

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ



УДК 681.518

DOI:10.30724/1998-9903-2021-23-6-157-165

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ С ТРАДИЦИОННОЙ ОБМОТКОЙ И ДВИГАТЕЛЕЙ С КОМБИНИРОВАННОЙ ОБМОТКОЙ

Цветков А.Н., Доан Нгок Ши

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8733-8914>, tsvetkov9@mail.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Современные требования к электроприводам предъявляют все более жесткие условия по энергоэффективности, габаритам и массе. Особенно ощутимы массо-габаритные параметры применительно к стремительно развивающемуся электротранспорту. Достигнутые технологические пределы практически не дают ощутимых результатов по улучшению характеристик известных конструкций, поэтому идет борьба за единицы процентов и доли процента в плане повышения эффективности оборудования. **МАТЕРИАЛЫ.** Отладка и доводка элементов электроприводов требует многочисленных испытаний на исследовательских стендах с применением измерительных каналов и аналогово-цифрового преобразования (АЦП), цифро-аналогового преобразования (ЦАП), цифро-цифрового преобразования (ЦЦП). **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Создание исследовательских стендов подразумевает разработку аппаратно-программного комплекса (АПК) на основе быстродействующих вычислительных устройств. В состав АПК вошел разработанный преобразователь частоты с возможностью корректировки алгоритмов управления электродвигателем и математической модели самого электродвигателя. Объектом экспериментальных исследований являлись опытные образцы электроприводов на основе асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором и комбинированной обмоткой статора. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** В статье рассматриваются способы организации измерительных и управляющих каналов измерительно-информационной системы исследовательского стенда, позволяющего проводить исследования образцов асинхронных электродвигателей в режимах работы на холостом ходу и под нагрузкой.

Ключевые слова: электропривод; комбинированная обмотка; электродвигатель; аппаратно-программный комплекс; канал измерения; канал управления; датчик; стенд.

Для цитирования: Цветков А.Н., Доан Нгок Ши. Аппаратно-программный комплекс для экспериментального исследования электроприводов асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором с традиционной обмоткой и двигателей с комбинированной обмоткой // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 6. С. 157-165. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-6-157-165.

HARDWARE-SOFTWARE COMPLEX FOR EXPERIMENTAL RESEARCH OF ELECTRIC DRIVES OF ASYNCHRONOUS MOTORS WITH SQUIRREL-CAGE ROTOR WITH TRADITIONAL WINDING AND MOTORS WITH COMBINED WINDING

AN. Tsvetkov, Doan Ngok Shi

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8733-8914>, tsvetkov9@mail.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* Modern requirements for electric drives impose increasingly stringent conditions for energy efficiency, dimensions and weight. The weight and size parameters are especially noticeable in relation to the rapidly developing electric transport. The achieved technological limits practically do not give tangible results in improving the characteristics of known structures, so there is a struggle for units of percent and fractions of a percent in terms of increasing the efficiency of equipment. *MATERIALS.* Debugging and fine-tuning of electric drive elements requires numerous tests on research benches using measuring channels and analog-to-digital conversion (ADC), digital-to-analog conversion (DAC), digital-to-digital conversion (DDC). *RESULTS.* The creation of research stands implies the development of a hardware-software complex (HSC) based on high-speed computing devices. The structure of the HSC included the developed frequency converter with the possibility of adjusting the algorithms for controlling the electric motor and the mathematical model of the electric motor itself. The object of experimental research was prototypes of electric drives based on asynchronous electric motors with a squirrel-cage rotor and a combined stator winding. *CONCLUSION.* The article discusses ways to organize the measuring and control channels of the measuring and information system of the research stand, which makes it possible to study samples of asynchronous electric motors in idling and under load modes.

Keywords: *electric drive; combined winding; electric motor; hardware and software complex; measurement channel; control channel; sensor, stand.*

For citation: Tsvetkov AN, Doan Ngok Shi. Hardware-software complex for experimental research of electric drives of asynchronous motors with squirrel-cage rotor with traditional winding and motors with combined winding. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021;23(6): 157-165. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-6-157-165.

Введение

Современное развитие техники ориентировано на повышение энергоэффективности электроприводов механизмов. В связи с этим проводятся исследования по нахождению путей повышения коэффициента полезного действия и коэффициентов мощности, как электродвигателей, так и преобразователей частоты и электроприводов в целом.

