

УДК 621.3.016.31

Л.С. Ломакина, Д.Г. Садиков, В.Г. Титов

**ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЙ РЕГУЛИРУЕМЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД  
ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩЕГО АГРЕГАТА**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлены результаты исследования частотно-регулируемого электропривода газоперекачивающего агрегата на базе многоуровневого инвертора напряжения. Рассмотрены влияния преобразователя частоты на питающую сеть и электродвигатель. Построена модель и произведены расчеты параметров высоковольтного частотно-регулируемого электропривода, системы управления. Результаты моделирования показали высокую эффективность применения многоуровневой топологии построения силовой части высоковольтного инвертора для электроприводного газоперекачивающего агрегата.

*Ключевые слова:* газоперекачивающий агрегат, частотно-регулируемый преобразователь, многоуровневый инвертор напряжения, питающая сеть, система управления.

В настоящее время и в обозримом будущем приоритетом мирового уровня в различных областях человеческой деятельности представляется экономия энергетических ресурсов. Потребление энергетических ресурсов является одной из основных статей затрат в производственной деятельности газотранспортного предприятия.

Реконструируемые в настоящее время электроприводные компрессорные станции были введены в эксплуатацию в основном в 80-х годах прошлого века. Электротехническое и технологическое оборудование, системы автоматизации технологических процессов морально и физически устарели. Старые газоперекачивающие агрегаты имеют ограниченные возможности по регулировке их производительности.

Эти обстоятельства не только приводят к более высоким затратам на транспортировку газа, но и снижают надежность и безопасность системы.

Основной задачей при создании проектов реконструкции электроприводных компрессорных станций является повышение надежности, экономичности транспорта газа, перевод производственных объектов газопровода на более высокий уровень автоматизации, внедрение малолюдных технологий, улучшение условий труда обслуживающего персонала и снижение негативного воздействия на окружающую среду.

Проектом в большинстве случаев предусматривается замена существующих электроприводных газоперекачивающих агрегатов (ЭПА) на современные комплектные ЭПА. В состав такого агрегата входят система плавного пуска и регулирования частоты вращения ротора магнетателя, магнитный подвес роторов электродвигателя и центробежного магнетателя, агрегатная система управления. Активно применяются системы газодинамических уплотнений магнетателя, что позволяет отказаться от маслохозяйства и уменьшить эксплуатационные расходы.

В результате проекта реконструкции КС одним из основных преимуществ в области энергосберегающих технологий является применение в составе ЭПА частотно-регулируемых приводов на основе асинхронных электродвигателей и полупроводниковых преобразователей частоты. Данная система позволяет значительно снизить потребление электрической энергии КС.

Выбор в пользу технологии применения частотно-регулируемых электроприводов делается ввиду того, что данная технология является наиболее экономически эффективной при

эксплуатации магистральных газопроводов, работающих в переменных технологических режимах перекачки газа.

Кроме прямого эффекта от исключения непроизводительных затрат энергии при регулировании с использованием поворотно-направляющих аппаратов, дополнительный эффект при использовании частотно-регулируемого электропривода обеспечивается высоким значением КПД самого нагнетателя, оптимальным во всех режимах работы.

Применение частотно-регулируемого привода также позволяет уменьшить износ основного технологического оборудования КС.

ЭГПА является сложной и дорогой электромеханической системой. Технологически, транспорта газа – сложный и ответственный процесс, не допускающий остановов, простоев и аварийных ситуаций. Учитывая эти два фактора, поиск оптимальных режимов работы ЭГПА на объекте строительства или реконструкции является непростой и рискованной задачей, для решения которой не всегда есть соответствующие возможности. Учитывая эти факторы, можно сказать, что моделирование регулируемого ЭГПА на стадии проектирования является перспективным способом определения оптимальных режимов работы агрегата в заданных условиях газотранспортной системы. Это позволит во многом избежать трудностей при пусконаладке ЭГПА на объекте, уменьшить количество невынужденных остановов агрегата и нарушений работы газотранспортной системы. Моделирование также позволяет опробовать и отработать новые технические решения, без необходимости создания сложного и дорогого прототипа.

