

# ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И АВТОМАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 621.314

## РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ОРГАНОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ ВОДО-ВОДЯНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕАКТОРОВ

В.А. Ажнакин, П.А. Бородин,  
Р.Н. Ельшин, С.С. Захарова  
(ФГУП «НПП ВНИИЭМ»)

*Рассматриваются особенности построения преобразователей частоты электроприводов механизмов органов регулирования системы управления и защиты водо-водяных энергетических реакторов (ВВЭР), реализованные методы повышения энергетических и эксплуатационных показателей, надёжности, безопасности, эффективности управления линейными шаговыми и синхронными реактивными двигателями.*

**Ключевые слова:** преобразователь частоты, автономный инвертор напряжения, широтно-импульсная модуляция, линейный шаговый двигатель, синхронный реактивный двигатель.

Система управления и защиты (СУЗ) реактора обеспечивает пуск реактора, выход на заданный уровень мощности, регулирование мощности реактора и последующий его останов (рис. 1) посредством введения в активную зону реактора или выведения из неё стержней управления (органов регулирования) [1]. Для перемещения органа регулирования (ОР) вдоль активной зоны используются электропривод ОР СУЗ. Электродвигатели исполнительных механизмов электроприводов ОР СУЗ устанавливаются над реактором.

Для СУЗ реакторов ВВЭР-440 3-го блока Кольской АЭС (электропривод СУЗ с синхронным реактивным двигателем (СРД) типа РД42-4РВ) и ВВЭР-1000 5-го блока Нововоронежской АЭС (электропривод СУЗ с линейным шаговым четырёхфазным униполярным двигателем ЛШД) были разработаны преобразователи частоты на IGBT-транзисторах на базе автономных инвер-

торов напряжения (АИН) с широтно-импульсным управлением с частотой коммутации 2,4 кГц [2]. Преобразователи частоты обеспечивают питание электродвигателей приводов ОР СУЗ. На рис. 2 представлена упрощённая функциональная схема преобразователей.

На рис. 3 показаны структурно-функциональные схемы разработанных преобразователей. Блок управления (БУ) преобразователя содержит три контроллера, выполненных на базе микроконтроллера TMS320F2812 фирмы Texas Instruments (КР1 – рабочий 1-й, КД – диагностический, КР2 – рабочий 2-й). БУ обрабатывает сигналы управления и информацию о режимах работы блоков силовых по правилу «два из трёх» и формирует соответствующие данному режиму сигналы управления для силовой части. Силовая часть преобразователя содержит два блока (БС1 – силовой блок 1-й, БС2 – силовой блок 2-й).

