УДК621.313

Установка для экспериментальных исследований многофазных электромеханических систем

В.М.ТЕРЕШКИН[1]✉, **Д.А.ГРИШИН**[2], **И.А.МАКУЛОВ**[2]
[1] *Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия*
[2] *ООО «Газ-Проект-Инжиниринг», Уфа, Россия*

Предметом данного исследования является экспериментальная установка, созданная для изучения характеристик и алгоритмов управления многофазными двигателями с числом рабочих фаз от 3 до 8, соединенных звездой, треугольником, либо другим способом, позволяющим протекать фазным токам, создающим вращающееся электромагнитное поле. Установка состоит из двух отдельных самостоятельных блоков: контроллера, или человеко-машинного интерфейса управления, и силового инверторного модуля (преобразователя). Контроллер соединен с преобразователем двухпроводным полудуплексным интерфейсом (RS485) по информационному протоколу обмена Modbus RTU. В состав установки также входят синхронные двигатели с числом фаз 3, 5, 7.

С помощью разработанной установки можно проводить экспериментальные исследования многофазных двигателей при реализации различных алгоритмов управления преобразователя, реализующего векторную широтно-импульсную модуляцию. Временные затраты реализации алгоритмов управления минимальны. По результатам экспериментов можно проводить сравнительный анализ многофазных двигателей по энергетической эффективности, по уровню вибраций электромагнитного происхождения, по динамическим параметрам. Возможна экспериментальная оценка нагрузки ключей преобразователя.

Созданная установка является эффективным инструментом для проверки достоверности результатов теоретических исследований электромеханических систем на основе многофазных двигателей.

***Ключевые слова*:** установка для экспериментальных исследований; многофазный двигатель; многофазный преобразователь; сенсорная панель контроллера

***Как цитировать эту статью*:** Терешкин В.М. Установка для экспериментальных исследований многофазных электромеханических систем / В.М.Терешкин, Д.А.Гришин, И.А.Макулов // Записки Горного института. 2019. Т. 240. С. 678-685. DOI: 10.31897/PMI.2019.6.678

Введение. В значительном количестве публикаций, посвященных исследованию электромеханических систем на основе многофазных двигателей, подчеркивается их перспективность в тяговом электроприводе, в частности, в электромобилях.

Например, в работах [1-3, 11] рассмотрены теоретические принципы векторного управления на основе прямого управления моментом (DTC) в сравнении с классическим способом полеориентированного управления (FOC), при реализации которого применяется синусная широтно-импульсная модуляция (SPWM). В работах не ставится вопрос о возможности применения векторного управления многофазными электрическими машинами. Однако уже существует и эксплуатируется электропривод постоянного тока на основе четырехфазного асинхронного двигателя (с уверенностью можно предположить, что с векторным управлением), который установлен на отечественном электровозе «Гранит». Электропривод разработан инженерами фирмы Сименс. На каждой секции электровоза установлено четыре асинхронных двигателя. Мощность каждого двигателя 1,2 МВт, количество пар полюсов двигателя $p = 4$, преобразователь имеет два диапазона частот – от 0 до 60 и от 60 до 120 Гц. Под каждый диапазон предусмотрена определенная схема обмотки, которая устанавливается блоком автоматики в зависимости от частоты. Тяговая энерговооруженность одного двухсекционного локомотива составляет 9,6 МВт.

В работах [4-10] приводятся исследования и сравнительный анализ 3-, 4-, 5-, 7-фазных систем. Однако многие теоретические результаты нуждаются в экспериментальной проработке, чтобы исключить их недостоверность.

Многие зарубежные теоретические работы посвящены исследованию электромеханических систем на основе многофазных двигателей [12-20]. В работах установлено, что с увеличением количества фаз двигателя уменьшается фазный ток, снижается уровень вибраций, повышается надежность электропривода. Однако в этих работах нет сравнительного анализа режимов работы ключей преобразователей, т.е. недостаточно представлена составляющая результатов исследований, которую можно получить только с помощью экспериментов.