Как уже отмечалось в [1], наиболее перспективной топологией преобразователя частоты для ЭГПА на сегодняшний день является топология многоуровневого инвертора напряжения с каскадным соединением инверторных ячеек в каждой фазе.

### Состав многоуровневого инвертора напряжения

Силовая схема каскадного многоуровневого инвертора может содержать от трех до десяти инверторных ячеек (рис. 1), включенных последовательно в каждую фазу.

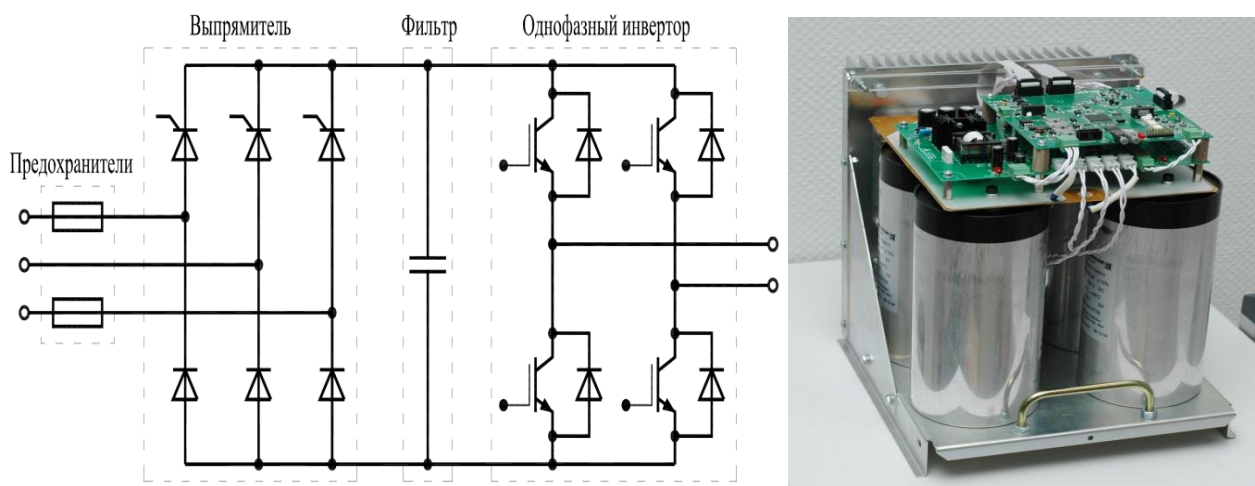


Рис. 1. Ячейка многоуровневого инвертора

Исследуемая схема для ЭГПА мощностью 9,1 МВт (см. рис. 2) содержит пятнадцать симметричных инверторных ячеек, по пять последовательно соединенных ячеек в каждой фазе. Такое подключение обеспечивает на зажимах электродвигателя линейное напряжение 5650 В. Инверторные ячейки запитываются каждая от отдельной вторичной обмотки входного многообмоточного трансформатора, соединенной в зигзаг для обеспечения необходимого

фазового сдвига для формирования уровней выходного напряжения. Входной трансформатор многоуровневого инвертора напряжением первичной обмоткой подключается к трехфазной сети переменного напряжения 10 кВ промышленной частоты 50 Гц.

Действующее напряжение каждой инверторной ячейки определяется соотношением:

$$U_{2n} = \frac{U_{л}}{k * \sqrt{3}}, \quad (1)$$

где  $k$  – количество ячеек в фазе.

Фазное напряжение на нагрузке формируется путем суммирования напряжений последовательно соединенных инверторных ячеек.

Угол сдвига вектора вторичного напряжения  $n$ -ной обмотки определяется по следующему выражению:

$$\varphi = \frac{60}{k} \cdot n_1, \quad (2)$$

где  $n_1 = 1, 2, 3, \dots, \frac{k-1}{2}$ .

