривод характеризуется высокими энергетическими и низкими массогабаритными показателями. Дальнейшее совершенствование электропривода возможно на основе использования достижений в области преобразовательной техники и разработки новых алгоритмов управления. При необходимости регулирования в широком диапазоне частоты вращения двигателя, достигаемого за счет регулирования частоты и уровня питающего обмотку статора напряжения, представляется целесообразным использование преобразователя частоты, обеспечивающего регулирование мощности, подаваемой на вход инвертора.

Известна схема электропривода с транзисторным ключом между неуправляемым выпрямителем

на выходе источника питания и входными цепями на входе автономного инвертора [1]. Предложенное решение считается перспективным и применяется в вентильно-индукторном электроприводе. Транзисторный ключ выполняет функцию регулируемого источника тока и управляется в режиме широкоимпульсной модуляции.

Схема бесконтактного вентильного генератора с коммутатором нетрадиционного типа была рассмотрена в статье группы специалистов МАИ [2] для применения в автономных системах электропитания. Авторами предлагается использование современного IGBT-транзистора в качестве коммутатора. В качестве алгоритма управления коммутатором предложено использовать метод широтно-импульсной модуляции (ШИМ). В качестве исполнительного механизма используется синхронный двигатель с возбуждением от постоянного магнита, так как его предпочтительнее использовать в составе вентильного генератора на борту транспортных средств, летательных аппаратов и морских судов, чем двигатель с независимым возбуждением. В результате экспериментальных проверок выяснено, что схема показывает вполне удовлетворительные результаты и работает в соответствии с расчетными характеристиками. Однако,

анализируя статью, можно заключить, что решение с применением коммутатора в цепи постоянного тока изучено недостаточно, поэтому целесообразно провести исследования в области его применения в составе вентильного двигателя.

Также известен способ управления вентильным двигателем [3] с использованием транзисторного ключа в цепи постоянного тока инвертора напряжения, который был разработан и исследован с целью применения в нефтяной промышленности (бурение скважин и откачка нефти). Введение транзисторного ключа позволяет регулировать выпрямленный ток и мощность, подаваемую на вход инвертора.

Во всех случаях [1–3] частота коммутации транзисторного ключа, как и ключей инвертора, регулируется с использованием ШИМ-модуляции, что требует применения соответствующих алгоритмов управления.

В данной работе рассматривается система релейного управления вентильным приводом, выполненным на базе синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов, содержащим автономный инвертор напряжения. Особенность системы управления заключается в применении релейного управления транзисторным ключом в звене постоянного тока и релейного регулирования выходного тока инвертора. Применение релейного регулирования обеспечивает улучшенную форму напряжения на статоре синхронного двигателя, а также уменьшение частоты коммутации ключей инвертора [4, 5], что позволит снизить нагрузку на силовые ключи и выбирать их с меньшим запасом мощности. Кроме того, работа дополнительного транзисторного коммутатора в звене постоянного тока приводит к снижению амплитуды напряжения на входе инвертора.

Вышеизложенное позволяет сделать вывод об актуальности разработки и исследования системы релейного управления в вентильном электроприводе.

Принципы работы разрабатываемой системы управления

Функциональная схема электропривода с релейным регулированием фазных токов статора и типовой векторной двухконтурной системой формирования активной составляющей тока статора приведена на рис. 1.

В схеме используются следующие функциональные блоки: БОП – блок оценки положения, БОС – блок оценки скорости, ЗС – задатчик скорости, ЗИ – задатчик интенсивности. Управление двигателем осуществляется в осях (d, q) . Для управления моментом двигателя ток статора необходимо ориентировать по оси q , т.е. поддерживать угол между ротором и вектором статорного тока равным 90° [4–6]. Если ток статора ориентирован по оси q , то он выражается через момент по формуле:

$$\overline{I_s} = I_{sq} = \frac{2M}{3Z_p \Psi_f}, \quad (1)$$

где Z_p – число пар полюсов двигателя, Ψ_f – потокосцепление ротора.

На вход регулятора скорости (РС) подается сигнал ошибки регулирования скорости: $\Delta\omega_2 = \omega_2^* - \omega_2$, где ω_2^* – задание на скорость, ω_2 – реальное значение скорости двигателя, поступающее с блока оценки скорости (БОС). Далее с выхода регулятора скорости сигнал поступает на блок ограничения момента, который рассчитывает сигнал задания на момент и подключен к входу вычислительного блока (БВ), который формирует сигнал задания на составляющую тока статора I_q^* .