Одним из путей повышения энергоэффективности асинхронных электродвигателей, как наиболее распространенных в настоящее время, является применение комбинированных обмоток статора. Данные двигатели зарекомендовали себя с лучшей стороны в плане улучшения коэффициента полезного действия, коэффициента мощности, уровня шума и вибраций.

Область применения электродвигателей с комбинированной обмоткой (ЭКО) очень широка: от различных производственных механизмов промышленности до приводов станков-качалок нефтедобывающей отрасли и в электротранспорте. При этом, в нефтедобыче существует проблема тяжелого пуска станка - качалки в холодное время после долгого простоя и образования эффекта запарафинивания напорной трубы скважины. Для решения данной проблемы чаще всего станки-качалки проектируются с электродвигателями завышенной мощности для создания достаточного пускового момента. Применение такого двигателя вызывает, в нормальном режиме работы станка-качалки, повышенный расход реактивной мощности и увеличение потерь активной, что ведет к снижению энергоэффективности.

Применение ЭКО, имеющих повышенный пусковой момент, позволяет снизить типоразмер и вывести его на работу в нормальном режиме с большей энергоэффективностью по сравнению с асинхронными двигателями с традиционной обмоткой статора.

Однако ЭКО имеет все преимущества по сравнению с традиционным асинхронным двигателем только при прямом пуске и работе от сети. При необходимости регулирования частоты вращения вала, разработчики электроприводов сталкиваются с рядом проблем. Вызваны данные проблемы тем, что обмотки смещены относительно друг друга на 30 градусов. Особенно сильные затруднения вызывает применение самого прогрессивного и эффективного принципа векторного управления.

Современный процесс нефтедобычи требует от электроприводов станков-качалок нефти регулирования скорости вращения и скорости качания в широком диапазоне частот,

эта необходимость наблюдается и в других отраслях, например в насосном оборудовании при регулировании производительности установки.

По сравнению с традиционными методами повышения энергоэффективности асинхронного привода новизна конструкции комбинированной обмотки заключается в изменении принципа конструирования обмоток двигателя, а именно: в совмещении двух схем подключения нагрузки к трехфазной цепи (звезда и треугольник) в одной обмотке, а также в выборе оптимальных соотношений чисел пазов ротора и статора [1].

Электродвигатель с комбинированной обмоткой имеет лучшие показатели и энергетические характеристики, которые превышают показатели традиционного асинхронного электродвигателя на 3–5%. [2].

В результате многочисленных испытаний отремонтированных, с заменой обмотки статора на комбинированную, серийно выпускаемых асинхронных двигателей и последующей обработки полученных данных были сделаны выводы, что двигатели после ремонта имеют улучшенные по сравнению с паспортными параметрами:

- меньший потребляемый ток, 20-35% в зависимости от режима;
- более высокий пусковой момент - на 35%;
- меньшие пусковые токи - на 35%;
- больший минимальный пусковой момент - на 35%;
- больший максимальный пусковой момент - на 10%;
- имеют возможность эксплуатации как в режиме работы S1, так и в режиме работы S3;
- улучшены виброшумовые характеристики, в среднем уровень звука ниже на 5 дБ;
- КПД и $\cos\phi$, близкий к номинальному в диапазоне нагрузок от 30 до 140%;
- большая перегрузочная способность [3], [4].

Электродвигатели с комбинированной обмоткой пока не получили широкого распространения, хотя работы по их производству ведутся давно [5, 6]. В связи с незаинтересованностью производителей новых электродвигателей в изменении своих технологий, данная технология в основном применяется при ремонте двигателей в организациях, освоивших технологию изготовления комбинированной обмотки, предлагающих заказчику отремонтированные двигатели, у которых «сгорели» обмотки.

Частотнорегулируемый привод в сочетании с асинхронным ЭКО может быть выполнен с повышенной частотой питающего напряжения, что достигается за счёт меньших потерь в стали магнитопровода двигателя. Себестоимость такого привода получается существенно ниже, чем при использовании стандартных двигателей за счет уменьшения массо-габаритных показателей на 1...2 типоразмера, а также значительно снижаются уровень шума и вибраций за счет увеличения скорости вращения вала.