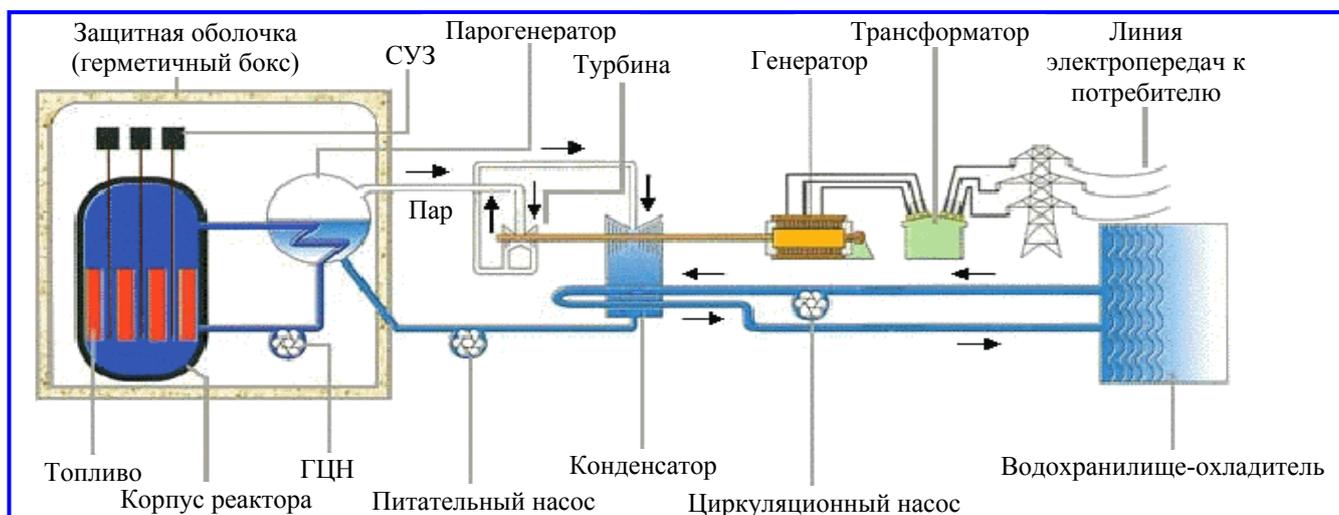


Рис. 1. Схема работы реактора ВВЭР

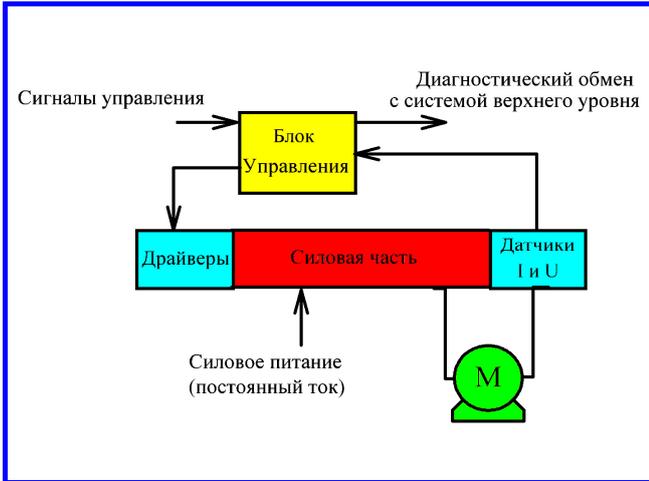


Рис. 2. Упрощённая функциональная схема преобразователя

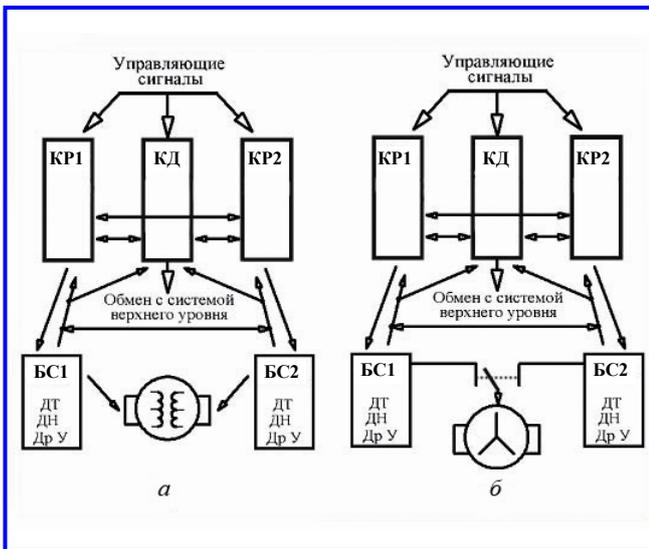


Рис. 3. Структурно-функциональная схема преобразователя для управления:  
а – ЛШД; б – СРД

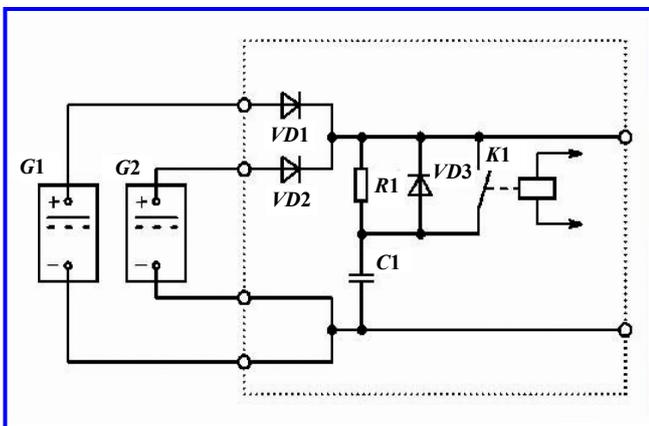


Рис. 4. Схема питания силовых цепей преобразователей частоты

В состав каждого блока силового БС входят датчики тока и напряжения (ДТ, ДН), драйверы управления (Др У), IGBT модули и промежуточное звено постоянного тока.

Схема питания силовых цепей преобразователей представлена на рис. 4. Питание преобразователей осуществляется от источников питания постоянного тока  $G1$  и  $G2$  напряжением 310 В (Нововоронежская АЭС) или 220 В (Кольская АЭС), объединённых диодным силовым сумматором  $VD1, VD2$ .

На выходе диодного сумматора установлено звено постоянного тока для поглощения энергии, накопленной индуктивностью фазы. Для ограничения тока заряда конденсатора  $C1$  в схеме предусмотрен резистор  $R1$ . После (в конце) заряда конденсатора  $C1$  резистор  $R1$  шунтируется контактным аппаратом (реле)  $K1$ . Диод  $VD3$  шунтирует резистор  $R1$  до включения реле  $K1$ . Напряжение питания силовых цепей преобразователя измеряется датчиком напряжения, информация с которого обрабатывается блоком управления.

На рис. 5 представлена схема автономного инвертора, лежащая в основе преобразователя частоты привода ОР СУЗ на Кольской АЭС, где в качестве исполнительного механизма привода ОР СУЗ используется синхронный реактивный двигатель РД42-4РВ. В состав преобразователя входят два преобразователя с возможностью автоматического подключения резервного преобразователя к двигателю привода при неисправности рабочего преобразователя без изменения режима работы двигателя. Для обеспечения фиксации положения ОР требуется протекание тока по двум фазам обмоток статора СРД. Один из верхних транзисторов ( $T1, T3, T5$ ) всё время находится в открытом состоянии, а один из нижних транзисторов ( $T2, T4, T6$ ) другой фазы коммутируется с необходимым коэффициентом заполнения. При какой-либо неисправности в одной из фаз обмоток статора СРД, по которым выполнялась фиксация положения ОР, преобразователь имеет возможность максимально быстро сформировать ток в третьей фазе, ранее незадействованной в фиксации.