Ток I_d , не влияющий на электромагнитный момент, в системе управления поддерживается равным нулю. В координатном преобразователе DQ-ABC происходит преобразование координат с использованием следующих формул:

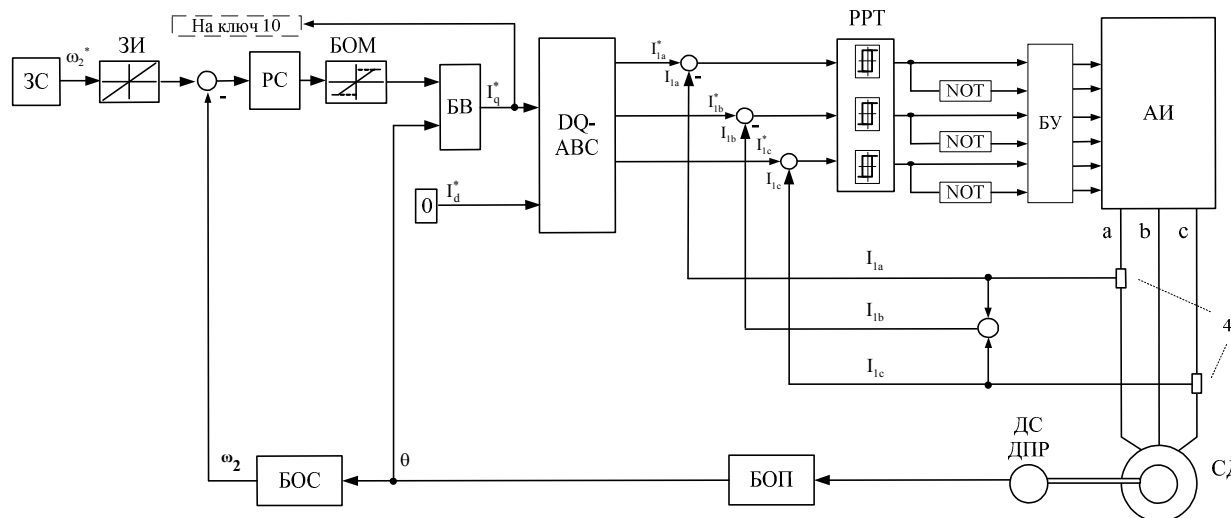


Рис. 1. Функциональная схема электропривода

$$\begin{cases} I_A = I_d^* \cdot \cos(\theta_m) - I_q^* \cdot \sin(\theta_m); \\ I_B = I_d^* \cdot \cos\left(\theta_m - \frac{2}{3}\pi\right) - I_q^* \cdot \sin\left(\theta_m - \frac{2}{3}\pi\right); \\ I_C = I_d^* \cdot \cos\left(\theta_m + \frac{2}{3}\pi\right) - I_q^* \cdot \sin\left(\theta_m + \frac{2}{3}\pi\right). \end{cases} \quad (2)$$

Представленная система управления вентиляльным приводом содержит релейный регулятор фазных токов статора (РРТ), рассмотренный в работах [5, 7], что отличает ее от системы с традиционным ПИ-регулятором [8, 9]. На вход релейного регулятора поступают сигналы задания на ток по каждой из фаз и сигналы обратных связей по току электрической машины 3, получаемые с датчиков тока 4. Управляющие сигналы на инвертор 2 поступают на основе текущей ошибки регулирования, которая рассчитывается по формулам:

$$\begin{cases} \Delta I_{1A} = I_{1A} - I_{1A}^*; \\ \Delta I_{1B} = I_{1B} - I_{1B}^*; \\ \Delta I_{1C} = I_{1C} - I_{1C}^*. \end{cases} \quad (3)$$

Работа релейных регуляторов осуществляется по следующему алгоритму:

- в момент, когда разница заданного значения фазного тока и измеренного значения фазного тока достигнет верхней границы порогового уровня, регулятор включает транзистор верхнего плеча инвертора и выключает транзистор нижнего плеча для соответствующей фазы;

- в момент, когда разница заданного значения фазного тока и измеренного значения фазного тока достигнет нижней границы порогового уровня, регулятор выключает транзистор верхнего плеча и включает транзистор нижнего плеча для соответствующей фазы [8].

Выходные сигналы релейных регуляторов являются управляющими сигналами для транзисторов, находящихся в плечах фаз A , B , C . Наличие блоков инвертирования сигналов делает невозможным одновременное открытие транзисторов, находящихся в одном плече инвертора. Схема силовой части вентиляльного электропривода приведена на рис. 2.

Автономный инвертор напряжения построен на IGBT транзисторах с обратными диодами. В звено постоянного тока включен запираемый транзисторный ключ 10 и дополнительный обратный диод, создающий цепь протекания для тока статора при выключении транзисторного ключа. Между транзисторным ключом и инвертором включен LC-фильтр, позволяющий сглаживать пульсации тока в выпрямленной цепи. Экспериментально установлено, что такое включение фильтра позволяет получить форму тока статора, наиболее близкую к синусоидальной.

Система управления транзисторным ключом содержит замкнутый контур с узлом сравнения

рассчитываемого и измеренного выпрямленного тока и релейно-гистерезисный регулятор выпрямленного тока. Сигнал I_q^* , формируемый в блоке вычисления БВ, умножается на коэффициент усиления (блок 7), который выбирается на основании требований к уровню формируемых трехфазных напряжений статора. Полученный сигнал задания выпрямленного тока сравнивается с сигналом обратной связи от датчика тока 11 и разница поступает на релейно-гистерезисный регулятор 9, который выдает управляющий сигнал u , на управляющий вход транзисторного ключа 10 [4]. Если сигнал на входе регулятора 9 меньше порогового уровня, транзисторный ключ 10 выключен, при отрицательном значении сигнала на входе регулятора 9 транзисторный ключ выключен, при превышении положительного сигнала на входе регулятора порогового уровня транзисторный ключ включен.

