

УДК 62-533.7, 621.638

Б. Ю. Васильев, канд. техн. наук

СТРУКТУРА И АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТРЕХУРОВНЕВЫМ ИНВЕРТОРОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТИРОВКИ УГЛЕВОДОРОДОВ

Аннотация. Рассмотрены структура, состав оборудования и алгоритмы управления трехуровневым автономным инвертором преобразователя частоты высоковольтного электропривода перекачивающего углеводороды агрегатов. Приведены результаты исследования эффективности высоковольтного электропривода газоперекачивающих агрегатов.

Ключевые слова: трехуровневый автономный инвертор, электропривод, алгоритм управления

B. Vasilev, PhD.

STRUCTURE AND THREE-LEVEL INVERTER CONTROL ALGORITHM ELECTRIC POWER FACILITIES TRANSPORTATION OF HYDROCARBONS

Abstract. The structure, composition and equipment control algorithms autonomous three-level inverter frequency converter torus high-voltage electric pumping unit's hydrocarbons. The results of studies of the effectiveness of high-voltage electric compressor unit.

Keywords: three-level inverter autonomous, power control algorithm

Б. Ю. Васильев, канд. техн. наук

СТРУКТУРА І АЛГОРИТМИ УПРАВЛІННЯ ТРИРІВНЕВИМ ІНВЕРТОРОМ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ОБ'ЄКТІВ ТРАНСПОРТУВАННЯ ВУГЛЕВОДНІВ

Анотація. Розглянуто структуру, склад устаткування та алгоритми управління трирівневим автономним інвертором перетворювача частоти високовольтного електроприводу, що перекачує вуглеводні агрегати. Наведено результати дослідження ефективності високовольтного електроприводу газоперекачувальних агрегатів.

Ключові слова: трирівневий автономний інвертор, електропривод, алгоритм управління

Введение

В значительной степени эффективность газотранспортных систем зависит от эффективной работы компрессорных станций, а именно, газоперекачивающих агрегатов (ГПА) [1 – 6].

Для обеспечения эффективной работы ГПА необходимо обеспечивать регулирование производительности центробежного нагнетателя. Наиболее эффективно и экономично это можно реализовать с помощью регулируемого приводного электродвигателя переменного тока. Регулирование частоты вращения путем изменения частоты питающего напряжения по заданному алгоритму обеспечивает оптимальное изменение координат электропривода, как при пуске и торможении, так и в установившемся режиме работы агрегата на номинальной, и отличной от нее, скорости. Использование центробежных нагнетателей большой производительности, обусловили применение электроприводов мощностью от 2,5 до 60 МВт, в состав которых входит высоковольтный преобразователь частоты. Современные высоковольтные преобразователи частоты имеют различную структуру и состав оборудования, а управление ключами силовых коммутаторов осуществляется по различным модуляционным алгоритмам, от типов и видов которых в конечном итоге зависят энергетические, технические и стоимостные характеристики ГПА [8 – 14].

Структура электропривода ГПА

Структурная схема преобразователя частоты, предназначенного для электроснабжения и управления приводным высокооборотным (до 8622 об/мин)

электродвигателем мощностью до 9150 кВт, представлена на рис. 1 (внешний вид ГПА – рис. 2). Преобразователь частоты, номинальной мощности 8710 кВт и номинальным током 1524 А, обеспечивает изменение уровня и частоты выходного напряжения в диапазоне 0 – 3,3 кВ и 0 – 136,9 Гц, соответственно.

В состав преобразователя входят диодный выпрямитель, звено постоянного тока и инвертора, а также система управления. Преобразователь частоты получает электроэнергию от высоковольтной линии электропередач через трансформатор, первичная обмотка которого подсоединена к этой линии. Трансформатор имеет две вторичные обмотки, одна из которых соединена «звездой», а другая – «треугольником». Вследствие этого, трехфазные системы напряжений вторичных обмоток взаимно сдвинуты по фазе на 30 эл. град. Подключенные к вторичным обмоткам трансформатора два диодных выпрямителя преобразователя частоты обеспечивают 12-пульсный режим работы электропривода со стороны питающей сети, организация которого позволяет исключить из потребляемых токов или значительно уменьшить 5, 7, 17, 19 и ряд других высших гармонических составляющих.