Последовательно в каждой фазе установлен датчик тока, позволяющий обеспечить обратную связь по току. В реализованном преобразователе трёхфазный мост представляет собой интегрированный модуль. Непосредственно на входные зажимы модуля (шина (+) и шина (-)) устанавливается снабберный конденсатор.

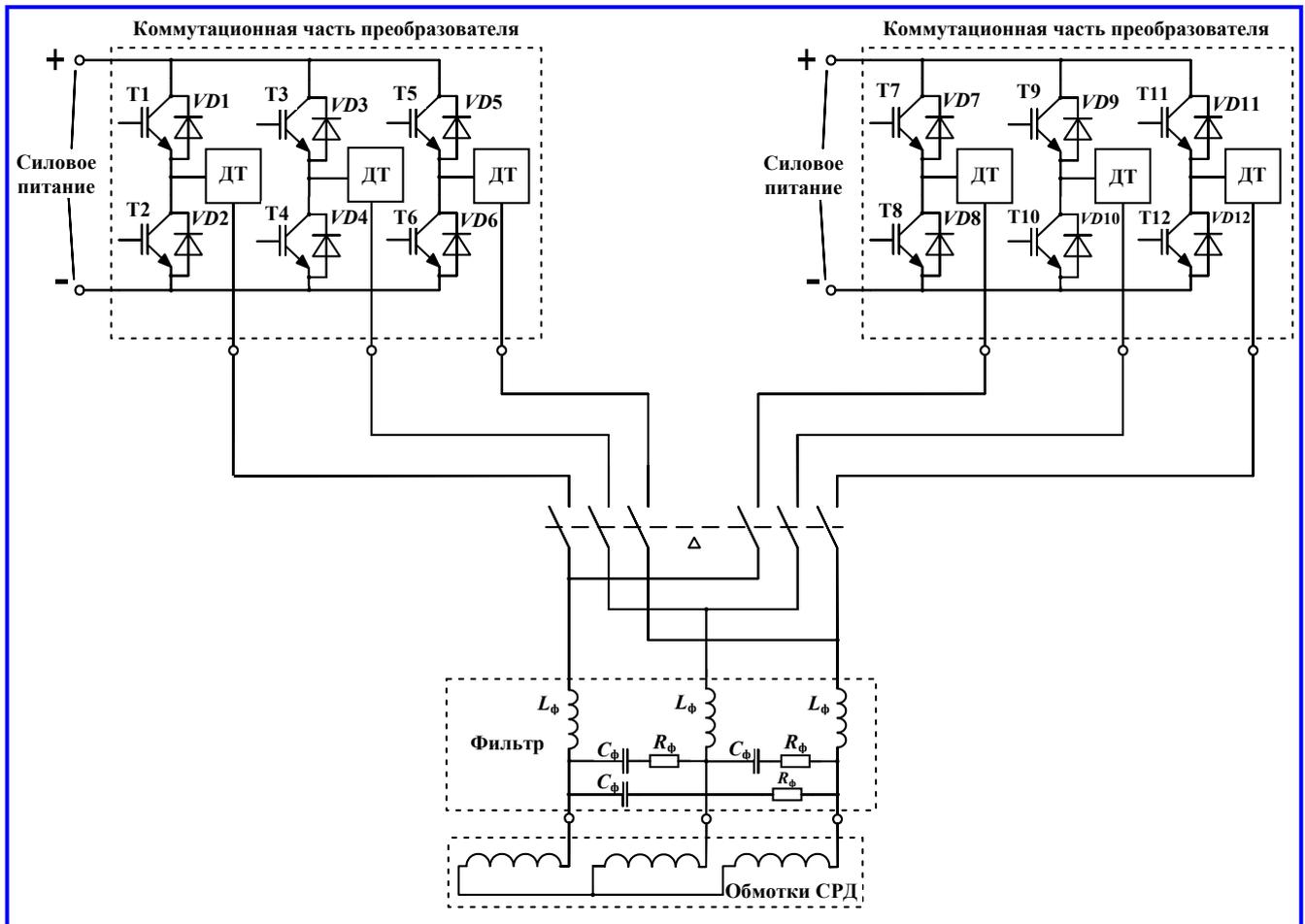


Рис. 5. Трёхфазная мостовая схема питания электродвигателя привода ОР СУЗ Кольской АЭС

В режиме перемещения ОР электродвигатель должен вращаться с заданной частотой, для чего на выходе преобразователя формируется синусоидальное напряжение с частотой 1,04 Гц. Ток фаз двигателя по форме близок к синусоиде. Управление силовыми ключами инвертора напряжения осуществляется с помощью векторной ШИМ. Можно выделить следующие достоинства, присущие векторной ШИМ в сравнении с классической симметричной синусоидальной ШИМ:

- улучшение использования напряжения звена постоянного тока примерно на 15%;
- в отличие от симметричной синусоидальной ШИМ, где на один период несущей частоты ШИМ приходится шесть переключений ключей, при векторной ШИМ на один период несущей частоты ШИМ приходится четыре переключения. В связи с этим при переходе к векторной ШИМ потери в ключах снижаются на 30%.