Поэтому возникает необходимость разработки алгоритмов управления частотными преобразователями для эффективного управления ЭКО особенно на низких скоростях. Одним из путей решения данной проблемы является раздельное управление каждым слоем обмотки, сдвинутым на 30 градусов, что ведет к существенному усложнению конструкции инвертора и его удорожанию, кроме этого исчезает возможность быстрой замены электродвигателя при выходе из строя.

В настоящее время ни один производитель преобразователей частоты не закладывает специальные алгоритмы для управления ЭКО. Но все большее распространение такого типа двигателей говорит о том, что в ближайшем будущем спрос на частотное регулирование энергоэффективных двигателей резко возрастет.

С целью выработки методов и подходов к управлению асинхронными ЭКО разработан аппаратно-программный комплекс (АПК) для экспериментального исследования электроприводов на основе асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором с традиционной обмоткой и двигателей с комбинированной обмоткой.

Состав аппаратно-программного комплекса

Функциональный состав аппаратно-программного комплекса показан на рисунке 1.

Изучение вопроса построения исследовательских стендов показал, что как правило, принято применять в качестве нагрузочного элемента электродвигатель постоянного тока с регулируемой системой питания обмотки возбуждения и якорной обмотки, построенной на изменении напряжения. Данный способ нагружения обладает рядом недостатков, основные из которых это отсутствие момента на валу двигателя при нулевых скоростях и сложность создания переменного момента при изменяющихся скоростях вращения [7, 8].

Система нагружения приводного электродвигателя, реализованная в описываемом АПК, учитывает опыт известных работ по исследованию динамических нагрузок в элементах механической и электрической частей различных механизмов, поэтому лишена

вышеуказанных недостатков и позволяет создавать тарированную величину как переменного, так и постоянного момента на любых скоростях вращения. Для этого в состав АПК введены преобразователь ПЧ-1 и асинхронный электродвигатель М1 (рис.1). ПЧ-1 реализован в виде промышленно выпускаемого преобразователя частоты *Altivar* с реализованным скалярным методом управления двигателем и регулированием по скорости вращения без обратной связи. В качестве нагрузочного режима работы выбран режим работы противовключением. При этом создаваемый нагрузочный момент направляется в сторону, противоположную направлению вращения исследуемого электродвигателя М2. Регулирование момента нагрузки осуществляется изменением заданной частоты вращения магнитного поля нагрузочного электродвигателя М1

Для привода исследуемого ЭКО применен разработанный преобразователь частоты ПЧ-2 (рис.1) с возможностью корректировки алгоритмов управления и математической модели управляемого двигателя [9]. Преобразователь частоты имеет в своем составе микропроцессорное устройство на базе микроконтроллера *ATmega2560*, измерительные устройства, силовые ключи с системой управления и блоки питания. Микроконтроллер имеет следующие характеристики: ядро 8-битный *AVR*, тактовая частота 16 МГц, объем *Flash*-памяти: 256 кБ, портов ввода-вывода всего 54, портов с АЦП 16, разрядность АЦП 10 бит, портов с ШИМ 15, разрядность ШИМ 8 бит, аппаратных интерфейсов *SPI* 1, аппаратных интерфейсов *I²C / TWI* 1, аппаратных интерфейсов *UART / Serial* 4.

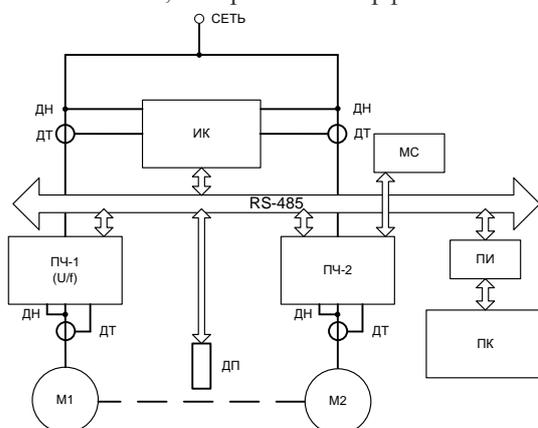


Рис. 1. Функциональная схема аппаратно-программного комплекса. М1 – нагрузочный электродвигатель, М2 – исследуемый электродвигатель, ПЧ-1 – нагрузочный преобразователь частоты, ПЧ-2 – исследовательский преобразователь частоты, ИК – измерительный комплекс, ПК – персональный компьютер, ПИ – преобразователь интерфейсов, ДТ – датчики тока, ДН – датчики напряжения, ДП – датчик положения вала двигателя, RS-485 – цифровая шина передачи данных и удаленного управления АПК, МС – модуль удаленной связи