Предлагаемая схема силовой части электропривода отличается от типовой без последовательно включенного ключа транзисторного ключа в звене постоянного тока [10]. Одной из задач данной работы являлось исследование влияния транзисторного ключа на амплитуду напряжения в звене постоянного тока. С целью проверки работоспособности системы, а так же получения экспериментальных данных, была создана модель (рис. 4) вентиляльного привода в программной среде MATLAB Simulink 2014a [11]. Архитектура модели системы векторного управления имеет типовой вид [4, 12, 13].

На рис. 3а и 3б показаны графики мгновенных значений напряжения без транзисторного ключа и при его включении в звено постоянного тока.

Из полученных графиков видно, что амплитуда пульсаций напряжения на входе инвертора значительно меньше, чем в типовых системах, построенных на базе автономного инвертора напряжения. Использование дополнительной индуктивности в цепи постоянного тока не только сглаживает пульсации тока в выпрямленной цепи, но и позволяет получить форму выходного тока инвертора наиболее близкую к синусоидальной. Экспериментально установлено, что индуктивность дросселя следует выбирать примерно равной значению индуктивности контура намагничивания синхронного двигателя.

Как видно из рис. 5 (показаны части графиков распределения фазных токов статора во время разгона двигателя во временном промежутке 0,2 с), в случае если индуктивность дросселя выбрана правильно, получаем форму тока наиболее близкую к синусоидальной.

На рис. 6 показаны графики скорости и электромагнитного момента, демонстрирующие пуск электропривода при векторной системе управления с кратковременной работой на двух промежуточных пониженных скоростях.