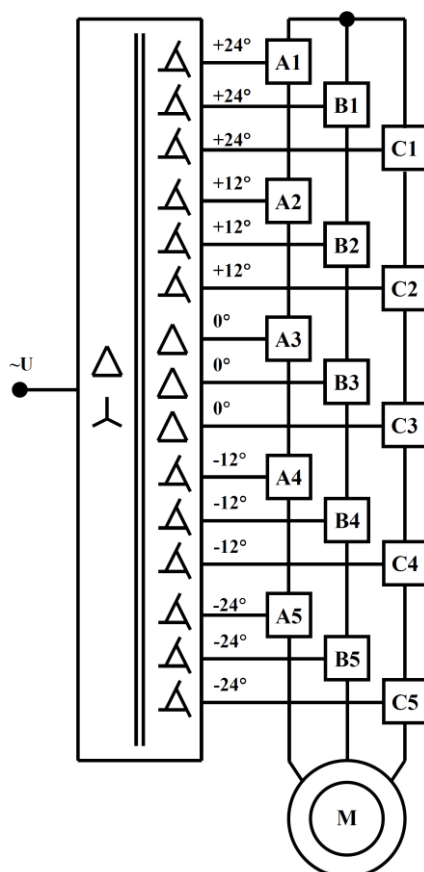


Рис. 2. Структурная схема силовой части многоуровневого инвертора напряжения

### Моделирование многоуровневого инвертора напряжения в системе MATLAB

MatLab-модель ЭГПА (рис. 3) включает следующие элементы:

- трехфазный источник синусоидального напряжения, имитирующий трехфазную промышленную сеть на напряжение 10 кВ, частотой 50 Гц при полной мощности трехфазного короткого замыкания 300 МВА (Three-Phase Power Grid);
- многообмоточный трансформатор (Multi\_Winding Transformer);
- инверторные ячейки H-bridge (A1-A5, B1-B5, C1-C5);

- блок, моделирующий резистивное сопротивление протяженной кабельной линии от преобразователя до зажимов электродвигателя (Three-Phase Cable Resistance);
- специализированный трехфазный асинхронный высокоскоростной электродвигатель мощностью 9,1 МВт на напряжение 5650 В (Asynchronous Machine);
- три блока формирования ШИМ для инверторных ячеек соответствующих фаз (PWM\_A, PWM\_B, PWM\_C).