В выпрямителе используются диоды, рассчитанные на напряжение до 6 кВ и ток до 3 кА. Входное напряжение – 1850 В, 50 Гц, выходное напряжение – 2х2.5кВ постоянного напряжения, ток до 1900 А. Звено постоянного тока, которое предназначено для сглаживания пульсаций на выходе выпрямителя, представляет собой две последовательно включённых сборки из соединённых параллельно конденсаторов (1875 мкФ±10 %) и разрядных резисторов 22 кОм.

© Васильев Б.Ю., 2014

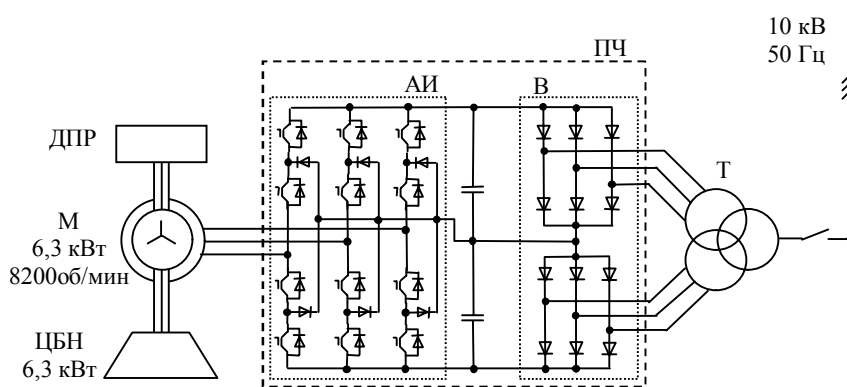


Рис. 1. Структурная схема преобразователя частоты



Рис. 2. Внешний вид ЭП ГПА

Инвертор выполнен на полупроводниковых приборах *IEGT* и имеет трехуровневую топологию с зафиксированной нейтральной точкой. Звено постоянного тока разделено на две сборки конденсаторов: первая сборка между шинами DC+ и 0В, и вторая сборка между 0В и DC-. В инверторе применены диоды, рассчитанные на напряжение до 4500В, и ток до 1500 А и транзисторы, рассчитанные на напряжение до 4500 В, и ток до 2100 А.

Система управления реализует векторное управление асинхронным электродвигателем с номинальной мощностью, напряжением и током 6300кВт, 3300 В и 1450 А, соответственно. Синхронная частота вращения ротора двигателя и частота тока при синхронной частоте вращения 8200 об/мин и 136,9 Гц, соответственно. Момент электродвигателя 7,34 кН·м.

Структура и алгоритм управления трехуровневым инвертором. В трехфазном трехуровневом автономном инверторе напряжения в каждом плече моста используются два IEGT, включенных последовательно. Напряжения между последовательно включенными полупроводниковыми приборами делятся приблизительно поровну с помощью последовательно соединенных конденсаторов в звене постоянного тока, а также при использовании дополнительных диодов, с помощью которых точка соединения друг с другом конденсаторов объединяется с точками соединения друг с другом полупроводниковых приборов в каждом плече моста. Для

формирования напряжений нагрузки используются три уровня напряжения – нулевой уровень, напряжение на одном конденсаторе и напряжение на двух последовательно соединенных конденсаторах. Как это показано на рисунках 3 и 4. При этом используется два несущих сигнала U_{s1} и U_{s2} .

В зависимости от комбинации включенных транзисторов напряжение на выходе инвертора может быть равно $+U_d$, 0, или $-U_d$. Рис. 4 иллюстрирует этот принцип на примере напряжения между фазами АВ.

Результаты и анализ математического моделирования электропривода. При исследовании эффективности высоковольтного ЭП ГПА использовались имитационные модели, построенные в MatLab Simulink и Sim Power System. Модель электропривода ГПА была построена в соответствии со схемой, представленной на рис.1.

На рис. 5 приведены осциллограммы заданной и действительной частоты вращения и момента электродвигателя при разгоне электродвигателя от 0 до номинальной частоты вращения. Разгон электродвигателя осуществляется без перерегулирования и с высокой точностью. Значение момента при этом превышает номинальное значение не более чем на 20 %.

На рис.6 представлены зависимости коэффициента искажения синусоидальности и коэффициента мощности электропривода при изменении скорости электродвигателя от 0 до 100 % от номинальной.