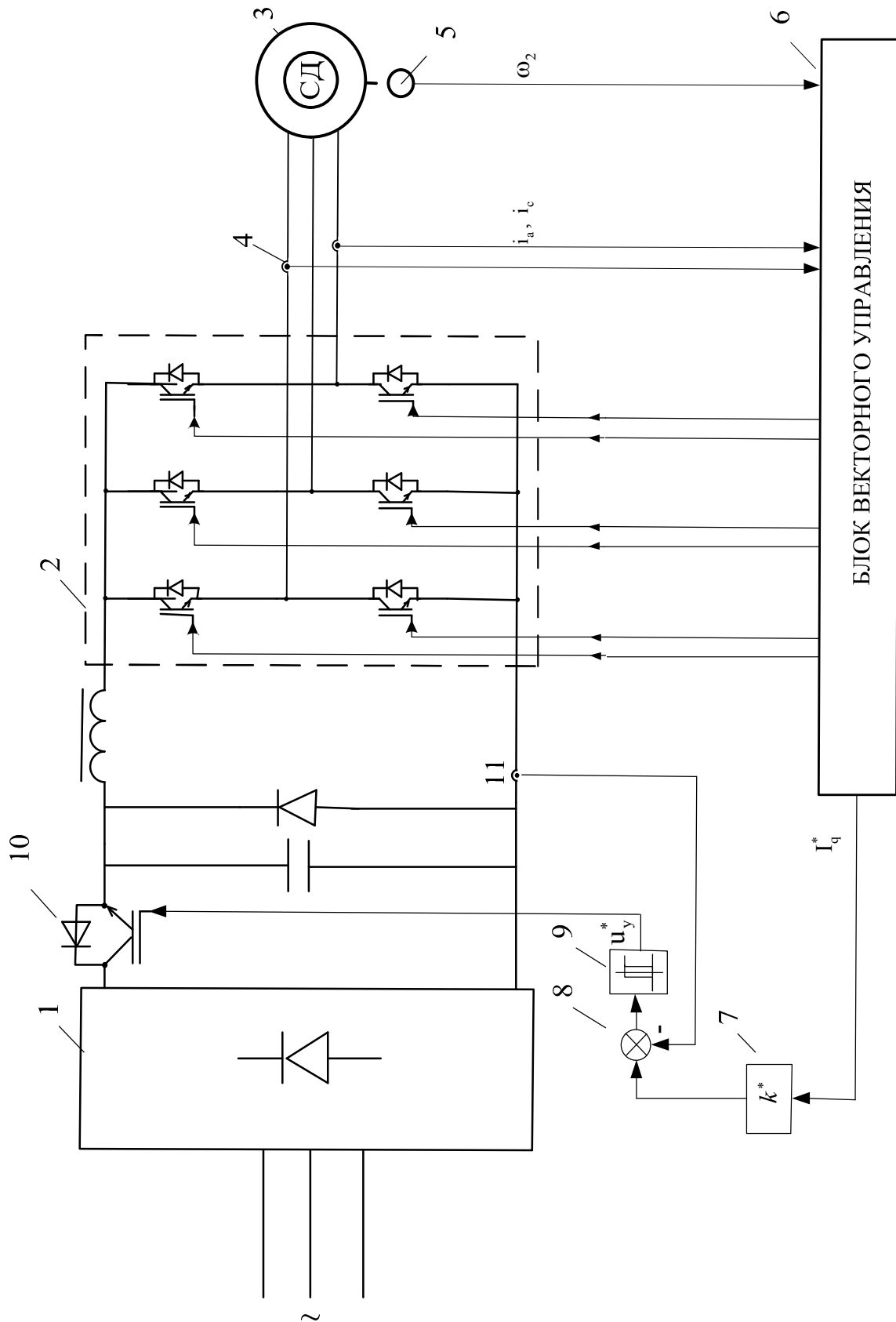
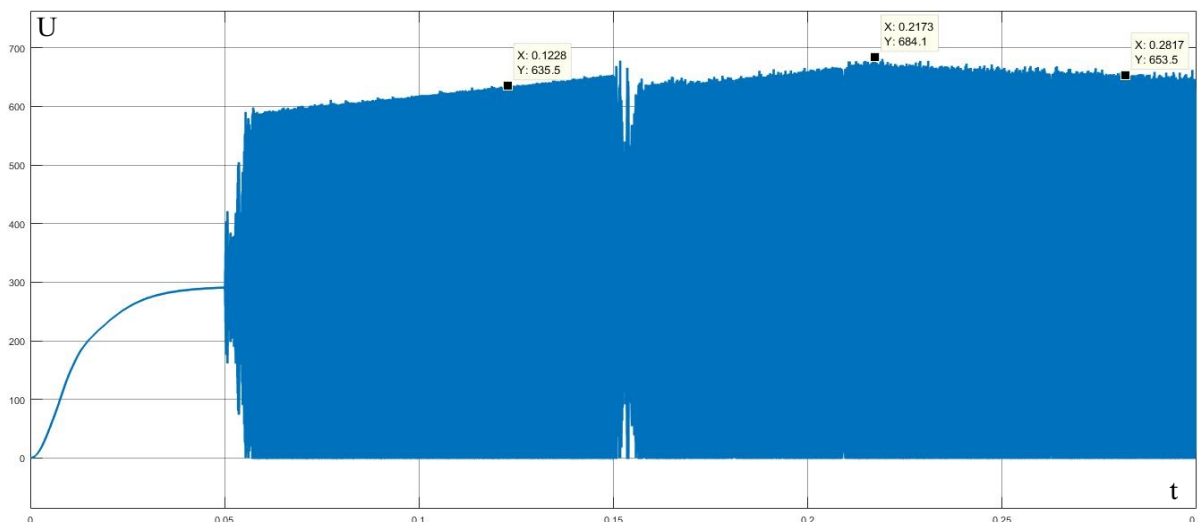
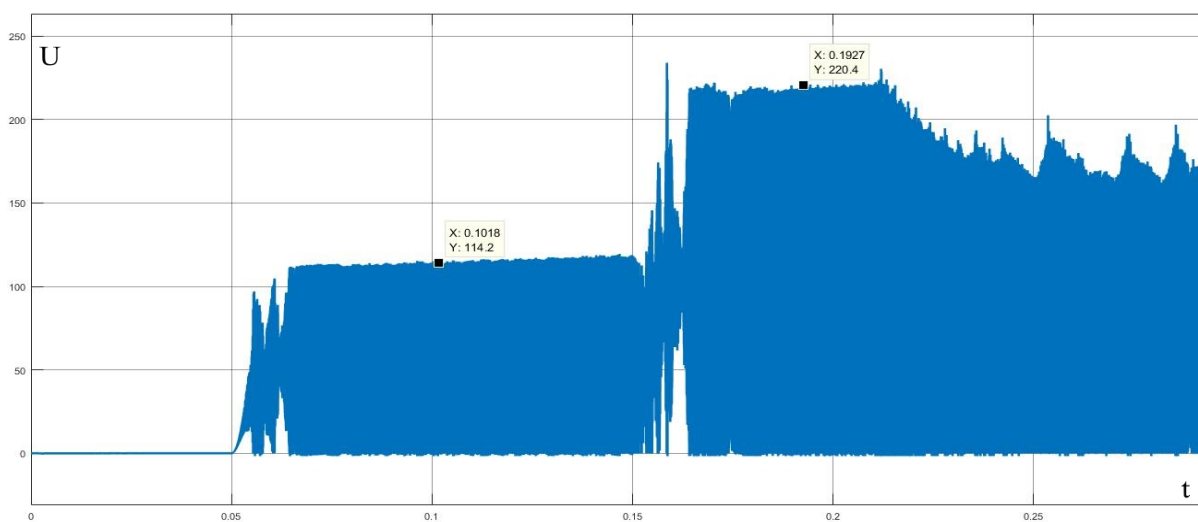


Рис. 2. Схема силовой части электропривода переменного тока



а)



б)

Рис. 3. Напряжение в звене постоянного тока без транзисторного ключа (а) и с транзисторным ключом (б)

Графики демонстрируют следующие режимы работы: в начальный момент времени на регулятор скорости поступает задание на скорость 300 об/мин. В точке 1,2 с после запуска задание на скорость возрастает до 500 об/мин. При этом в точке 1,5 с на вал двигателя прикладывается момент 11 нм. Далее в точке 1,7 с задание на скорость возрастает до 650 об/мин.