DOI: *10.31897/PMI.2019.6.678*

а *б*

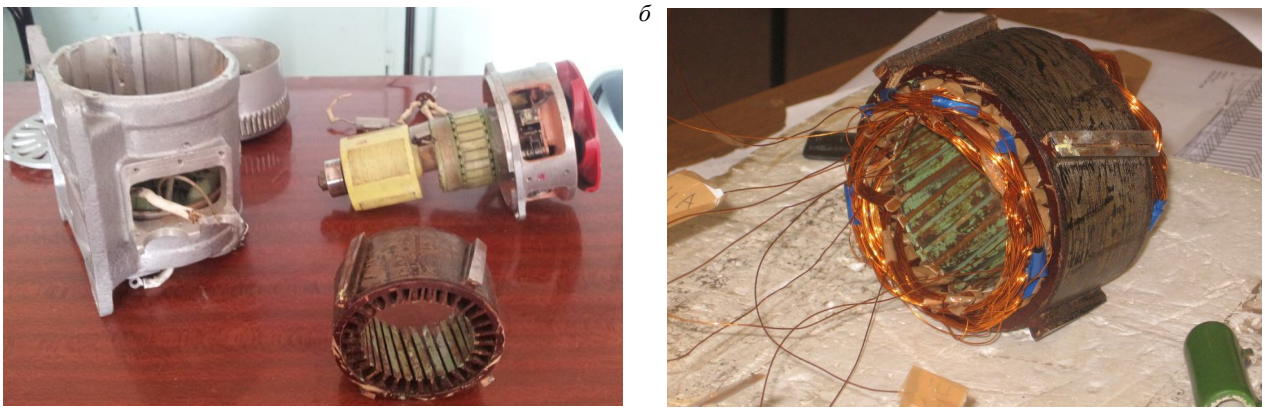


Рис.1. Электрическая машина (*а*) и статор (*б*) пятифазного двигателя макетного образца

Большинство работ имеет теоретическую направленность и не содержит результатов экспериментальных исследований. В качестве иллюстраций приводятся временные диаграммы, полученные с помощью инженерных программ, чаще всего MATLAB, которые, по существу, являются вариациями теоретических исследований.

Данная работа посвящена описанию установки и макетных образцов, созданных для проведения экспериментальных исследований и сравнительного анализа 3-, 4-, 5-, 6-, 7- и 8-фазных электромеханических систем.

Постановка проблемы. Для проведения экспериментальных исследований и сравнительного анализа многофазных электроприводов необходим электротехнический комплекс, включающий в себя: многофазные электрические машины, преобразователь, формирующий многофазное симметричное напряжение, программируемый контроллер системы управления, измерительные устройства.

На рис.1, *а* представлена электрическая машина, на базе которой созданы 3-, 5- и 7-фазные синхронные двигатели с возбуждением от постоянных магнитов, а на рис.1, *б* представлен статор 5-фазного синхронного двигателя. Также в аналогичный пакет статора с числом зубцов $Z = 30$ уложены 3-фазная и 7-фазная обмотки. Для пространственной симметрии 7-фазной обмотки необходимо $Z = 28$, поэтому макетный образец 7-фазного двигателя имеет пространственную несимметрию рабочей обмотки. Этот фактор необходимо учитывать при анализе результатов экспериментальных исследований.

Числа витков в фазе макетных образцов имеют следующие значения: $W_{ф3} = 150$, $W_{ф5} = 90$, $W_{ф7} = 64$, т.е. выполняются соотношения $W_{ф5} = 3/5(W_{ф3})$, $W_{Ф7} = 3/7W_{ф3}$. Значения входных напряжений преобразователей должны удовлетворять соотношениям: $U_{вх5} = 3/5U_{вх3}$, $U_{вх7} = 3/7U_{вх3}$, чтобы обеспечить равенство фазных токов. С увеличением количества фаз машина становится более низковольтной, а потребляемый входной ток преобразователя возрастает пропорционально увеличению количества фаз двигателя. Расход меди остается неизменным.

Если при использовании того же пакета статора числа витков в фазе будут удовлетворять соотношению $W_{ф3} = W_{ф5} = W_{ф7}$, то соотношения фазных токов принимают вид: $I_{Ф5} = 3/5I_{ф3}$, $I_{ф7} = 3/7I_{ф3}$. При этом входные напряжения преобразователей должны иметь равные значения. С увеличением количества фаз двигателя при равенстве чисел витков в фазе, машина становится более слаботочной, а потребляемый входной ток преобразователя остается неизменным. Расход меди также не изменяется.

Теоретическое обоснование этих выводов существует, а для подтверждения их достоверности требуется экспериментальная установка и макетные образцы двигателей.

Наиболее совершенные для сравнительного анализа многофазные обмотки макетных образцов двигателей должны иметь одинаковое значение q, например, $q_3 = q_5 = q_7 = 1$. При этом количество зубцов статора Z (если $2p = 4$) соответственно определяется: $Z_3 = 12$, $Z_5 = 20$, $Z_7 = 28$. Количество зубцов статора возрастает, при этом выполняются соотношения: $Z_5/Z_3 = 3/5$, $Z_7/Z_3 = 7/3$.

Установка позволяет проводить экспериментальные исследования с двигателями, у которых число фаз равно 3, 4, 5, 6, 7, 8. Для корректного сравнительного анализа результатов экспериментов необходимо, чтобы пакеты статоров многофазных двигателей отличались только числом

DOI: 10.31897/PMI.2019.6.678

зубцов, причем выполнялись соотношения: $Z_3 = 12$, $Z_4 = 16$, $Z_5 = 20$, $Z_6 = 24$, $Z_7 = 28$, $Z_8 = 32$. Числа зубцов приведены для обмоток, у которых $2p = 4$, $q = 1$.

Основная цель создания установки – это обеспечение возможности экспериментальных исследований алгоритмов векторной широтно-импульсной модуляции многофазных двигателей и проверка результатов теоретических исследований.