Значение тока статора двигателя в режимах фиксации положения и перемещения ОР СУЗ

формируется автоматическим регулятором тока, реализуемым микропроцессорными контроллерами.

Используя мгновенные значения токов фаз, полученные от датчиков тока, контроллер производит расчёт модуля отображающего вектора тока  $I_{от}$  по формулам [3]:

$$I_{от} = \sqrt{I_a^2 + I_\beta^2} ;$$

$$I_a = (2i_a - i_b - i_c)/3 ;$$

$$I_\beta = (i_b - i_c)/\sqrt{3} ,$$

где  $i_a, i_b, i_c$  – мгновенные значения токов фаз двигателя.

Далее вычисленное и итоговое заданные значения отображающего вектора тока передаются в программную модель ПИД-регулятора тока. Процессор TMS320F2812 имеет встроенный модуль ПИД-регулятора. На выходе регулятора

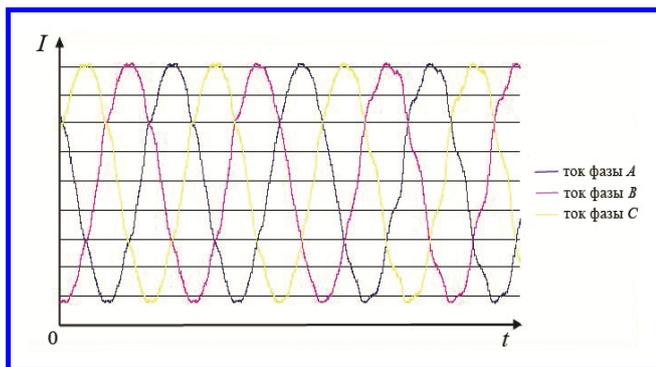


Рис.6. Диаграммы токов фаз двигателя

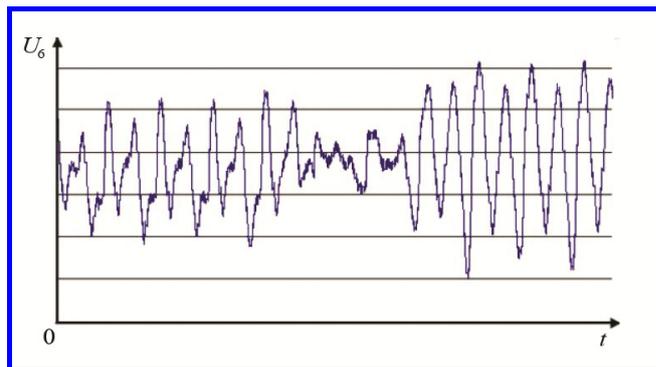


Рис. 7. Диаграмма 6-й гармоники модуля выходного напряжения

рассчитывается вектор выходного напряжения инвертора. Вектор выходного напряжения инвертора формируется с использованием блока векторной ШИМ контроллера.

Разработанный преобразователь обеспечивает определение наличия или отсутствия механической нагрузки на валу двигателя (сцепление стержня органа регулирования с валом привода) [4]. На рис. 6 показаны диаграммы токов фаз двигателя в момент подхвата двигателем механической нагрузки.

Свободный ход (без нагрузки) штанги, соединённой с ОР, составляет 20 – 30 мм. Для определения наличия механической нагрузки на валу двигателя в данном преобразователе применяется математический аппарат быстрого преобразо-

вания Фурье (БПФ) и рекурсивный фильтр второго порядка.

С использованием БПФ были произведены исследования модуля выходного напряжения преобразователя. Спектральный анализ проекции показал, что существенно меняется только амплитуда 6-й гармоники до момента подхвата нагрузки и после.

Для программной обработки 6-й гармоники использован рекурсивный фильтр, форма сигнала на выходе которого показана на рис. 7. На диаграмме виден момент подхвата нагрузки (средняя часть диаграммы). Учитывая относительное изменение амплитудных значений 6-й гармоники во времени, удаётся определить был ли произведён подхват нагрузки.