Fig.1. Functional diagram of the hardware-software complex. M1 – load electric motor, M2 – electric motor under investigation, FC-1 – load frequency converter, FC-2 – research frequency converter, IR – measuring complex, PC – personal computer, PI – interface converter, DT – current sensors, DN – voltage sensors, DP – motor shaft position sensor, RS-485 – digital bus for data transmission and remote control of APC, MS – remote communication module

Измерительный комплекс ИК применяется для определения энергетических характеристик электропривода ПЧ2-М2 в различных режимах работы и позволяет определить токи, напряжения, мощности, коэффициент мощности, гармонические составляющие и другие параметры. Реализован измерительный комплекс на основе анализатора качества электроэнергии *Fluke 43B* и цифрового осциллографа *ISD205B*. Осциллограф имеет следующие характеристики: частота дискретизации 20/48 Мвыб/сек, вертикальное разрешение 8-разрядное, диапазон усиления: От -6 до 6 В (зонд X1), от -60 до 60 В (зонд X10), вертикальная точность: ± 3%, диапазон времени: 1 нс - 20 с, сохранение данных в формате *Osc, Excel* и *Vmp*, спектральные анализаторы: пропускная способность: 20 МГц, алгоритм: БПФ, корреляция, точки БПФ: 8 - 1048576 / канал, измерение БПФ: гармонические (1-7), *SNR, SINAD, ENOB, THD, SFDR*, обработка фильтра: *FIR*-фильтр поддерживает произвольный диапазон частотной выборки и прямоугольник, треугольник, косинус, и другие. Результат измерения величин осциллографом показаны на рисунке 3 и 4.

Анализатор *Fluke* имеет следующие характеристики: диапазон напряжения 5...500 В с точностью измерения $\pm 1\%$, диапазон тока 50 А, 500 кА, 1250 кА с точностью измерения $\pm 1\%$, частотный диапазон 10 Гц ... 15 кГц с точностью измерения 0,5 %, диапазоны мощности Вт, ВА, ВАр 250 В, 250 МВт, 625 МВт, 1,56 ГВт с точностью измерения $\pm 2\%$, коэффициент мощности 0...1 с точностью измерения $\pm 0,04$, число измеряемых гармоник *DC..21*, *DC..33*, *DC..51* с точностью 3 %, время регистрации измерений 4 мин...8 дней.

Персональный компьютер ПК (рис. 1) представляет собой систему управления и сбора информации с возможностью формирования управляющих воздействий на ПЧ-1, ПЧ-2 и ИК, а также получения от них измеренной и рассчитанной информации о энергетических характеристиках электродвигателей и электроприводов в целом. Для передачи данных в АПК реализована цифровая шина на основе интерфейса RS-485 с различными протоколами обмена информацией, например, промышленный *ModBusRTU*, протокол обмена *Fluke* и собственный протокол микропроцессора разработанного ПЧ-2. ПК подключен к цифровой шине через преобразователь интерфейсов ПИ, позволяющий согласовать интерфейсы RS-485 и USB. Модуль связи МС представлен устройством с преобразователем интерфейсов, осуществляющим преобразование сигналов, полученных по цифровой шине управления RS-485 в значения параметров внутреннего протокола для отправки их по каналам беспроводной связи.

В состав АПК вошли датчики тока ДТ, напряжения ДН и положения вала двигателя ДП. Датчики тока и напряжения, установленные после преобразователей частоты входят в их состав и используются в качестве измерительных органов с возможностью расчета параметров для нужд преобразователей частоты и дальнейшей передачи ее в ПК. Таким образом АПК использует в качестве датчиков элементы, встроенные в преобразователи частоты с уже реализованными аналого-цифровыми преобразователями (АЦП) и аппаратом расчета действующих значений параметров [10].

В разработанном ПЧ-2 датчики напряжения и тока и соответствующие им АЦП работают в режиме измерения мгновенных значений. Данные измерения позволяют проводить оценку качества потребляемой электроэнергии и воздействие на сеть электропривода.