В работе [6], например, была исследована 4-фазная обмотка при формировании результирующего вектора напряжения. Однако явных преимуществ перед трехфазной обмоткой не обнаружено. Возможно, экспериментальные исследования оценят работу ключей преобразователя, энергетические характеристики комплекса (входная мощность преобразователя – механическая мощность на валу), приемистость двигателя (допустимую скорость увеличения частоты преобразователя) и помогут выявить преимущества 4-фазной машины. Например, макетный образец пятифазного синхронного двигателя допускал дискретное увеличение частоты преобразователя с 1 до 3 Гц, а при скачке с 1 до 4 Гц поле «ускользало» и двигатель выпадал из синхронизма. Эксперимент проводился без обратной связи и системы управления, оценивался алгоритм десятиступенчатой коммутации (ШИМ 95 %).

Установка позволит проводить экспериментальные исследования двигателей по методикам, направленным на изучение особенностей многофазных машин.

Основная необходимость создания универсальной установки для экспериментальных исследований многофазных электромеханических систем продиктована следующими обстоятельствами.

При реализации шестиступенчатой коммутации и векторной широтно-импульсной модуляции в трехфазной системе формируется $2^3 = 8$ векторов, 6 активных и 2 нулевых. Применение нулевых векторов легло в основу реализации SVPWM и DTC. Возможен только один алгоритм формирования симметричного трехфазного напряжения с временным чередованием фаз ABC.

При реализации векторной широтно-импульсной модуляции в пятифазной системе возможно формирование $2^5 = 32$ векторов, 30 активных и 2 нулевых. Нулевые векторы также могут быть применены для реализации SVPWM и DTC. Тридцать активных векторов (или 30 «аккордов» в 5 ключей) могут сформировать три варианта симметричного пятифазного напряжения с различными формами фазного напряжения [5]. Существует три алгоритма управления преобразователя, каждый из которых формирует симметричное пятифазное напряжение. Кроме этого, возможно формирование временной последовательности чередования фаз ACEBD для пятифазной обмотки с пространственным чередованием фаз ABCDE. Каждый из трех алгоритмов в сочетании с временной последовательностью чередования фаз ACEBD формирует частоту вращения результирующего вектора, которая в три раза превышает частоту преобразователя. Рабочим становится результирующий вектор третьей гармоники, а пятифазная машина является двухскоростной. При реализации алгоритмов управления преобразователя, которые увеличивают частоту вращения результирующего вектора напряжения, возрастает число коммутируемых ключей за период, а частота коммутации снижается. Эффект получен теоретически, проверен экспериментально и его необходимо исследовать.

При реализации векторной широтно-импульсной модуляции в семифазной системе возможно формирование $2^7 = 128$ векторов, 126 активных и 2 нулевых. Нулевые векторы также могут быть применены для реализации SVPWM и DTC, 126 активных векторов могут сформировать девять вариантов симметричного семифазного напряжения с различными формами фазного напряжения. Существует девять алгоритмов управления преобразователя (каждый алгоритм реализует четырнадцатиступенчатую последовательность коммутаций). Каждый из девяти алгоритмов формирует симметричное семифазное напряжение. Возможно формирование временных последовательностей чередования фаз ACEGBDF и ADGCFBE семифазной обмотки с пространственным чередованием фаз ABCDEFG. Существует алгоритм, который в сочетании с временной последовательностью чередования фаз ACEGBDF формирует частоту вращения результирующего вектора, превышающую в пять раз частоту преобразователя, рабочим становится результирующий вектор пятой гармоники. Существует алгоритм, который в сочетании с временной последовательностью чередования фаз ADGCFBE формирует частоту вращения результирующего вектора, превышающую в три раза частоту преобразователя, рабочим становится результирующий вектор третьей гармоники. Потенциально семифазная машина является трехскоростной. При реализации алгоритмов управления преобразователя, которые увеличивают частоту вращения

DOI: 10.31897/PMI.2019.6.678

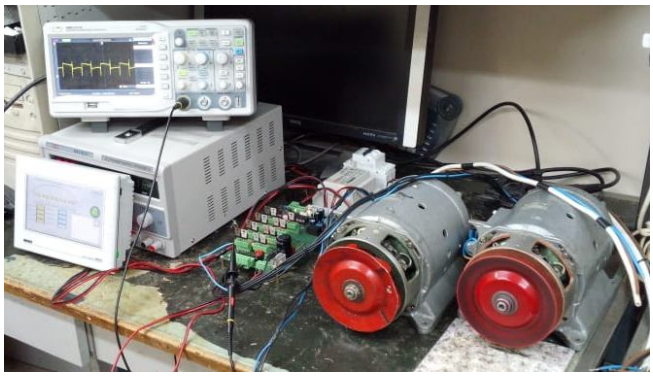
результирующего вектора напряжения, возрастает число коммутируемых ключей за период, а частота коммутации снижается. Этот эффект также требует экспериментальных исследований.

Активные векторы могут формироваться «аккордами» в шесть, пять, четыре, три и два ключа для семифазной системы, а также в четыре, три, два ключа для пятифазной системы. При этом формируется симметричное семифазное и пятифазное напряжение. Частично эти вопросы рассмотрены в работах [5, 10], но нуждаются в дальнейшей экспериментальной проработке.