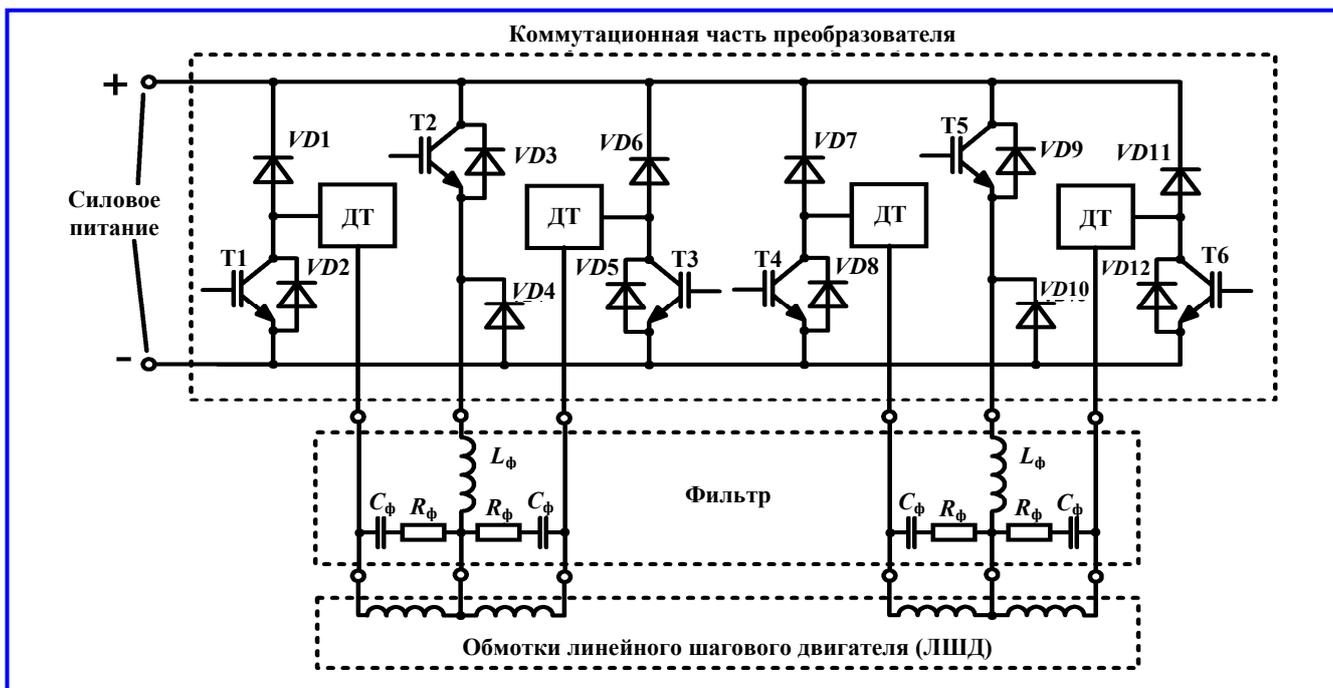


Рис. 8. Схема питания электродвигателя привода ОР СУЗ Нововоронежской АЭС

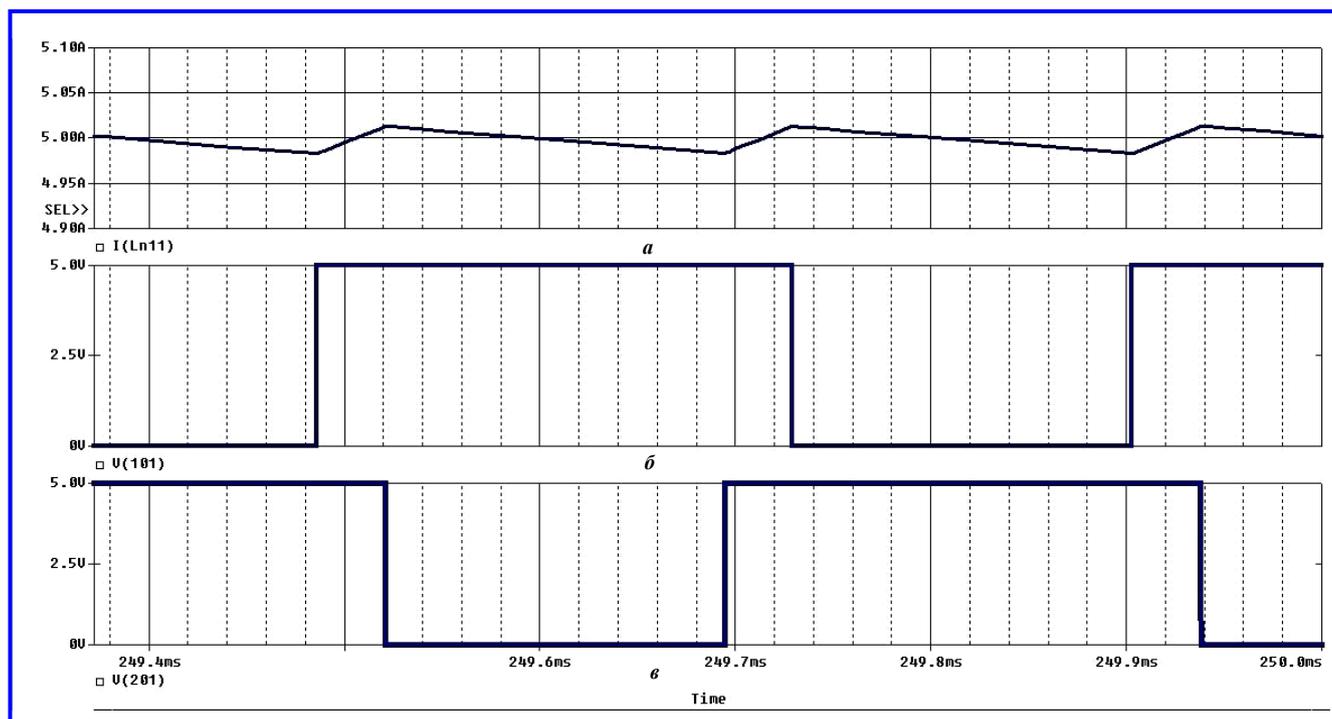


Рис. 9. Диаграмма: *a* – тока нагрузки; *б* – управляющего сигнала верхнего ключа; *в* – управляющего сигнала нижнего ключа

Мгновенные значения токов фаз двигателя обрабатываются программным механизмом определения неисправности цепи фазы и возникновения механического затирания. В основе данного программного механизма лежит математический аппарат фильтра Калмана.