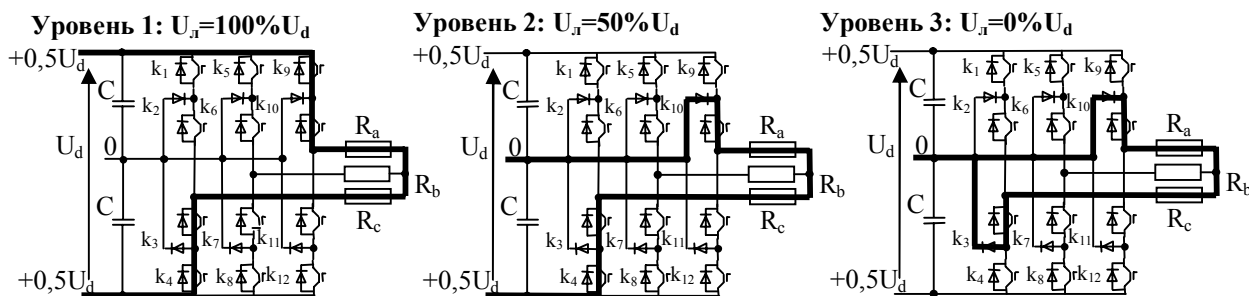


Рис. 3. Принцип работы трехуровневого автономного инвертора

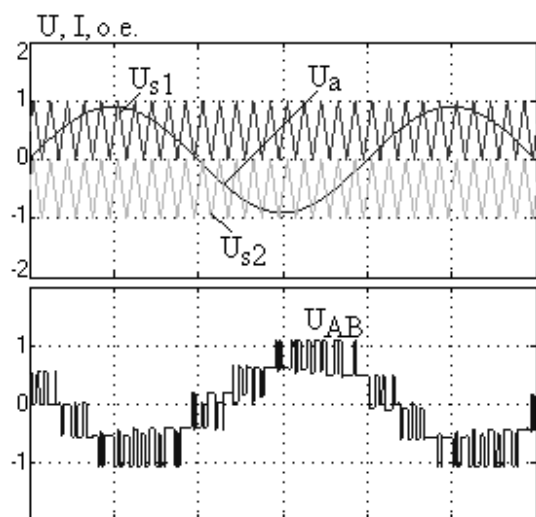


Рис. 4. Работа трехуровневого автономного инвертора

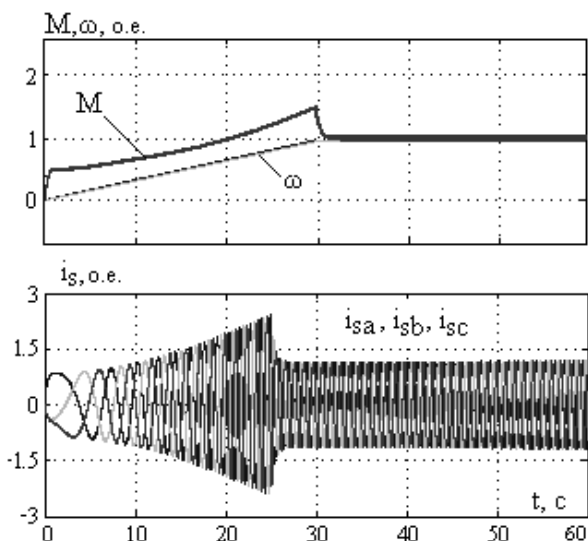


Рис. 5. Осциллограммы координат электропривода

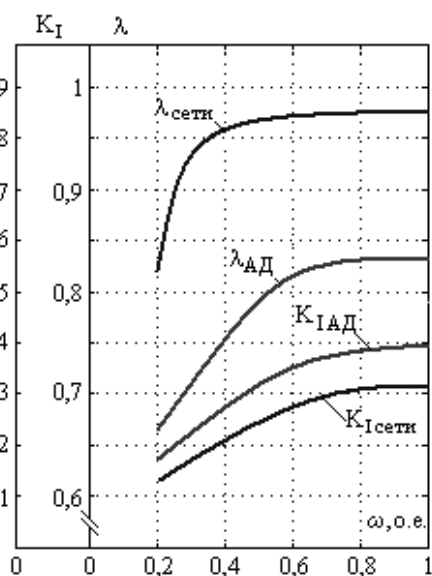


Рис. 6. Коэффициенты искажения синусоидальности и мощности

Из графика можно заключить, что коэффициент искажения тока сети ($K_{I\text{сети}}$) и асинхронного электродвигателя ($K_{I\text{АД}}$) не превышает нормально допустимого уровня во всем диапазоне регулирования скорости. Коэффициент мощности электропривода на стороне сети электроснабжения ($\lambda_{\text{сети}}$) не снижается ниже уровня 0,83 во всем диапазоне регулирования скорости, а на любой скорости выше 40 % от номинальной, выше уровня 0,95.