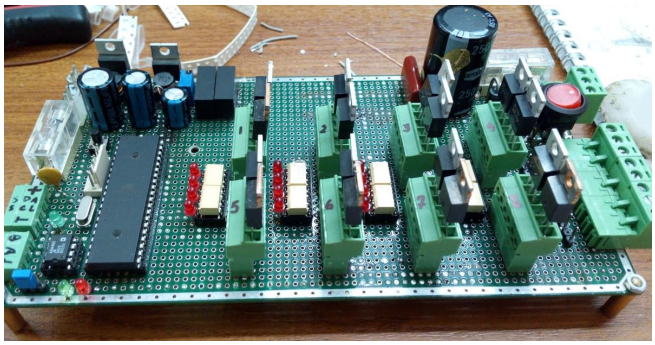
Необходимы исследования пульсаций напряжения общей точки многофазной обмотки относительно нуля преобразователя. Теоретически очевидно, что с увеличением числа фаз амплитуда пульсаций снижается, а их частота возрастает. При увеличении числа фаз форма фазного напряжения стремится к меандру, амплитуда пульсаций напряжения – к нулю, а частота пульсаций – к бесконечности. Практически, уже при количестве фаз 11, этот процесс входит в насыщение.

Работоспособность 11-фазной системы обеспечивают 22 ключа, которые формируют $2^{11} = 2048$ векторов, 2 из которых нулевые и 2046 – активные. Каждый из 2046 активных векторов формируется аккордом в 11 ключей, но также существуют активные векторы, которые формируются аккордами в 10, 9, 8 ключей и т.д. Теоретически 11-фазная машина потенциально пятискоростная и на одной частоте преобразователя (базовой частоте) имеет пять скоростей по 1-й, 3-й, 5-й, 7-й, 9-й гармоникам. Все эти вопросы теоретически проработаны и нуждаются в экспериментальных исследованиях. Установка для экспериментальных исследований многофазных электромеханических систем поможет разрешить многие вопросы при создании электроприводов на основе многофазных двигателей.

а



б



в

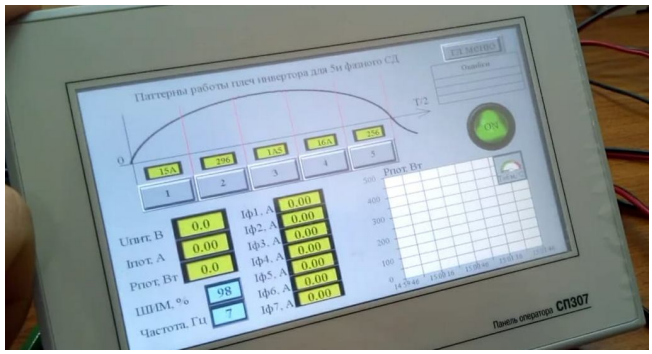
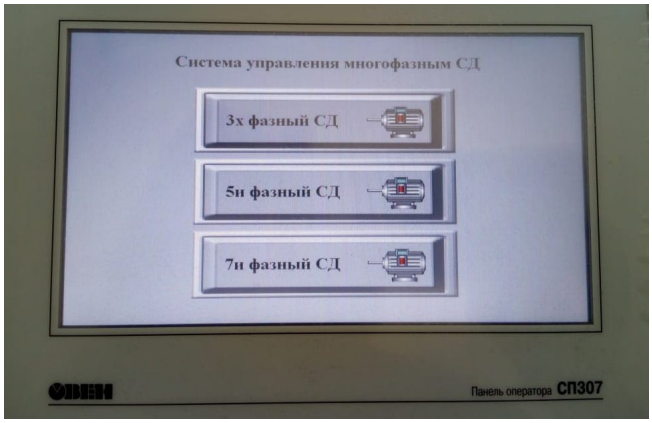


Рис.2. Установка для экспериментальных исследований (*а*), отладочная плата преобразователя (*б*), контроллер (сенсорная панель для управления режимами пятифазного преобразователя) (*в*)

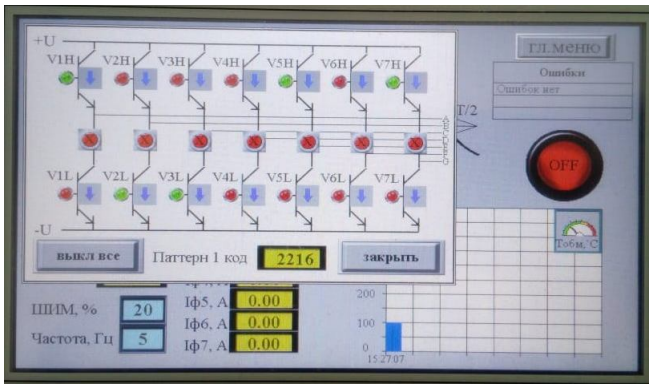
Методология. На рис.2 показаны фото установки для проведения экспериментальных исследований многофазных электромеханических систем с количеством фаз 3, 4, 5, 6, 7, 8. Представлены пятифазный и трехфазный синхронные двигатели, которые подключаются к преобразователю.