Заключение

В результате проведенной работы была построена и исследована модель векторной системы управления вентильным приводом с измененной конструкцией силовой части преобразователя частоты. Как видно из рис. 5, система управления позволяет формировать улучшенную, близкую к синусоидальной форму тока на выходе инвертора при уменьшенных пульсациях напряжения за счет

использования коммутатора в звене постоянного тока и релейных регуляторов. В преобразователе частоты с нерегулируемым выпрямителем и с фильтрующим конденсатором на выходе уровень гармоник, поступающих в питающую сеть, ниже, а коэффициент мощности выше по сравнению со схемой на базе инвертора тока. Электропривод с нерегулируемым выпрямителем имеет лучшую электромагнитную совместимость с питающей сетью. При этом введение в звено постоянного тока транзисторного ключа и обратного диода позволяет регулировать выпрямленный ток и мощность, подаваемую на вход инвертора, что обычно характерно для инвертора тока. При пониженной частоте вращения двигателя амплитуда напряжения, подаваемого на вход инвертора, ниже, чем у известных разработок. Использование типовой

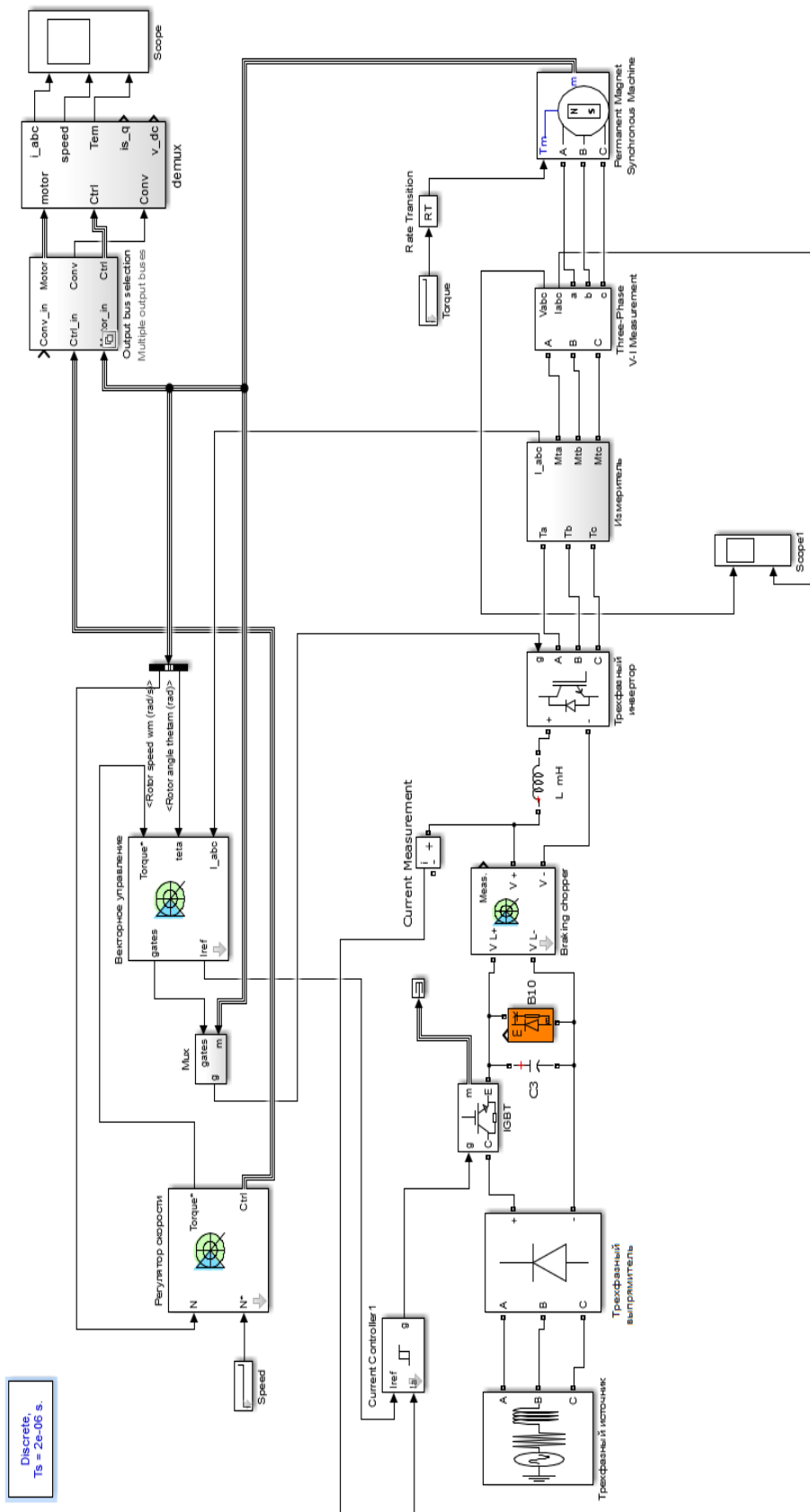
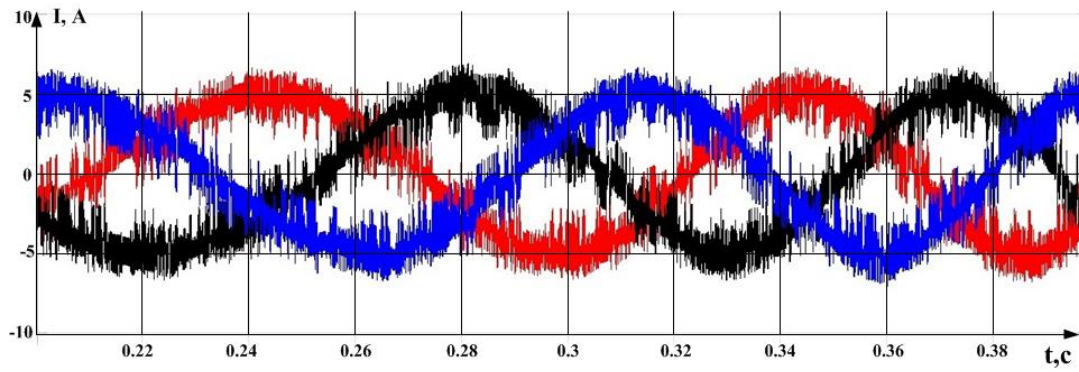
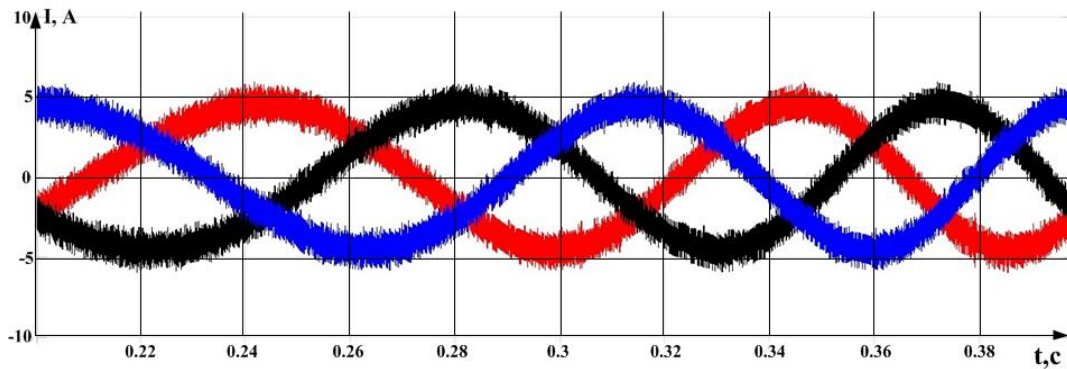