На рис. 8 приведена схема питания электродвигателя привода ОР СУЗ Нововоронежской АЭС, имеющая в своей основе два полууправляемых моста. В качестве исполнительного механизма привода ОР СУЗ на данной станции используется линейный шаговый двигатель (ЛШД). Линейная скорость перемещения ОР может быть установлена двумя значениями: 25 и 50 мм/с. Перемещение ОР осуществляется при формировании импульсов тока заданной амплитуды и длительности в обмотках ЛШД в определённой последовательности. Изменение скорости перемещения обеспечивается изменением длительности перемещающих импульсов и частоты их следования. Для формирования режима фиксации требуется протекание постоянного тока заданной величины по двум фазам ЛШД. При этом четыре транзистора работают по алгоритму, позволяющему снизить значение тока потребления.

Диаграмма управляющих сигналов ШИМ, входящих на верхний и соответствующий нижний ключ, показана на рис. 9.

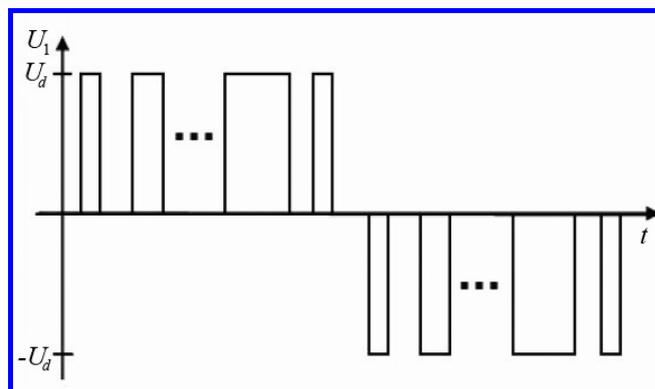


Рис. 10. Выходное напряжение АИН с ШИМ

Транзистор с чоппером представляет собой интегральный модуль. На зажимы «коллектор» и «эмиттер» каждого модуля устанавливается снабберный конденсатор. Представленные схемы питания электродвигателей ОР СУЗ позволяют снизить энергопотребление (снижение величины входного тока) преобразователя за счёт использования энергии, накопленной в индуктивности фаз нагрузки при широтно-импульсном регулировании тока нагрузки. Во время паузы на периоде ШИМ один транзистор остается открытым (см. рис. 9). Обмотка (обмотки) шунтируется диодом и оставшимся в работе транзистором, что обеспечивает значительное снижение величины  $di/dt$ . Таким образом, энергия, накопленная

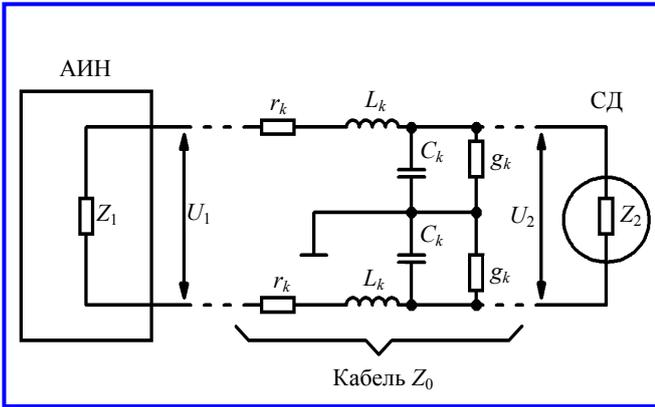


Рис. 11. Цепь соединения АИН с СД (эквивалентная схема элементарного участка кабеля)

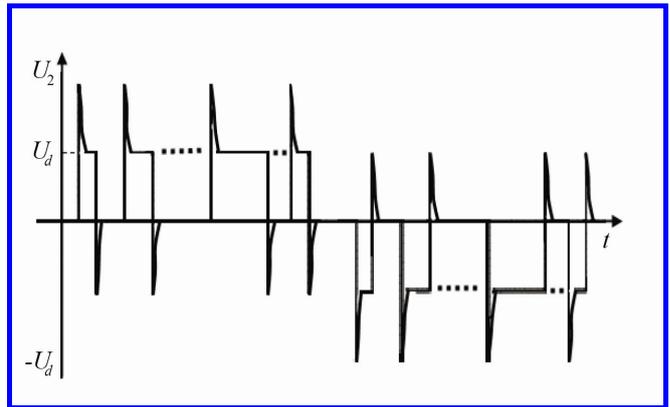


Рис. 12. Напряжение на зажимах СД при подключении «длинным кабелем»