Преобразователь представляет собой плату, которая разделена на слаботочную управляющую и сильноточную силовую часть. Слаботочная часть выполнена с использование микроконтроллера ATmega644, имеет собственный источник питания и интерфейс связи с HMI (контроллер), а также колодку I2C для подключения внешних датчиков. Силовая часть представляет собой восемь пар комплементарных MOSFET-ключей, расположенных в съемных колодках для быстрой замены. Силовая часть имеет отдельный вход для подключения мощного источника питания до 100 В. Обе части полностью гальванически развязаны друг от друга. Силовая часть управляется с помощью оптопар и специальных DC/DC преобразователей, осуществляющих питание затворов ключей в момент их открытия.

а



б



в

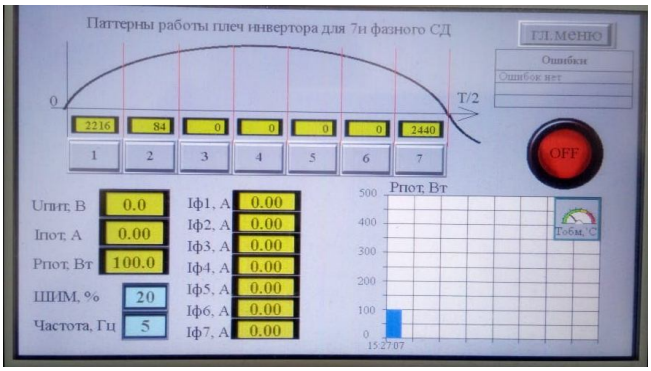


Рис.3. Сенсорная панель контроллера: *а*– выбор многофазной системы; *б* – семифазный преобразователь; *в* – управление режимами семифазного преобразователя

Микропрограмма реализует интерфейс обмена командами Modbus, а также заданный алгоритм работы ключей, пуск, остановку, калибровку и формирование данных с датчиков и ошибок. Также программно проверяется полученный алгоритм на предмет открытия обоих ключей в плече для предотвращения сквозного тока. Силовая часть может быть экстренно отключена выключателем на плате. Обе части преобразователя защищены плавкими предохранителями

В качестве контроллера HMI в данной установке выбрана сенсорная панель оператора СП307 ОВЕН. Она позволяет с помощью элементов визуализации и modbus-команд управлять преобразователем в реальном времени. Проект, загруженный в панель оператора, позволяет управлять 3-, 5- и 7-фазными двигателями, используя меню и соответствующие окна настройки. При необходимости проект может быть модифицирован под конкретные двигатели. Добавлены команды, датчики и графики (тренды).

Для изменения алгоритмов управления используются всплывающие окна со схематическим изображением плеч инвертора. Полуволна формируемого напряжения инвертора разбита на аккорды (паттерны). Путем нажатия на верхний либо нижний ключ плеча нужной фазы в соответствующем паттерне происходит алгоритмизация работы. Для формирования «интервала тишины» можно выключить оба ключа в плече (фазе). Для исключения сквозного тока предотвращается случайное включение в паттерне обоих ключей плеча. Для записи и последующего воспроизведения каждый паттерн имеет свой код.

Поля конфигурирования режима работы преобразователя позволяют изменять скважность импульсов (ШИМ), предельную частоту, ускорение и дискретность ускорения преобразователя.

При запуске преобразователь формирует переменное напряжение начальной частотой 1Гц и с заданными ускорением и дискретностью начинает линейно увеличивать частоту до заданной предельной частоты. Для нового цикла разгона необходимо остановить преобразователь.

Соединен HMI с преобразователем двухпроводным полудуплексным интерфейсом RS485, через который реализован информационный протокол обмена Modbus RTU.

На рис.3 показана сенсорная панель контроллера, который обеспечивает реализацию алгоритмов. В варианте многофазной системы на рис.3, *а* (например, семифазная система) касанием изображения «7-фазный СД» на экране сенсорной панели появляется изображение (рис.3, *б*). Чтобы задать требуемый алгоритм работы преобразователя, который сформирует 14 «аккордов» в 7 ключей (или 14 векторов, формирующих векторную широтно-импульсную модуляцию), достаточно касания изображения ключей на экране сенсорной панели (рис.3, *б*) в определенной последовательности. Например, для реализации алгоритма:

DOI: *10.31897/PMI.2019.6.678*

1) 1,6,10,14,3,7,11($A_+C_E_G_B_+D_+$ F_+); 2)1,6,10,14,4,7,11($A_+C_E_G_B_D_+$ F_+);
3) 1,5,10,14,4,7,11($A_+C_+E_G_B_D_+$ F_+); 4) 1,5,10,14,4,8,11($A_+C_+E_G_B_D_F_+$);
5) 1,5,9,14,4,8,11($A_+C_+E_+G_B_D_F_+$); 6) 1,5,9,14,4,8,12($A_+C_+E_+G_B_D_F_$);
7) 1,5,9,13,4,8,12($A_+C_+E_+G_+B_D_F_$); 8) 2,5,9,13,4,8,12($A_C_+E_+G_+B_D_F_$);
9) 2,5,9,13,3,8,12($A_C_+E_+G_+B_+D_F_$); 10) 2,6,9,13,3,8,12($A_C_E_+G_+B_+D_F_$);
11) 2,6,9,13,3,7,12($A_C_E_+G_+B_+D_+F_$); 12) 2,6,10,13,3,7,12($A_C_E_G_+B_+D_+F_$);
13)2,6,10,13,3,7,11($A_C_E_G_+B_+D_+F_+$); 14)2,6,10,14,3,7,11($A_C_E_G_B_+D_+F_+$),