На практике, очень часто становится не возможным применение систем с высокой частотой дискретизации измерений для достижения достаточной точности полученных расчетных данных из-за ограниченных ресурсов микропроцессорных устройств. В таком случае становится достаточным проведение измерений с пониженной частотой дискретизации с целью экономии ресурсов вычислительной системы и снижения требований к аппаратной части систем управления. Для доказательства правильности работы системы с пониженной частотой дискретизации были построены математические модели напряжения синусоидальной формы и вычислены среднеквадратические значения для различного количества точек измерения. Результаты работы моделей показаны на рисунке 2.

При снижении частоты дискретизации напряжения до выборки каждые 1,5мс (см. рис.2), в среднем на период напряжения приходится 14 значений напряжения, но стабильная величина среднеквадратического значения напряжения получается лишь при обработке 32 значений, т.е. каждые 48мс или 20 значений в секунду. Данные выводы сделаны на основе реализации и опробования математических моделей, работающих на различной частоте дискретизации. Снижение частоты дискретизации может понадобиться при необходимости ввода в программу расчетов дополнительных величин, таких как частота сети, коэффициент мощности и других.

Измерительные каналы АПК построены на основе датчиков тока и напряжения с преобразованием измеренных мгновенных величин в АЦП. Применение 12-ти разрядных АЦП по каждому каналу в составе разработанного ПЧ-2 является достаточным для обеспечения точности вычислений с погрешностью 0,5 % и частотой дискретизации 600 Гц.

Измерение тока осуществляется с применением датчиков тока ЗМСТ103С с номинальным током до 5А и коэффициентом трансформации 1000/1. Датчики имеют следующие характеристики: номинальный входной ток 5 А, номинальный выходной ток 5мА, преобразование измеряемой величины 1000:1, ограничение по входному току не более 20 А, линейный диапазон 0...10 А, линейность 0,2 %, класс точности 0,2, напряжение изоляции не более 3000 В. Данные датчики позволяют осуществлять измерения на нагрузке мощностью до 3 кВт с достаточно высокой точностью.

Измерение напряжения осуществляется с применением модулей на базе маломощного трансформатора ЗМРТ101В с номинальным напряжением 250 В. Датчики напряжения имеют следующие характеристики: входное напряжение переменное до 250 В, выходной сигнал: аналоговый 0...5 В, ток обмоток 2 мА, напряжение питания: 4...12В, рабочая температура: -40...+70С°. Применение датчиков напряжения с схемой соединения в

звезду и организацией «плавающей» нулевой точки позволяет выполнять измерения в сети питания нагрузки до 400 В трехфазного напряжения.

Измерение положения вала исследуемого электродвигателя осуществляется с применением цифрового тахометра *RPM Speed Meter*. В состав тахометра входят бесконтактный датчик и модуль преобразования импульсов в частоту вращения вала. Бесконтактный датчик имеет следующие характеристики: номинальное расстояние срабатывания 4 мм, максимальная частота срабатывания 1 кГц, гистерезис переключения не более 15 % Sr, точность повторения не более 1 % Sr, температурная погрешность не более 10 % Sr. Модуль преобразования импульсов имеет диапазон измерения: 5...9999 об/мин, скорость обновления дисплея 3 раза в секунду, точность измерения ± 2 об/мин, частота обновления измерений 100 Гц, частота входного сигнала 2,5...2500 Гц, приведенная погрешность измерения 0,5 %.

При отсутствии датчика момента, развиваемого на валу исследуемого электродвигателя, в составе АПК, проблема получения данного немаловажного параметра была решена вычислением косвенно по известным данным. При этом в задачи, решаемые АПК не входит определение точного значения крутящего момента, основной задачей является подбор алгоритмов управления и коэффициентов, корректирующих математическую модель электродвигателя с целью получения наилучших характеристик, поэтому момент может быть рассчитан в относительных единицах. Для этого необходимо иметь данные о потребляемой двигателем мощности, его коэффициент полезного действия и скорость вращения вала.

Полученные от датчиков напряжения и ток дают возможность определения мощности, на основе которой можно вычислить мощность на валу двигателя:

$$P_2 = P_1 \cdot \eta \quad (1)$$

Здесь P_1 – мощность, потребляемая электродвигателем, P_2 – мощность на валу электродвигателя, η - КПД электродвигателя. Момент на валу электродвигателя вычисляется по формуле:

$$M = \frac{60}{2\pi \cdot 9.81} \cdot \frac{P_2}{n} = \frac{1}{1,028} \cdot \frac{P_2}{n} = 0,975 \cdot \frac{P_2}{n} \quad (2)$$

Здесь M – крутящий момент на валу двигателя, n – частота вращения вала двигателя. Таким образом в составе АПК была решена проблема определения крутящего момента косвенным путем без применения дорогостоящих и сложных по конструкции датчиков момента. Экспериментальные исследования показали точность рассмотренного метода определения момента в пределах 1 %.