Рис. 4. Модель вентиляльного электропривода в среде Matlab Simulink



а)



б)

Рис. 5. График распределения токов по фазам А, В, С: а – при неверно выбранном недостаточном значении индуктивности в цепи постоянного тока; б – при правильно выбранном значении индуктивности в цепи постоянного тока

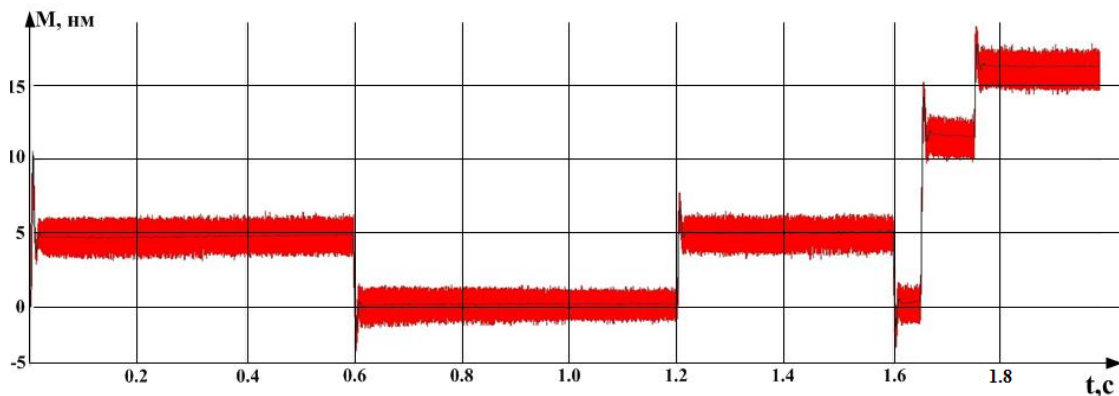
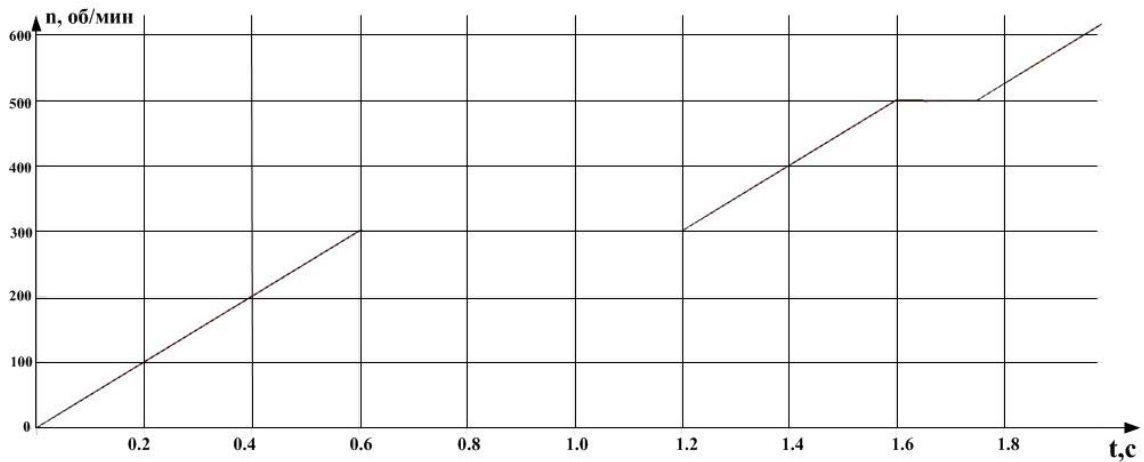