необходимо коснуться ключей в ответствующей последовательности. Между цифрами, приведенными в алгоритме, и ключами, изображенными на рис.3, *б*, имеет место соотношение 1-1H, 2-1L, 3-2H, 4-2L, 5-3H, 6-3L, 7-4H, 8-4L, 9-5H, 10-5L, 11-6H, 12-6L, 13-7H, 14-7L. Формирование алгоритма занимает не более 1 мин.

Сенсорная панель контроллера может принимать вид, представленный на рис.3, *в*. В этом режиме сенсорная панель позволяет настраивать режим работы преобразователя, например можно выставить режим, при котором частота преобразователя будет возрастать на 1 Гц за 1 с или иной динамический режим, который необходимо исследовать.

Форма фазного напряжения, которая задается алгоритмом управления, фиксируется цифровым осциллографом.

Развитие программного обеспечения контроллера позволит формировать нулевые векторы различной длительности и на экране осциллографа можно будет наблюдать форму фазного напряжения при реализации SVPWM с нулевым вектором, например при использовании следующих алгоритмов управления:

• алгоритм SVPWM для 5-фазной системы

2,4,6,8,10; 1,4,6,7,9; 1,4,6,8,9; 1,3,5,7,9; 1,4,6,8,9; 1,4,6,7,9; 2,4,6,8,10; 1,3,6,8,9; 1,4,6,8,9; 1,3,5,7,9; 1,4,6,8,9; 1,3,6,8,9; 2,4,6,8,10; 1,3,6,8,9; 1,3,6,8,10; 1,3,5,7,9; 1,3,6,8,10; 1,3,6,8,9; 2,4,6,8,10; 1,3,5,8,10; 1,3,6,8,10; 1,3,5,7,9; 1,3,6,8,10; 1,3,5,8,10; 2,4,6,8,10; 1,3,5,8,10; 2,3,5,8,10; 1,3,5,7,9; 2,3,5,8,10; 1,3,5,8,10; 2,4,6,8,10; 2,3,5,7,10; 2,3,5,8,10; 1,3,5,7,9; 2,3,5,8,10; 2,3,5,7,10; 2,4,6,8,10; 2,3,5,7,10; 2,4,5,7,10; 1,3,5,7,9; 2,4,5,7,10; 2,3,5,7,10; 2,4,6,8,10; 2,4,5,7,9; 2,4,5,7,10; 1,3,5,7,9; 2,4,5,7,10; 2,4,5,7,9; 2,4,6,8,10; 2,4,5,7,9; 2,4,6,7,9; 1,3,5,7,9; 2,4,6,7,9; 2,4,5,7,9; 2,4,6,8,10; 1,4,6,7,9; 2,4,6,7,9; 1,3,5,7,9; 2,4,6,7,9; 1,4,6,7,9; 2,4,6,8,10; 1,4,6,7,9; 1,4,6,8,9; 1,3,5,7,9; 1,4,6,8,9; 1,4,6,7,9; 2,4,6,8,10;

• алгоритм SVPWM для 3-фазной системы

2,4,6; 1,4,5; 1,4,6; 1,3,5; 1,4,6; 1,4,5; 2,4,6; 1,3,6; 1,4,6; 1,3,5; 1,4,6; 1,3,6; 2,4,6; 1,3,6; 2,3,6; 1,3,5; 2,3,6; 1,3,6; 2,4,6; 2,3,5; 2,3,6; 1,3,5; 2,3,6; 2,3,5; 2,4,6; 2,3,5; 2,4,5; 1,3,5; 2,4,5; 2,3,5; 2,4,6; 1,4,5; 2,4,5; 1,3,5; 2,4,5; 1,4,5; 2,4,6; 1,4,5; 1,4,6; 1,3,5; 1,4,6; 1,4,5; 2,4,6.

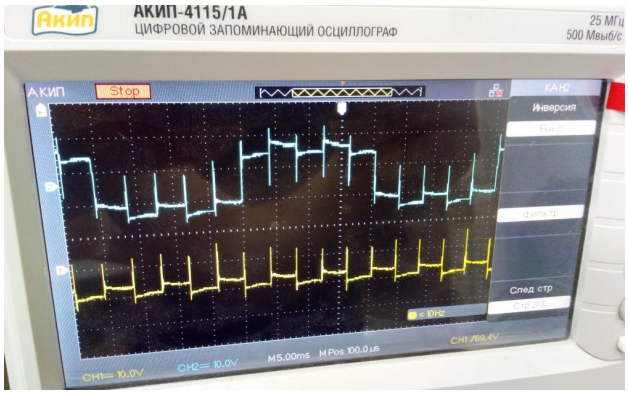
Можно измерить пульсацию напряжения между общей точкой многофазной обмотки и нулем преобразователя и убедиться, что с увеличением числа фаз обмотки частота пульсаций возрастает, а амплитуда пульсаций снижается. Например, для трехфазной обмотки частота пульсаций – это частота третьей гармоники, для пятифазной обмотки – это частота пятой гармоники, а для семифазной обмотки частота пульсаций превышает частоту преобразователя (базовую частоту) в семь раз.