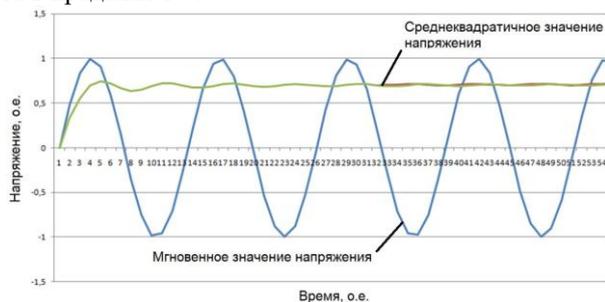


Рис. 2. Расчет среднеквадратичного значения величины напряжения при частоте дискретизации каждые 1,5мс

Fig. 2. Calculation of the RMS value of the voltage value at a sampling rate of every 1.5ms

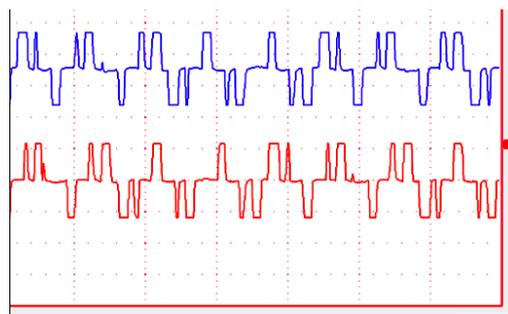


Рис. 3. Измерение осциллографом формы питающего напряжения преобразователя частоты

Fig. 3. Oscilloscope measurement of the power supply voltage waveform of the frequency converter

Основные результаты

Исследования, проведенные на представленном АПК позволили выявить тенденцию совместной работы преобразователя частоты с векторным управлением и асинхронного ЭКО, которая показывает плохую их совместимость из-за изменения магнитной системы двигателя (рис.5). Проведенные работы по корректировке математической модели управления на первом этапе исследования позволили увеличить крутящий момент двигателя и приблизить его к традиционному асинхронному электродвигателю. На втором этапе исследования была осуществлена попытка увеличения крутящего момента и приблизить его к моменту, развиваемому ЭКО при прямом включении в сеть. Опытным путем удалось достичь увеличения крутящего момента приблизительно на 1 % подбором коэффициентов, заложенных в модель управления. При этом были выявлены пути дальнейшего совершенствования алгоритмов управления для достижения максимальной энергоэффективности ЭКО при работе в составе электроприводов с векторным управлением.

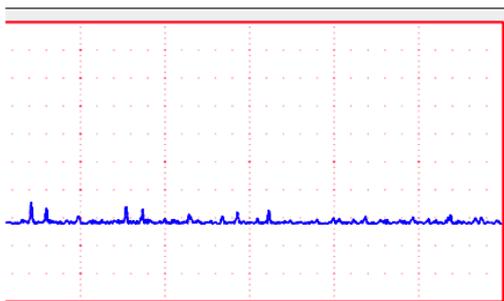


Рис. 4. Измерение осциллографом спектрального состава питающего напряжения преобразователя частоты

Fig. 4. Oscilloscope measurement of the spectral composition of the supply voltage of the frequency converter



Рис.5. Внешний вид аппаратно-программного комплекса для исследования электродвигателей с комбинированной обмоткой

Fig. 5. Appearance of the hardware-software complex for the study of electric motors with a combined winding

В состав аппаратно-программного комплекса вошла система удаленной беспроводной связи в виде модуля связи МС (рис. 1) [11]. Применение системы позволило отладить основные методики управления, передачи данных и архивирования накопленных данных. Основной целью применения модуля связи стала возможность интеграции АПК в систему управления и мониторинга промышленных предприятий с реализацией дополнительного канала передачи данных. Данная функция становится особенно актуальной при проведении длительных исследований на действующих электроустановках предприятий с целью проведения сравнительных испытаний алгоритмов управления электродвигателями в составе электроприводов. Данный канал связи позволяет осуществлять мониторинг электропривода, накопление и хранение измеренных данных, управлять электроприводом при необходимости изменения режима работы.