Рис. 6. График скорости и электромагнитного момента вентильного двигателя

системы векторного управления электроприводом с предложенным инвертором позволяет получить требуемое качество регулирования момента и скорости двигателя. Из анализа графиков на рис. 6 можно сделать вывод, что двигатель стабильно разгоняется, поддерживает заданные обороты и обрабатывает наброс нагрузки.

Литература

1. Усынин, Ю.С. Системы управления электроприводов: учеб. пособие. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2001. – 358 с.

2. Алиевский, Б.Л. Вентильный генератор для автономных систем электроснабжения постоянного тока / Б.Л. Алиевский, С.А. Щербаков, С.Р. Мизюрин // *Электричество*. – 2003. – № 1. – С. 27–32.

3. Пат. 2207700 Российская Федерация. Способ управления вентильным электродвигателем / В.Ю. Алекперов, Р.У. Маганов, В.Ф. Лесничий, В.И. Грайфер, А.В. Беззубов, Н.П. Хохлов, М.Я. Гинзбург, В.И. Павленко, В.И. Сагаловский, А.В. Сагаловский, В.М. Волков, Г.Л. Агапова; заявитель и патентообладатель ОАО «Нефтяная компания «ЛУКОЙЛ», ОАО «Российская инновационная топливно-энергетическая компания». – № 2000108696/09; заявл. 11.04.2000; опубл. 27.06.2003.

4. Пат. 166655 Российская Федерация. Устройство для управления электроприводом переменного тока / В.Н. Мещеряков, В.Н. Воеков; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Липецкий государственный технический университет» (ЛГТУ) (RU). – № 2016113199/07; заявл. 06.04.2016; опубл. 10.12.2016, Бюл. № 34.

5. Мещеряков, В.Н. Оптимизация взаимного положения векторов тока статора и магнитного потока асинхронного двигателя при векторном

управлении / В.Н. Мещеряков, П.Н. Левин // *Изв. вузов. Электромеханика*. – 2006. – № 1. – С. 25–27.

6. Соколовский, Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием / Г.Г. Соколовский. – М.: Academia, 2006. – 259 с.

7. Мещеряков, В.Н. Применение бесполой адаптивной системы для управления электроприводом с вентильным двигателем / В.Н. Мещеряков, В.Г. Карантаев // *Электротехн. комплексы и системы управления*. – 2006. – № 2. – С. 38–40.

8. Мещеряков, В.Н. Анализ систем управления электроприводом на базе автономного инвертора тока с релейными регуляторами тока и релейными регуляторами напряжения со сглаживающим емкостным фильтром / В.Н. Мещеряков, А.С. Абросимов // *Электротехнические комплексы и системы управления*. – 2011. – № 3. – С. 64–68.

9. Мещеряков, В.Н. Анализ инверторов тока и напряжения с системами релейного управления / В.Н. Мещеряков, Д.В. Ласточкин // *Вести вузов Черноземья*. – 2016. – № 2. – С. 13–18.

10. Bimal K. Bose. *Modern Power Electronics and AC Drives*. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 2002.

11. Черных, И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И.В. Черных. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.

12. Барышников, О.Д. Построение систем автоматизированного электропривода / О.Д. Барышников, Г.Г. Соколовский, В.А. Новиков, В.М. Шестаков. – Л.: ЛДНТП, 1968.

13. Башиарин, А. В. Управление электроприводами / А.В. Башиарин, В.А. Новиков, Г.Г. Соколовский. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-е, 1982. – 392 с.

Мещеряков Виктор Николаевич, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Электропривод», Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, mesherek@yandex.ru.

Воеков Владимир Николаевич, ООО «Промэлектроника», г. Липецк, resonance06@mail.ru.

Поступила в редакцию 13 марта 2017 г.