На рис.4 приведены временные диаграммы пульсаций напряжения общей точки обмотки относительно нуля преобразователя для пятифазного и трехфазного двигателей.

Если обмотка имеет четное число фаз, то амплитуда пульсации равна нулю. Возможно, этот фактор стал главным при выборе именно 4-фазного асинхронного двигателя для локомотива. Пульсация равна нулю, например, у пятифазной обмотки, если симметричное пятифазное напряжение формируется «аккордами» в четыре ключа. Временная диаграмма данного режима показана на рис.5.

Обсуждение. Результаты экспериментов, полученные с помощью созданной установки, позволят провести сравнительный анализ и оценить ожидаемые преимущества многофазных

а



б

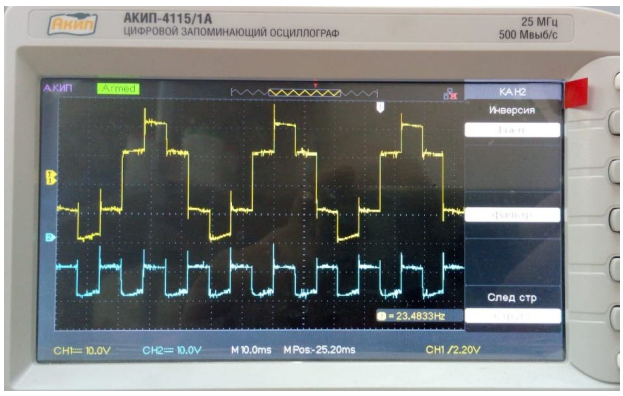


Рис.4. Пульсация напряжения общей точки относительно нуля преобразователя: *а* – пятифазного двигателя, *б* – трехфазного двигателя

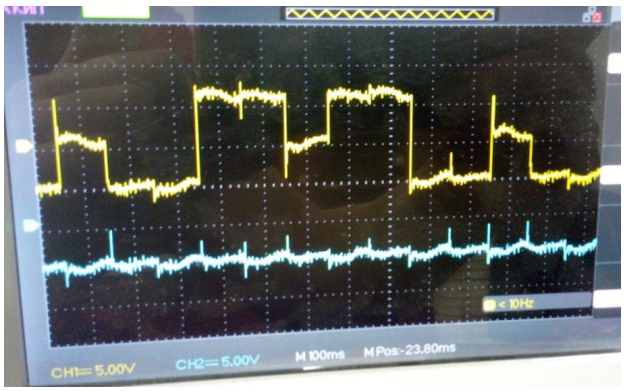


Рис.5. Пульсация напряжения общей точки пятифазного двигателя при коммутации в четыре ключа

электроприводов, например по вибрационным свойствам и энергетическим характеристикам, исследовать новые режимы работы электрической машины, которые невозможны у трехфазной машины, а именно режимы изменения временной последовательности чередования фаз.

Исследование многофазных электромеханических систем потребует исследования десятков алгоритмов работы преобразователя. Созданная установка позволяет реализовывать созданные алгоритмы с минимальными затратами времени по упрощенной технологии с помощью касаний изображений ключей на сенсорной панели.

Установка может быть усовершенствована в направлении расширения функциональных возможностей, а также повышения объективности сравнительного анализа многофазных систем. Для этого необходимы двигатели с пакетами статоров, которые отличаются только количеством зубцов, а также модернизация контроллера на программном уровне. В результате модернизации на экране сенсорной панели появится большее количество схем преобразователя, а на универсальной отладочной плате преобразователя – большее количество ключей, формирующих многофазное напряжение. Также появится возможность реализации алгоритмов с применением нулевых векторов.

Заключение. Создана установка для проведения экспериментальных исследований многофазных электромеханических систем (количество фаз – 3, 5, 7). Установка позволяет реализовывать различные алгоритмы управления преобразователем, выявляя новые качества многофазных электромеханических систем, а также проверять результаты теоретических исследований на достоверность.

Основные области применения установки:

• диагностика вибраций электромагнитного происхождения и влияние числа фаз двигателя на его вибрационные (шумовые) характеристики;

• сравнительный анализ механических характеристик двигателей с различным количеством фаз.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Козярук А.Е.* Прямое управление моментом в электроприводе переменного тока машин и механизмов горного производства / СПГГИ, СПб, 2008. 99 с.

2. *Козярук А.Е.* Современные эффективные электроприводы производственных и транспортных механизмов // Электротехника. 2019. № 3. С. 33-37.