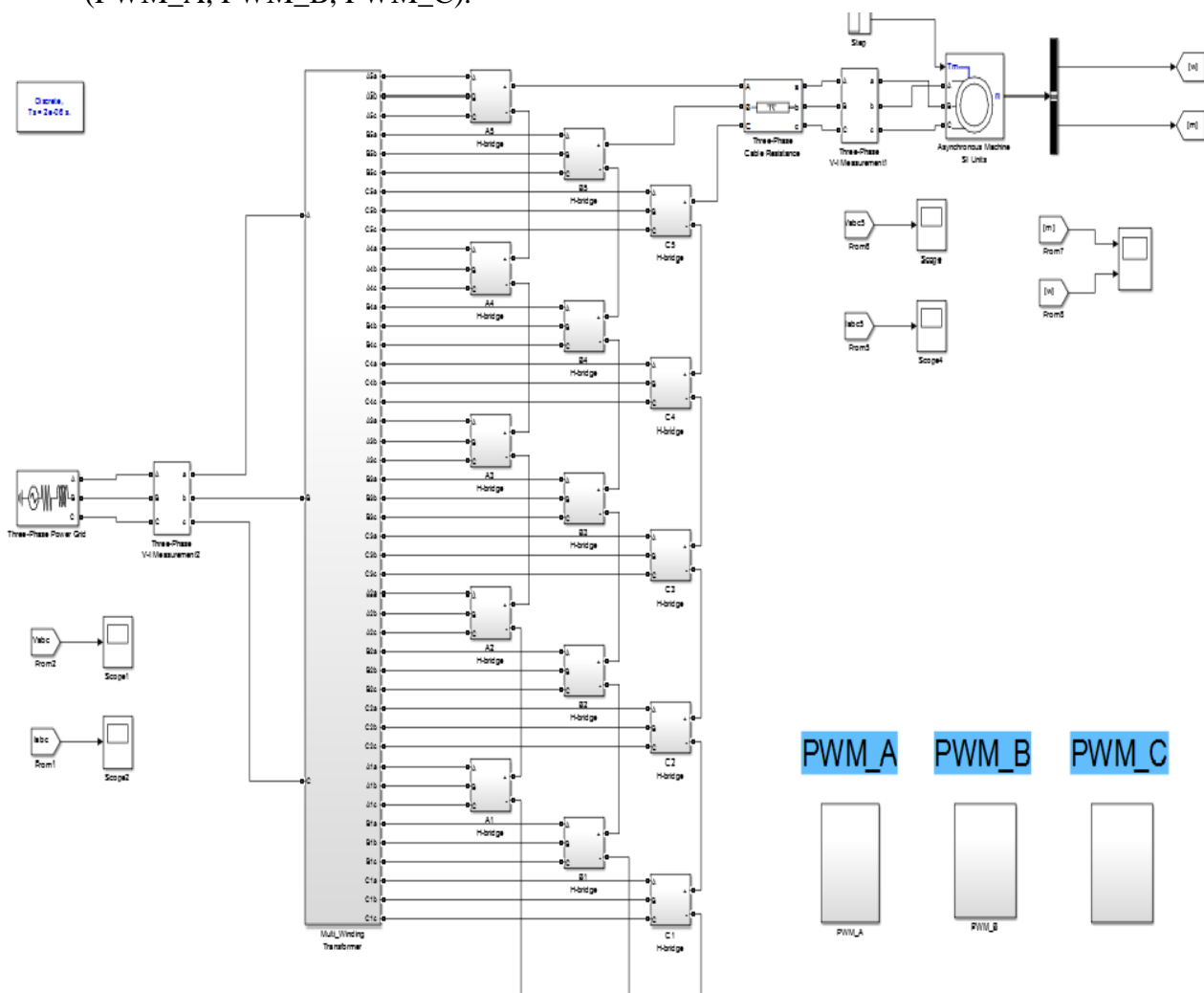


Рис. 3. MatLab-модель ЭГПА на базе многоуровневого инвертора напряжения

Многообмоточный трансформатор построен с помощью соединения стандартных блоков Zigzag Fase-Shifting Transformer с заданием необходимого фазового сдвига каждой вторичной обмотки.

MatLab-модель системы управления состоит из блока задания скорости и блока управления инвертором. Используется принцип векторного управления [2]. Система блока расчета сигналов управления инвертором состоит из регулятора скорости, регулятора потокоцепления ротора и блока вычисления задания фазных напряжений.

Регулятор скорости представляет собой ПИ-регулятор, на входы которого поступают сигналы задания скорости и сигнал обратной связи по скорости ротора электродвигателя ЭГПА.

Значения токов по продольной и поперечной осям  $I_d$  и  $I_q$  получаем при помощи блока *abc\_to\_dq Transformation*, на вход которого подаются сигналы обратной связи по фазным

токам статора и рассчитанные значения синуса и косинуса угла положения вектора потокосцепления ротора

$$I_q = \frac{2}{3} \cdot \left[ i_a \cdot \cos \theta + i_b \cdot \cos \left( \theta - \frac{2 \cdot \pi}{3} \right) + i_c \cdot \cos \left( \theta + \frac{2 \cdot \pi}{3} \right) \right], \quad (3)$$

$$I_d = \frac{2}{3} \cdot \left[ i_a \cdot \sin \theta + i_b \cdot \sin \left( \theta - \frac{2 \cdot \pi}{3} \right) + i_c \cdot \sin \left( \theta + \frac{2 \cdot \pi}{3} \right) \right].$$

Угол положения вектора потокосцепления ротора находится по выражению

$$\theta = \int (\omega_r + \omega_m) dt, \quad (4)$$

где

$$\omega_r = \frac{L_{M*} \cdot I_q}{T \cdot \Psi_r} \quad (5)$$

– скорость вращения ротора;  $\omega_m$  – механическая скорость ротора.