Список используемой литературы:

1. Козярук А. Е. Структура, состав и алгоритмы управления высокоэффективных электроприводов газоперекачивающих агрегатов / А. Е. Козярук, Б. Ю. Васильев // *Электротехника*. – 2013. – № 2. – С. 43 – 51.
2. Васильев Б. Ю. Автоматизированный электропривод объектов минерально-сырьевого комплекса (применение, моделирование, исследование) / Б. Ю. Васильев. – Санкт-Петербург : Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2014. –139 с.
3. Kozyaruk A., and Vasilev B., (2013), Structure, Composition, and Control Algorithms of High-Efficiency Electric Drives of Gas-Compressor Units, *Russian Electrical Engineering*, Vol. 84, pp. 94 – 102.
4. Васильев Б. Ю. Мехатронные перекачивающие комплексы на основе регулируемых электроприводов для подводного компримирования и транспортировки природного газа / Б. Ю. Васильев // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2013. – № 3. – С. 55 – 60.
5. Васильев Б. Ю. Транспортировка газа: сравнительный анализ энергоэффективности, ресурсосбережения и экологичности типов приводов ГПА / Б. Ю. Васильев, А. Е. Козярук // *Oil&Gas Journal Russia*. – 2013. – № 4. – С. 68 – 75.
6. Kozyaruk A., and Vasilev B., (2011), Automatic Electric Drive for Gas-Pumping Unit, *Electrotechnic and Computer Systems*, No. 3 (79), 194 p.
7. Васильев Б. Ю. Эффективные алгоритмы управления полупроводниковыми преобразователями в асинхронных электроприводах / Б. Ю. Васильев, В. С. Добуш // *Электричество*. – 2014. – № 04. – С. 54 –61.
8. Виноградов А. Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / А. Б. Виноградов. Иваново : ФГАОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина», 2008. – 298 с.
9. Васильев Б. Ю. Релейно-импульсные системы управления асинхронными электроприводами: прямого и фаззи - логического управления / Б. Ю. Васильев, Козярук А. Е. // *Электротехнические комплексы и системы*. – 2014. – № 1 (22). – С. 32 – 35.
10. Усольцев А. А. Частотное управление асинхронными двигателями / А. А. Усольцев. Санкт-Петербург : ФГАОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики», 2006, – 94 с.
11. Васильев Б. Ю. Эффективность управления электроприводом переменного тока с прямым управ-

лением / Б. Ю.Васильев // Известия ВУЗов. Электро-механика. – 2014. – № 1. – С. 71 – 75.

12. Шрейнер Р. Т. Электроприводы переменного тока на базе непосредственных преобразователей частоты с ШИМ : под общей редакцией Р. Т. Шрейнера / Р. Т. Шрейнер, А. И. Калыгин, В. К. Кривовяз. – Екатеринбург : ФГАОУ ВПО «Российский государственный профессионально-педагогический университет» Учреждение Российской академии образования «Уральское отделение», 2012. – 223 с.

13. Васильев Б. Ю. Повышение эффективности асинхронных электроприводов с прямым управлением моментом / Б. Ю.Васильев, А. Е. Козырук // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2013. – Т. 13. – № 2. – С. 75 – 84.

14. Пронин М. В. Электроприводы и системы с электрическими машинами и полупроводниковыми преобразователями (моделирование, расчет, применение) : под редакцией Е. А. Крутякова / М. В. Пронин, А. Г. Воронцов, П. Н. Калачиков, А. П. Емельянов. – Санкт-Петербург : «Силовые машины», «Электросила», 2004. – 252 с.

Получено 23.05.2014

References

1. Kozyaruk A., and Vasiliev B. Struktura, sostav i algoritmy upravleniya vysokoeffektivnykh elektroprivodov gazoperekachivayushhix agregatov [Structure, Composition and Management of High-Performance Algorithms for Electric Pumping Units], (2013), *Electric Appliances*, No. 2, pp. 43 – 51 (In Russian).

2. Vasiliev B. Avtomatizirovannyj elektro-privod obektov mineralno-syrevogo kompleksa (primeneniye, modelirovaniye, issledovaniye) [Automatic Electric Objects Mineral Complex (Application, Modeling, Research)]. (2014), St. Peterberg, Russian Federation, *National University of Mineral Resources*, 139 p. (In Russian).