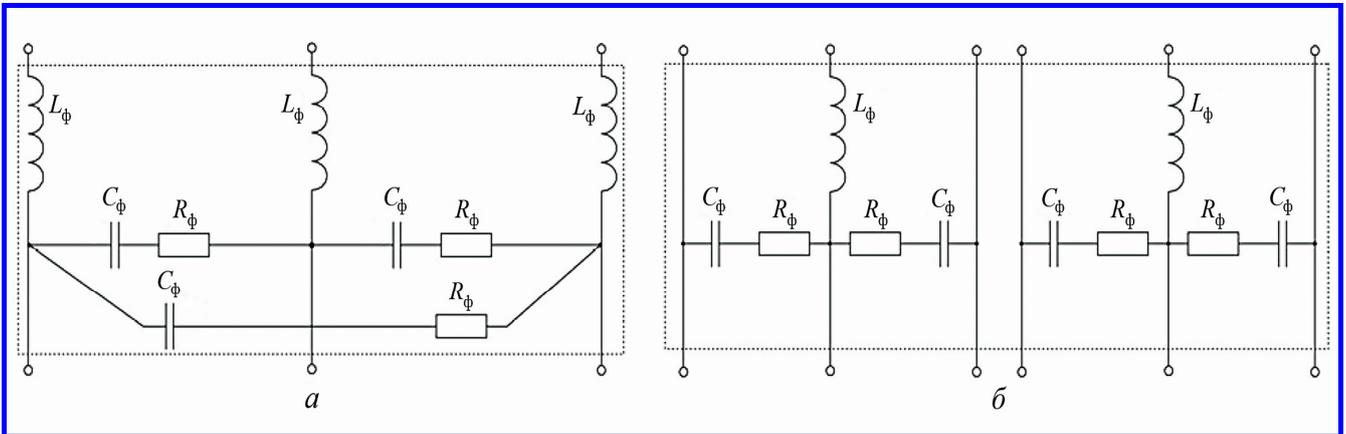


Рис. 13. Схема фильтра для: а – СРД; б – ЛШД

индуктивностью фазы за время импульса ШИМ, не отдаётся в сеть, а используется для формирования тока в этой фазе.

Достоинства транзисторных IGBT-инверторов напряжения с широтно-импульсным управлением в регулируемом электроприводе сочетаются с рядом проблем, одной из которых является проблема «длинного кабеля», соединяющего обмотки двигателя с выходом АИН.

Выходное напряжение  $U_1$  АИН с ШИМ представляет собой высокочастотную последовательность прямоугольных импульсов различной полярности и длительности с одинаковой амплитудой  $U_d$  – величины постоянного напряжения на входе АИН (рис. 10). Крутизна фронта  $t_f$  импульсов напряжения определяется скоростью переключения силовых ключей АИН и при использовании различных полупроводниковых приборов составляет от 0,05 до 10 мкс.

Существенно более высокое быстродействие IGBT, являющееся преимуществом для реализации

высокочастотной ШИМ и минимизации потерь энергии в АИН и двигателе, негативно проявляется в протекании переходных процессов в цепи АИН – соединительный кабель – двигатель (рис. 11) на интервалах времени фронта  $t_f$ .

Прохождение импульсного сигнала с крутым фронтом вызывает волновые процессы в кабеле, приводящие к появлению перенапряжений на зажимах двигателя, в пределе до двукратного значения номинального напряжения питания двигателя (рис. 12).

Для снижения перенапряжений применены LC-фильтры, устанавливаемые на выходе преобразователей. По существу LC-фильтр, в данном случае, работает как фильтр низких частот, т. е. более высокие частоты будут поглощены фильтром и не передадутся в нагрузку.

Определение параметров элементов фильтра осуществлено расчётно-экспериментальным путём на основании величины перенапряжения, потерь в фильтре, а также массогабаритных показате-