Токи задания рассчитываются по выражениям

$$I_{q*} = \frac{\Psi_r}{L_{M*}}, \quad (6)$$

$$I_{d*} = \frac{(L_{M*} + L'_{2*}) \cdot \Psi_r}{L_{M*} \cdot T_{e*}}.$$

Рассчитанные токи управления  $I_{d\_reg}$ ,  $I_{q\_reg}$  получаются в соответствующих блоках, представляющих собой дискретные ПИ регуляторы.

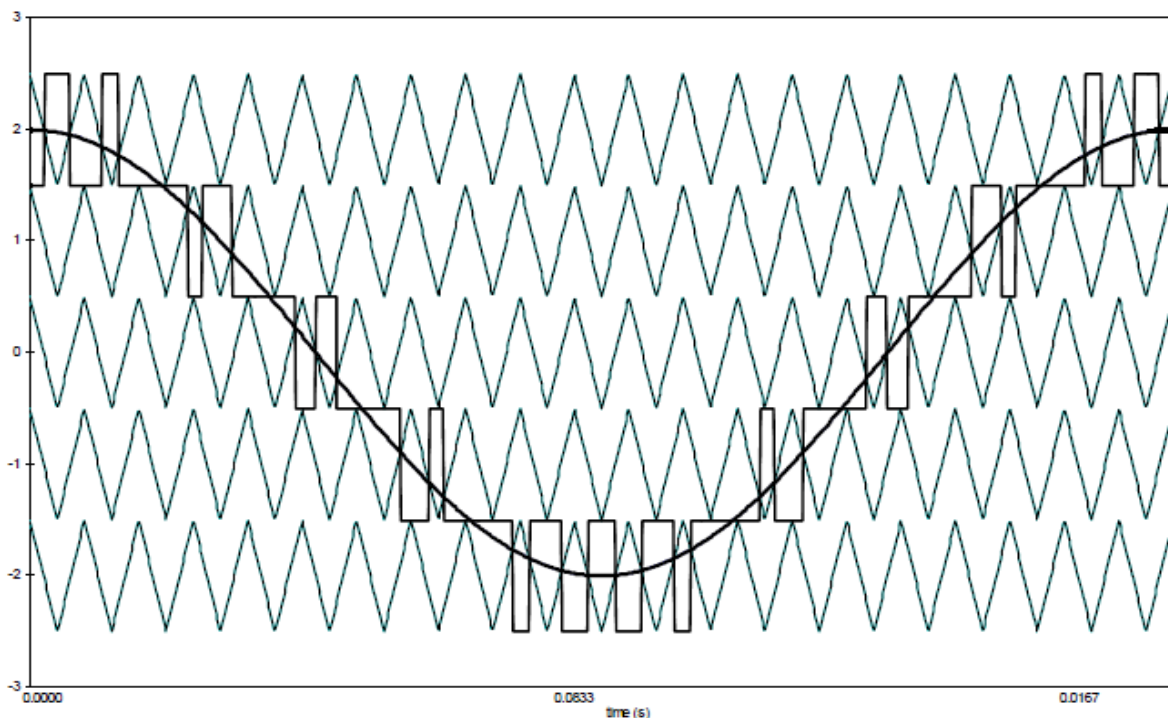


Рис. 4. Принцип формирования импульсов управления транзисторами одной фазы

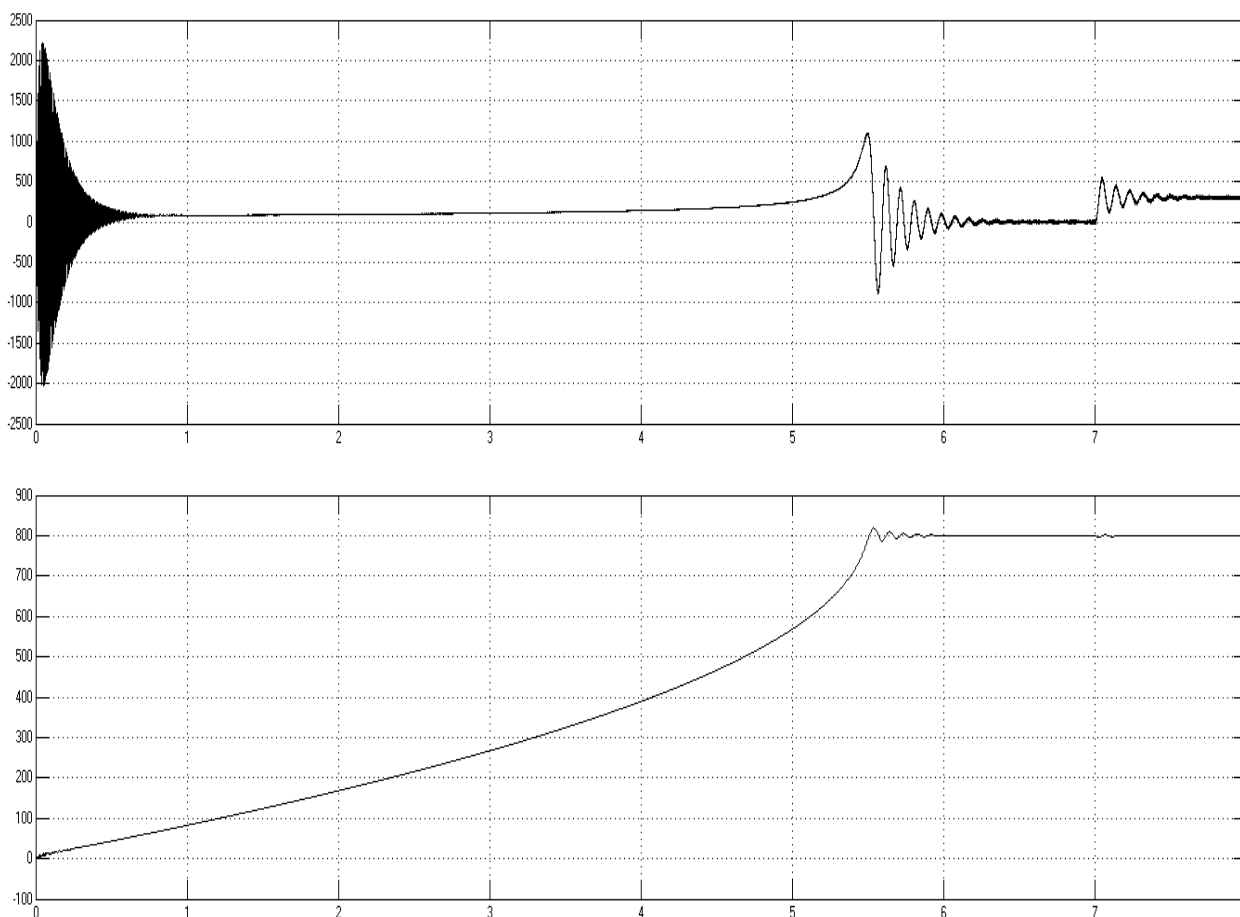
Сигналы управления инвертором рассчитываются выполнением обратного перехода от системы координат  $dq$  в  $abc$ .

