

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. Васил'ев, 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

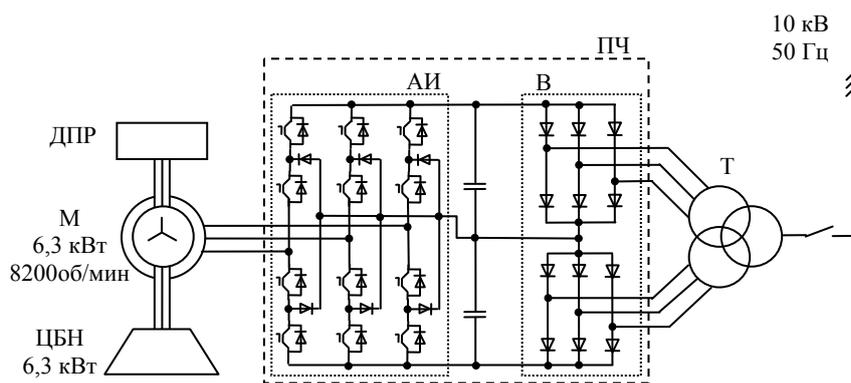


Рис. 1. Структурная схема преобразователя частоты



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.

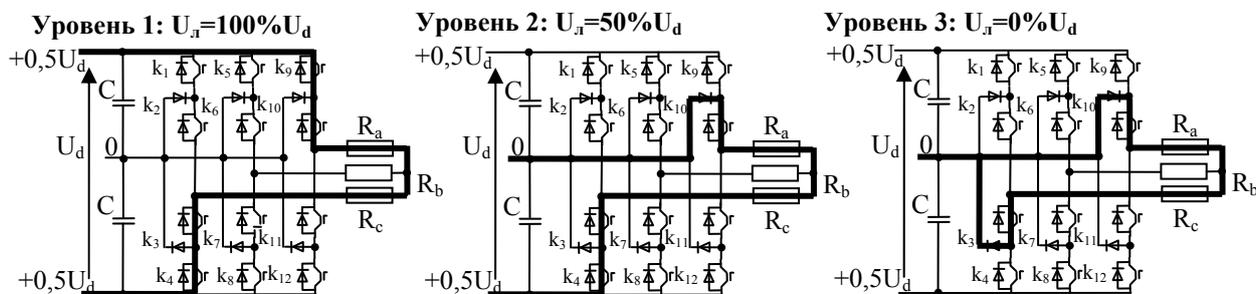


Рис. 3. Принцип работы трехуровневого автономного инвертора

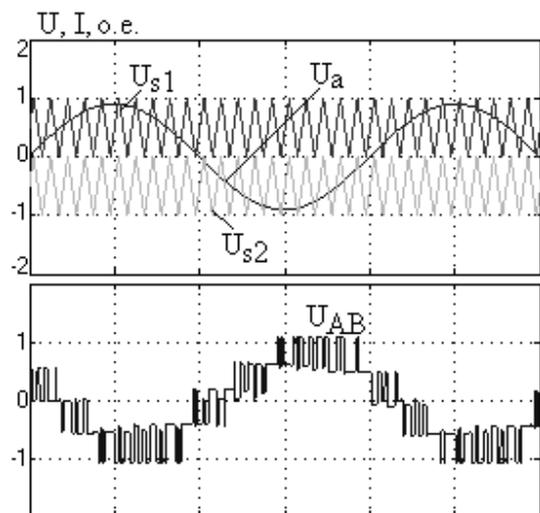


Рис. 4. Работа трехуровневого автономного инвертора

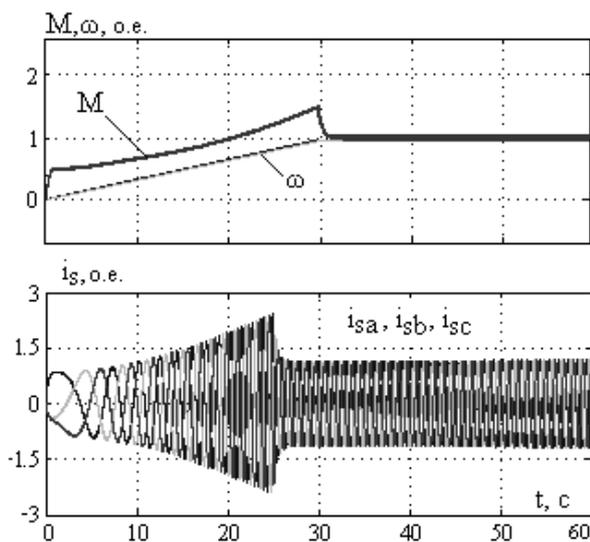


Рис. 5. Осциллограммы координат электропривода

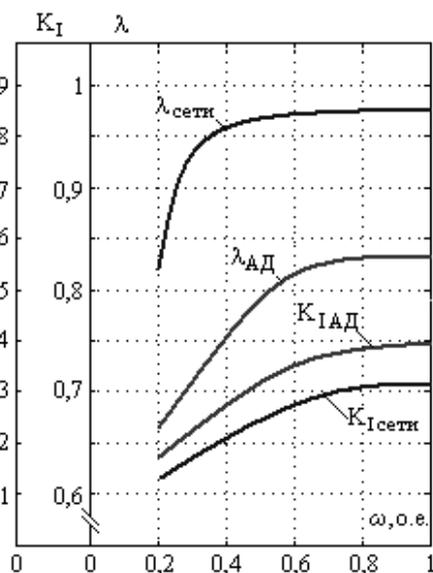


Рис. 6. Коэффициенты искажения синусоидальности и мощности

Из графика можно заключить, что коэффициент искажения тока сети ($K_{I\text{сети}}$) и асинхронного электро-двигателя ($K_{I\text{АД}}$) не превышает нормально допустимо-го 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 фазы - 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. Электромеханика. – 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. Effektivnyye algoritmy upravleniya poluprovodnikovymi preobrazovatelyami v asinxronnykh elektroprivodakh, [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-impulsnyye 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 Krivoviyaz 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.