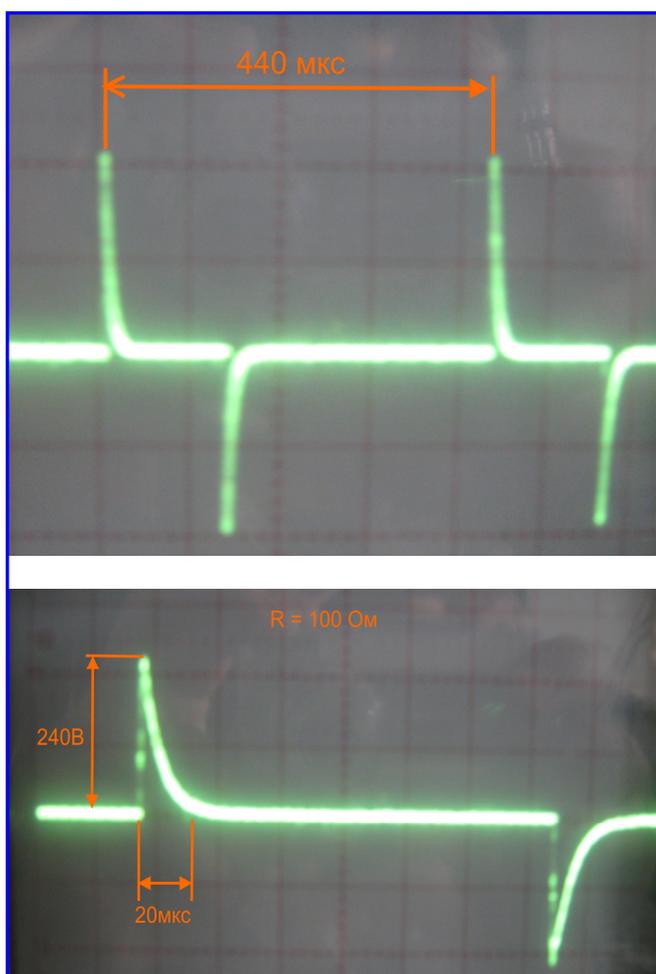


Рис. 14. Диаграммы тока через резистор

телей. Активные потери LC-фильтра оценивались как выделяемая мощность на резисторе  $R_\phi$  (см. рис. 13). На рис. 14 представлены диаграммы тока, протекающего через резистор  $R_\phi$ , находящийся между фазами А и В фильтра, в режиме фиксации на фазах А и В.

Действующее значение тока, протекающего через резистор,

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^t \left(\frac{U}{R}\right)^2 dt} = 0,426 \text{ А.}$$

Тогда мощность, выделяемая в резисторе,

$$P = I^2 R_\phi = 18,182 \text{ Вт.}$$

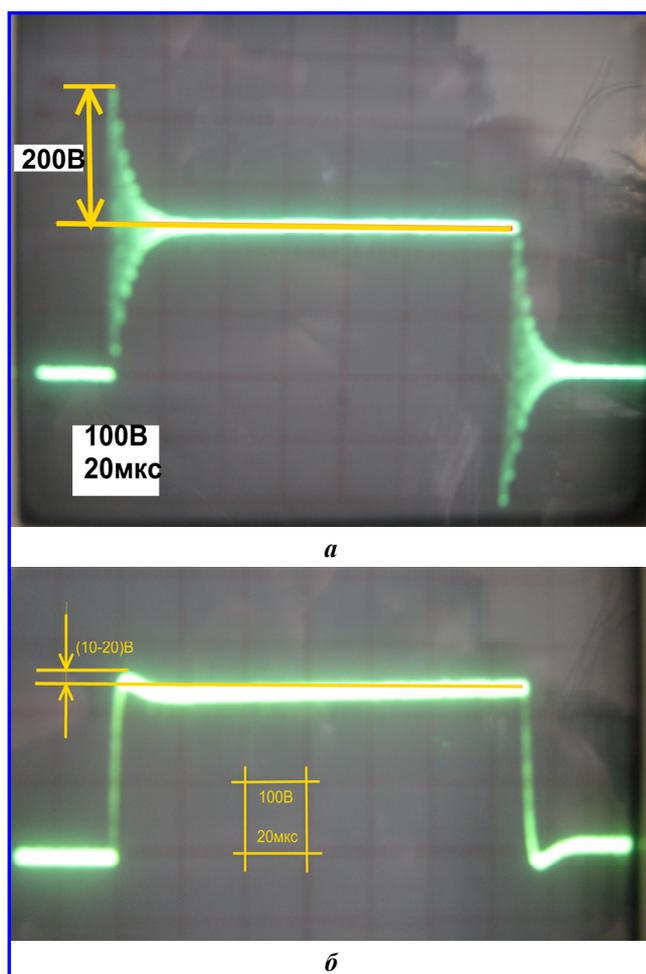


Рис. 15. Осциллограммы напряжения на зажимах статора: *а* – без выходного фильтра; *б* – с выходным фильтром

На рис. 15 приведены осциллограммы напряжения на зажимах статора без фильтра и с фильтром.

В результате установки выходного фильтра уровень перенапряжения снизился с 200 до 20 В.

Рассмотренные в данной статье преобразователи с соответствующими блоками фильтра входят в состав шкафов силового управления третьей серии ШСУЗН и ШСУЗП, поставляемых на 5-й энергоблок Нововоронежской АЭС и 3-й энергоблок Кольской АЭС соответственно.

### Литература

1. Ольшевский Ю. Н. Перспективы развития систем управления и защиты ядерных энергетических реакторов типа ВВЭР-1000 / Ю. Н. Ольшевский, Г. А. Жемчужов, А. О. Мирошник [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М. : НПП ВНИИЭМ, 2001. – Т. 100. – С. 188 – 196.

2. Мелешин В. И. Транзисторная преобразовательная техника / В. И. Мелешин. – М. : Техносфера, 2005. – 632 с.
3. Важнов И. В. Переходные процессы в машинах переменного тока / И. В. Важнов. – Л. : Энергия, 1980. – 256 с.
4. Миллер Е. В. Основы теории электропривода : учеб. пособие для вузов / Е. В. Миллер. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Росвузиздат, 1963. – 344 с. : ил.

*Поступила в редакцию 01.04.2011*

*Владимир Александрович Ажнакин, аспирант, инженер.  
Павел Александрович Бородин, аспирант, инженер.  
Роман Николаевич Ельшин, начальник лаборатории.  
Светлана Сергеевна Захарова, инженер.  
Т. (495) 366-22-00, e-mail: lab2610@mail.ru.*