3. *Рудаков В.В.* Системы управления электроприводов. Прямое управление моментом в электроприводе переменного тока / В.В.Рудаков, А.Е.Козярук; СПГГИ, СПб. 2007. 75 с.

4. *Терешкин В.М.* Аналитический метод оценки вибраций электромагнитного происхождения в семифазной машине переменного тока // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2019. № 1. С. 61-69 .

DOI: *10.31897/PMI.2019.6.678*

5. *Терешкин В.М.* Исследование алгоритмов работы пятифазного преобразователя в режиме векторной широтно-импульсной модуляции / В.М.Терешкин, Д.А.Гришин // Электротехника. 2017. № 2. С. 46-51.

6. *Терешкин В.М*. Определение гармонического состава результирующего тока четырехфазной симметричной обмотки электрической машины // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. № 3. С. 212-219.

7. *Терешкин В.М*. Перспективы применения многофазных машин переменного тока / В.М.Терешкин, Д.А.Гришин, И.А.Макулов // Электроника и электрооборудование транспорта. 2017. № 1. С. 19-26.

8. *Терешкин В.М*. Сравнительный анализ эффективности трехфазной и пятифазной вентильных синхронных машин / В.М.Терешкин, Д.А.Гришин, И.А.Макулов // Электротехника. 2018. № 5. С. 60-67.

9. *Терешкин В.М*. Теоретическое обоснование возможности снижения вибраций электромагнитного происхождения в пятифазной машине переменного тока по сравнению с трехфазной машиной // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. № 4. С. 229-239.

10. *Терешкин В.М*. Трехключевой режим коммутации пятифазного преобразователя. Обобщенный вектор напряжения пятифазной системы при трехключевой коммутации / В.М.Терешкин, Д.А.Гришин, И.А.Макулов // Электроника и электрооборудование транспорта. 2018. № 4. С. 9-16.

11. *Усольцев А.А*. Современный асинхронный электропривод оптико-механических комплексов. СПб: СПбГУ ИТМО, 2011. 164 с.

12. An Experimental Assessment of Open-Phase Fault-Tolerant Virtual-Vector-Based Direct Torque Control in Five-Phase Induction Motor Drives / M.Bermudez, I.Gonzalez-Prieto, F.Barrero, H.Guzman, X.Kestelyn, M.J.Duran // IEEE Transactions on Power Electronics. 2018. Vol. 33. № 3. P. 2774-2784.

13. Application of DSP in Power Conversion Systems – A Practical Approach for Multiphase Drives / H.Guzman, M.Bermúdez, C.Martín, F.Barrero, M.Durán. 2015. URL: http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/48835.pdf (дата обращения: 09.09.2018). DOI: org/10.5772/60450

14. *Barrero F.* Recent Advances in the Design, Modeling, and Control of Multiphase Machines – Part I / F.Barrero, M.J.Duran // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2016. Vol. 63. № 1. P. 449-455; 459-468.

15. *Dwari S.* Fault-Tolerant Control of Five-Phase Permanent–Magnet Motors With Trapezoidal Back EMF / S.Dwari, L.Parsa // IEEE Transact Indust Electron. 2011. Vol. 58. № 2. P. 476-485.

16. *Levi E.* Advances in Converter Control and Innovative Exploitation of Additional Degrees of Freedom for Multiphase Machines // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2016. Vol. 63. Iss. 1. P. 433-448.

17. Multiphase Induction Motor Drives – A Technology Status Review / E.Levi, R.Bojoi, F.Profumo, H.A.Toliyat, S.Williamson // IET Electric Power Applic. 2007. Vol. 1. № 4. P. 489-516.

18. Open-phase fault operation of 5-phase induction motor drives using DTC techniques / M.Bermudez, I.Gonzalez-Prieto, F.Barrero, M.J.Duran, X.Kestelyn // Proc. 41st Annual Conference IEEE Industrial Electron. Society. 2015. P. 595-600.

19. Chan C.C. Electric, Hybrid, Fuel-Cell Vehicles: Architectures and Modeling / C.C.Chan, A.Bouscayrol, K.Chen // IEEE Transact Vehicular Technol. 2010. Vol. 59. № 2. P. 589-598.

20. *Williamson S.* Pulsating Torque and Losses in Multiphase Induction Machines / S.Williamson, S.Smith // IEEE Transact Indust Applic. 2003. Vol. 39. № 4. P. 986-993.

***Авторы*: В.М.Терешкин,** *канд. техн. наук*, *доцент*, *office@ugatu.su* (*Уфимский государственный авиационный технический университет*, *Уфа*, *Россия*), **Д.А.Гришин,** *ведущий инженер*, *lowrat@mail.ru* (*ООО «Газ-Проект-Инжиниринг»*, *Уфа*, *Россия*), **И.А.Макулов,** *директор по развитию предприятия*, *irekufa@mail.ru* (*ООО «Газ-Проект-Инжиниринг»*, *Уфа*, *Россия*).

Статья поступила в редакцию 28.03.2019.
Статья принята к публикации 16.05.2019.