RECTIFIER DRIVE VECTOR CONTROL SYSTEM BASED ON SELF-COMMUTATED VOLTAGE INVERTER WITH RELAY REGULATOR OF INPUT INVERTER CURRENT AND CURRENT ON STATOR PHASES

V.N. Meshcheryakov¹, mesherek@yandex.ru,

V.N. Voekov², resonance06@mail.ru

¹ Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russian Federation,

² OOO "Promelektronika", Lipetsk, Russian Federation

The given research paper delves into a rectifier drive vector control system based on a self-commutated voltage inverter with relay current regulators of a stator. The scope of application is the oil industry, high-precision electric drives of working machines. Application of the modern hardware components allowing to use new control algorithms expands the functional capabilities of the rectifier drive control systems and leads to energy saving. The frequency converter model with the self-commutated voltage inverter was designed and studied. The inverter was constructed on the basis of the IGBT transistors with the reverse diodes and relay regulators of the stator current. The IGBT transistor key is connected to the DC link. It helps to vary rectified current and power on the inverter input. This control system allows obtaining of the near-sinusoidal output voltage and the current curve form as well as the current on the stator winding terminals. The use relay current regulators reduces voltage ripples. The model of the researched system was created in the Matlab Simulink software environment. Simulation results and analytic surveys are agreed and show that the control system complies with the specified requirements.

Keywords: rectifier drive, self-commutated voltage inverter, relay regulator of stator current, transistor key with relay control, frequency converter.

References

1. Usynin Yu.S. *Sistemy upravleniya elektroprivodov: Ucheb. Posobie* [Control Systems of Electric Drives: Proc. Allowance]. Chelyabinsk, South Ural St. Univ. Publ., 2001. 358 p.
2. Alievskiy B.L., Shcherbakov S.A., Mizyurin S.R. [Valve Generator for Autonomous DC power Supply Systems]. *Electrical Technology Russia*, 2003, no. 1, pp. 27–32. (in Russ.)
3. Alekperov V.Yu., Maganov R.U., Lesnichiy V.F., Grayfer V.I., Bezzubov A.V., Khokhlov N.P., Ginzburg M.Ya., Pavlenko V.I., Sagalovskiy V.I., Sagalovskiy A.V., Volkov V.M., Agapova G.L. *Sposob upravleniya ventil'nyy elektrodvigatелеm* [Method for Controlling Valve-type Electric Motor]. Patent RF, no. 2207700, 2003.
4. Meshcheryakov V.N., Voekov V.N. *Ustroystvo dlya upravleniya elektroprivodom peremennogo toka* [Device for AC Drive Controlling]. Patent RF, no. 166655, 2016.
5. Meshcheryakov V.N., Levin P.N. [Optimization of Mutual Position of Stator Current Vectors and Magnetic Flux of Induction Motor under Vector Control]. *Izvestiya vuzov. Electromechanica* [Proceedings of Universities. Electromechanics], 2006, no. 1, pp. 25–27. (in Russ.)
6. Sokolovskiy G.G. *Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem* [Electric Drives with Frequency Control]. Moscow, Academia Publ., 2006. 259 p.
7. Meshcheryakov V.N., Karantaev V.G. [Application of Search-free Adaptive System for Control of Drive with Drive Motor]. *Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy upravleniya* [Electrotechnical Complexes and Control Systems], 2006, no. 2, pp. 38–40. (in Russ.)
8. Meshcheryakov V.N., Abrosimov A.S. [Analysis of Electric Drive Control Systems Based on Self-commutated Current Inverter with Relay Controls Current and Voltage Regulator Relay with Smoothing Capacitor Filter]. *Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy upravleniya* [Electrotechnical Complexes and Control Systems], 2011, no. 3, pp. 64–68. (in Russ.)
9. Meshcheryakov V.N., Lastochkin D.V. [Analysis of Current and Voltage Inverters with Relay Control Systems]. *Vesti vuzov Chernozem'yaVesti* [News of the Universities], 2016, no. 2, pp. 13–18. (in Russ.)
10. Bimal K. Bose. *Modern Power Electronics and AC Drives*. Upper Saddle River, NJ, Prentice-Hall, 2002.
11. Chernykh I.V. *Modelirovaniye elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink* [Modeling of Electrical Devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink]. Moscow, DMK Press Publ., St. Petersburg, Piter Publ., 2008. 288 p.

12. Baryshnikov O.D., Sokolovskiy G.G., Novikov V.A., Shestakov V.M. *Postroenie sistem avtomatizirovannogo elektroprivoda* [Construction of Automated Electric Drive Systems]. Leningrad, 1968.

13. Basharin A.V., Novikov V.A., Sokolovskiy G.G. *Upravlenie elektroprivodami* [Control of Electric Drives]. Leningrad, Energoizdat Publ., 1982. 392 p.

Received 13 March 2017

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Мещеряков, В.Н. Векторная система управления вентильным электроприводом на базе автономного инвертора напряжения с релейным регулированием входного тока инвертора и фазных токов статора / В.Н. Мещеряков, В.Н. Воеков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2017. – Т. 17, № 2. – С. 48–57. DOI: 10.14529/power170207

FOR CITATION

Meshcheryakov V.N., Voekov V.N. Rectifier Drive Vector Control System Based on Self-Commutated Voltage Inverter with Relay Regulator of Input Inverter Current and Current on Stator Phases. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2017, vol. 17, no. 2, pp. 48–57. (in Russ.) DOI: 10.14529/power170207