$$\begin{aligned}
 u_{a\_reg} &= I_{d\_reg} \cdot \sin \theta + I_{q\_reg} \cdot \cos \theta, \\
 u_{b\_reg} &= 0.5 \cdot [(\sqrt{3} \cdot \sin \theta - \cos \theta) \cdot I_{q\_reg} - (\sin \theta + \sqrt{3} \cdot \cos \theta) \cdot I_{d\_reg}], \\
 u_{c\_reg} &= -u_{a\_reg} - u_{b\_reg}.
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

Блоки формирования и распределения импульсов управления (PWM\_A, PWM\_B, PWM\_C) представляют собой ШИМ генераторы, передающие импульсы управления транзисторами H-мостовых ячеек соответствующего уровня. Формирование импульсов управления транзисторами каждой фазы происходит сравнением пяти уровней пилообразного опорного напряжения и одной синусоидальной огибающей, заданной частоты, как показано на рис. 4.

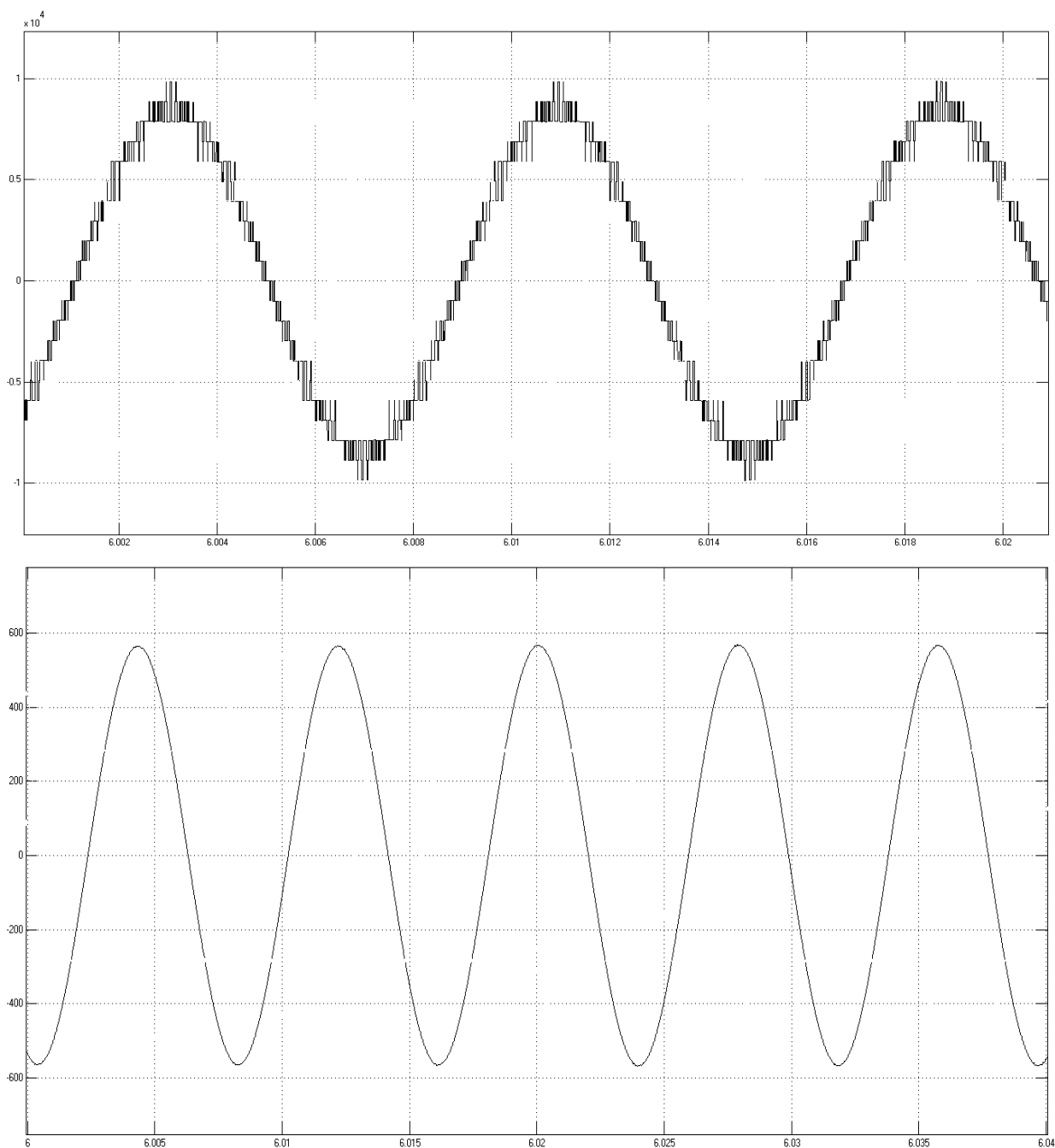
### Результат работы MatLab-модели ЭГПА

Синтезированная MatLab-модель ЭГПА позволяет в реальном времени проводить исследования статических и динамических режимов работы ЭГПА, переходных процессов, происходящих в системе. На рис. 5 представлены осциллограммы электромагнитного момента на валу ЭГПА и скорости вращения ротора при разгоне электродвигателя до номинальной скорости и набросе статической нагрузки.



**Рис. 5. Осциллограммы электромагнитного момента (вверху) и скорости вращения вала (внизу) электродвигателя ЭГПА при пуске, разгоне до номинальной скорости и набросе статической нагрузки**

На рис. 6 показаны осциллограммы напряжения и тока на выходе многоуровневого инвертора напряжения.



**Рис. 6. Осциллограммы напряжения (вверху) и тока (внизу) на выходе многоуровневого инвертора напряжения**

### **Выводы**

Многоуровневый инвертор напряжения на сегодняшний день является наиболее перспективной топологией построения силовой части высоковольтных преобразователей частоты для регулируемого электропривода.

На стадии рабочего проектирования электроприводных компрессорных станций необходимо уделять внимание построению компьютерной модели разрабатываемой системы и анализа возможных установившихся и переходных режимов работы агрегатов.