3. Kozyaruk A., and Vasilev B., (2013), Structure, Composition, and Control Algorithms of high-efficiency Electric Drives of Gas-Compressor Units, *Russian Electrical Engineering*, Vol. 84, pp. 94 – 102 (In English).

4. Vasiliev B. Mexatronnye perekachivayushhie komplekсы na osnove reguliruemых elektroprivodov dlya podvodnogo kompremirovaniya i transportirovki prirodnogo gaza [Mechatronic Pumping Systems Based on Controlled Drives for Underwater Compression of Natural gas Transportation], (2013), *Mechatronics, Automation, Control*, No. 3, pp. 55 – 60 (In Russian).

5. Vasiliev B., and Kozyaruk A. Transportirovka gaza: sravnitelnyj analiz energoeffektivnosti, resursosberezheniya i ekologichnosti tipov privodov GPA [Transportation of Natural Gas: Comparative Analysis of Energy Efficiency, Resource Conservation and Environmental Types of Drives GPU], (2013), *Oil & Gas Journal Russia*, No. 4, pp. 68 – 75 (In Russian).

6. Kozyaruk A., and Vasilev B. (2011), Automatic Electric Drive for Gas-Pumping Unit, *Electrotechnic and Computer Systems*, No. 3 (79), 194 p. (In English).

7. Vasiliev B., and Dobush V. Effektivnye algoritmy upravleniya poluprovodnikovymi preobrazovatelyami v asinxronnykh elektroprivodax, [Effective Control Algorithms Semiconductor Converters for Induction motor Drives], (2014), *Electricity*, No.4, pp. 54 – 61 (In Russian).

8. Vinogradov A. Vektornoe upravlenie elektroprivodami peremennogo toka [Vector Control Electric Drive AC], (2008), Ivanovo, Russian Federation, *Ivanovo State Power University*, 298 p. (In Russian).

9. Vasiliev B., and Kozyaruk A. Relejno-impulsnye sistemy upravleniya asinxronnymi elektroprivodami: pryamogo i fazzi – logicheskogo upravleniya [Relay Impulse Control Asynchronous Electric Drives: Direct and Fuzzy-Logic Control], (2014), *Electrotehnicheskie Systems and Systems*, No. 1, pp. 32 – 35 (In Russian).

10. Usoltsev A. Chastotnoye upravlenie asinxronnymi dvigatelyami [Frequency Control the Induction Motors], (2006), St. Petersburg, Russian Federation, “Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics”, 94 p. (In Russian).

11. Vasiliev B. Effektivnost upravleniya elektroprivodom peremennogo toka s pryamym upravleniem [Management Effectiveness AC Drive with Direct Control], (2014), *Proceedings of the Universities. Electromechanics*, No.1, pp. 71 – 75 (In Russian).

12. Schreiner R., Kalygin A., and Krivovyaz V. Elektroprivody peremennogo toka na baze neposredstvennykh preobrazovatelej chastoty s ShIM [AC Drives on the Basis of Directly Frequency Converters with PWM], (2012), Edited by R. Schreiner. Yekaterinburg, Russian Federation, “Russian State Professionally Pedagogical University” Institution of the Russian Academy of Education “Ural Separated”, 223 p. (In Russian).

13. Vasiliev B., and Kozyaruk A. Povysheniye effektivnosti asinxronnykh elektroprivodov s pryamym upravleniem momentom [Improving the Efficiency of Induction Motor Drives with Direct Torque Control], (2013), *Bulletin of SUSU. Series of Energy Industry*, Vol. 13, No. 2, pp.75 – 84 (In Russian).

14. Pronin M. and Vorontsov A. Elektroprivody i sistemy s elektricheskimi mashinami i poluprovodnikovymi preobrazovatelyami (modelirovaniye, raschet, primeneniye) [Power Fully Controllable Semiconductor Converters (Modeling and Calculation)], (2003), Edited by E. Krutyakova. St. Petersburg, Russian Federation, “Electric power”, 172 p. (In Russian).



Васильев
Богдан Юрьевич,
канд. техн. наук, преподаватель
каф. электротехники, электро-
энергетики, электромеханики
Нац. минерально-сырьевого
ун-та «Горный».
г. Санкт-Петербург, Российская
федерация, Васильевский
остров, 21-я линия, д.2.
E-mail: vasilev.bu@mail.ru.