Выводы

В разработанном АПК реализованы аналоговые и цифровые каналы контроля и управления, вычислительные алгоритмы определения параметров, системы визуализации и архивирования. Технические решения, заложенные в конструкцию АПК, а также гибкость алгоритмов работы системы управления позволяют проводить широкий спектр исследований с применением разнообразных объектов испытания. Применение канала связи позволяет повысить мобильность и универсальность комплекса, а также позволяет отказаться от применения мощной вычислительной техники и перейти на работу с регистраторами данных с последующей их обработкой.

В состав системы управления АПК включены программные решения, на которые возложено несколько задач: в процессе проведения испытаний участвуют в обработке

данных, полученных от датчиков, имеют возможность управления преобразователем частоты и позволяют проверить правильность функционирования заложенных алгоритмов управления.

В результате применения разработанного АПК появилась возможность отработки и отладки алгоритмов управления асинхронными электродвигателями с комбинированной обмоткой за счет изменения параметров математической модели, на основе которой формируются управляющие сигналы на инвертор в зависимости от скорости вращения вала и нагрузки на нем. Сложности управления такими электродвигателями вызваны конструктивными особенностями, при которых две обмотки смещены друг относительно друга на 30 градусов и при этом преобразователи частоты с реализованным прогрессивным векторным управлением не способны сформировать правильное положение магнитного поля статора, так как в них заложена математическая модель классического асинхронного электродвигателя.

Литература

1. Змиева К.А., Яковлев А.П. Оптимизация линейки энергосберегающих асинхронных двигателей с габаритами от 100 до 132 с совмещенными обмотками // Электротехника. 2014. № 7. С. 32-35.
2. Мощинский Ю.А., Соколова Е.М. Преимущества и недостатки совмещенной обмотки «славянка» // Электричество. 2018. № 11, с. 23–31.
3. Дейнего В.С., Дуюнов Д.А., Иванов В.А. Изменение конструкции обмоток асинхронных электродвигателей потенциал обеспечения надёжности электросетей // Сети России. №2 (29), март–апрель.2015. с. 42-49
4. Мухаметшин А.И., Корнилов В.Ю. Модернизация электроприводов штанговых насосных установок на основе энергоэффективных асинхронных электродвигателей к комбинированной двухслойной обмоткой. // В сборнике: Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве. Материалы 6 Национальной научно-практической конференции, в 2 т. Казань, 2020. С. 75-78.
5. Афлетонов Р.А., Гордеев В.Ю., Усманов И.К., и др. Обмотка энергоэффективного асинхронного двигателя. Патент на полезную модель RU 176753 U1, 29.01.2018. Заявка № 2017109563 от 21.03.2017.
6. Андреева Н.В., Ахунов Д.Д., Корнилов В.Ю. Автоматизированный стенд для исследования и испытания электроприводов. Патент РФ № 121664, МПК H02H, Оpubл. 27.10.12, Бюл. №30.
7. Андреева Н.В., Ахунов Д.Д., Корнилов В.Ю. Установка для оценки эффективности функционирования асинхронного электропривода. Патент РФ № 129260, МПК G01R31/00, Оpubл. 20.06.2013, Бюл. №6.
8. Doan N.S., Tsvetkov A.N. and Nguyen T.H. Study and implementation of space vector pulse width modulation inverter on an Arduino. E3S Web of Conferences 288, 01059 (2021).
9. Цветков А.Н., Корнилов В.Ю., Сафин А.Р., Кувшинов Н.Е., Петров Т.И., Гибадуллин Р.Р. Разработка стенда для исследования электроприводов станков-качалок // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. 2020. Т. 23. № 4. С. 364-375.
10. Владимиров О.В., Ившин И.В., Низамиев М.Ф., Цветков А.Н., Усманов И.К., Гибадуллин Р.Р. Стенд для послеремонтных испытаний асинхронных двигателей // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. Т. 21. № 3-4. С. 58-66.
11. Chomat M., Schreier L. and Bendl J. Induction Machine with Combined Star-Delta Stator Winding in Parallel Configuration. Proc. 2018 23rd Int. Conf. Electr. Mach. IECM 2018, pp. 2478–2482, 2018.
12. Duyunov D.A., Duyunov E.D., Teplova Y.O., et al. Induction Motors Redesign Using the Combined Windings Principle Based on Computer Models Study As a Means of Improving the Energy-Efficiency and Performance Characteristics of Electric Drives, Modern High Technol. 2018. no. №5. pp. 56–61, 2018.
13. Raziiee S.M., Misir O. and Ponick B. Combined Star-Delta Winding Analysis. IEEE Trans. Energy Convers. 2018. V. 3, no. 1. pp. 384–394.
14. Chomat J.B. M. and Schreier L. Analysis of magnetic field distribution in induction machine with combined star-delta stator winding. The 9th International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2018).The Journal of Engineering. 2019. pp. 4369–4374.
15. Ludek M.C. and Bendl J. Analysis of properties of induction machine with combined parallel star-delta stator winding. 2017. V. 2017. no. 1. pp. 147–153.