В среде MatLAB/Simulink разработана компьютерная модель регулируемого ЭГПА мощностью 9,1 МВт на базе многоуровневого инвертора напряжения. Данная модель может быть использована для анализа режимов работы станции на стадии разработки проектной документации.

Разработана система векторного управления ЭГПА, обеспечивающая высокие энергетические характеристики системы, построение интеллектуальной системы электроснабжения, а также позволяющая реализовывать концепцию малолюдных технологий на компрессорной станции.

#### Библиографический список

1. Садиков, Д.Г. Выбор перспективной топологии построения преобразователя частоты для высоковольтного электродвигателя электроприводного газоперекачивающего агрегата // Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2014. №1.
2. Колпаков, А. Алгоритмы управления многоуровневыми преобразователями / А. Колпаков, Е. Карташев // Силовая электроника. 2009. №2. С. 57–65.
3. Энергоснабжение и автоматизация энергооборудования компрессорных станций [Текст]: монография / А.Ф. Пужайло [и др.]; под ред. О.В. Крюкова. – Н. Новгород: Вектор ТиС, 2011. – 664 с.

*Дата поступления  
в редакцию 15.12.2014*

**L.S. Lomakina, D.G. Sadikov, V.G. Titov**

#### ENERGY EFFICIENT SPEED DRIVE GAS PUMPING UNIT

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

**Purpose:** The building a mathematical and computer model of electrically driven gas pumping unit.

**Design / methodology / approach:** Determination of the optimal topology of the power part the frequency converter.

**Results:** Developed a computer model of electrically driven gas pumping unit.

**Restrictions/values of research:** Defined harmonics distortion of current and voltage mains power supply.

**Novelty/value:** The resulting based on the developing a computer model of electrically driven gas pumping unit

*Key words:* gas pumping unit, frequency converter, multilevel voltage converter, mains power supply, control system.