Авторы публикации

Цветков Алексей Николаевич – канд. техн. наук., доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

Доан Нгок Ши – аспирант, Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Zmieva KA, Yakovlev AP. Optimization of the line of energy-saving asynchronous motors with dimensions from 100 to 132 with combined windings. *Electrical engineering*. 2014;7;32-35.
2. Moshchinsky YuA, Sokolova EM. Advantages and Drawbacks of the SlavyankaType Combined Winding. *Elektrichestvo*. 2018;11:23–31
3. Deinego VS, Duyunov DA, Ivanov VA. Changing the design of the windings of asynchronous electric motors has the potential to ensure the reliability of electrical networks. *Russian networks*. 2015;2(29):42-49
4. Mukhametshin AI, Kornilov VYu. Modernization of electric drives of sucker-rod pumping units based on energy-efficient asynchronous electric motors to a combined two-layer winding. *Proceedings of the VI National Scientific and Practical Conference, in 2 volumes. Kazan*. 2020;75-78.
5. Afletonov RA., Gordeev VYu., Usmanov IK, et.al. *Winding of an energy-efficient asynchronous motor*. Utility model patent RU 176753 U1, 01/29/2018. Application No. 2017109563 dated 03/21/2017.
6. Andreeva NV, Akhunov DD, Kornilov VYu. *Automated stand for research and testing of electric drives*. Patent of the Russian Federation No. 121664, IPC H02H, Publ. 27.10.12, Bull. No. 30.
7. Andreeva NV, Akhunov DD, Kornilov VYu. *Installation for evaluating the effectiveness of the functioning of an asynchronous electric drive*. Patent of the Russian Federation No. 129260, IPC G01R31 / 00, Publ. 06/20/2013, Bull. No. 6.
8. Doan NS, Tsvetkov AN, Nguyen TH. *Study and implementation of space vector pulse width modulation inverter on an Arduino*. E3S Web of Conferences 288. 01059 (2021).
9. Tsvetkov AN, Kornilov VYu, Safin AR, et.al. Development of a stand for the study of electric drives of pumping units. *Bulletin of MSTU*. 2020;23:4: 364-375.
10. Vladimirov OV, Ivshin IV, Nizamiev MF, et.al. Stand for post-repair testing of asynchronous motors. *Izvestiya VUZov. Energy issues*. 2019;21:3-4:58-66.
11. Chomat M, Schreier L, Bendl J. *Induction Machine with Combined Star-Delta Stator Winding in Parallel Configuration. Proc. 2018 23rd Int. Conf. Electr. Mach. ICEM 2018*;2478–2482.
12. Duyunov DA, Duyunov ED, Teplova YO, et.al. Induction Motors Redesign Using the Combined Windings Principle Based on Computer Models Study As a Means of Improving the Energy-Efficiency and Performance Characteristics of Electric Drives. *Modern High Technol*. 2018;5:56-61.
13. Raziee SM, Misir O, Ponick B. Combined Star-Delta Winding Analysis. *IEEE Trans. Energy Convers*. 2018;33:384-394.
14. Chomat JBM, Schreier L. Analysis of magnetic field distribution in induction machine with combined star-delta stator winding. *The 9th International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2018). The Journal of Engineering*. 2019; 4369–4374.
15. Ludek MC, Bendl J. Analysis of properties of induction machine with combined parallel star-delta stator winding. *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe* 2017;1:147–153.

Authors of the publication

Alexey N. Tsvetkov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Doan Ngok Shi – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Получено 26.11.2021 г.

Отредактировано 14.12.2021 г.

Принято 28.12.2021 г.