



**СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ И КАЧЕСТВА  
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ И СИСТЕМ  
ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С РЕГУЛЯТОРАМИ ЧАСТОТЫ**

**Р.Р. Гибадуллин, М.Ф. Низамиев, И.В. Ившин, А.Н. Цветков, О.В. Владимиров,  
З.М. Шакурова**

**Казанский государственный энергетический университет,  
г. Казань, Россия  
gibadullin.rr90@gmail.com**

**Резюме:** *ЦЕЛЬ.* Разработать стенд для исследования работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем электроприводов с регуляторами частоты, прошедших капитальный ремонт. *МЕТОДЫ.* При решении поставленной задачи применялся метод непосредственной оценки механической характеристики системы Источник-Преобразователь частоты-Двигатель-Нагрузка, использовались методы непосредственной оценки входных параметров с последующим вычислением показателей, методы увеличения алгоритмической избыточности, математические методы проверок, логические методы контроля и сложные методы контроля (метод контрольных испытаний, метод контрольных программ). *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Проведен анализ методов испытаний частотных регуляторов, произведен выбор необходимого оборудования, определены алгоритмы управления стендом, разработана конструкторская документация, изготовлен стенд для исследования работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем электроприводов с регуляторами частоты, осуществлена отладка программного обеспечения его системы управления, проведены испытания преобразователей частоты по разработанной методике в соответствии с требованиями ГОСТ. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Одним из эффективных способов определения состояния частотного регулятора до отправки его на монтаж, является проверка на испытательном стенде для определения степени работоспособности системы управления и защиты, а также силовой части. Разработанный стенд позволяет решить широкий круг задач по исследованию работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем электроприводов с регуляторами частоты, прошедших капитальный ремонт.

**Ключевые слова:** *Электротехнические комплексы; системы электроприводов с регуляторами частоты; преобразователь частоты; автоматизированная система управления технологическим процессом.*

**Благодарности:** *Работа, по результатам которой выполнена статья, выполнена по договору № 4а/2016от 01.08.2016 г., заключенному между ООО «Диагностика – ЭнергоСервис» и ФГБОУ ВО «КГЭУ».*

**Для цитирования:** Гибадуллин Р.Р., Низамиев М.Ф., Ившин И.В., Цветков А.Н., Владимиров О.В., Шакурова З.М. Стенд для исследования работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем электроприводов с регуляторами частоты // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 1. С. 164-175. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-1-164-175.

**A STAND FOR THE STUDY OF THE OPERABILITY AND QUALITY OF  
FUNCTIONING OF ELECTRICAL COMPLEXES AND ELECTRIC DRIVE SYSTEMS  
WITH FREQUENCY REGULATORS**

**RR. Gibadullin, MF. Nizamiev, IV. Ivshin, AN. Tsvetkov, OV. Vladimirov,  
ZM. Shakurova**

**Abstract:** *THE PURPOSE.* To develop a stand for the study of the operability and quality of functioning of electrical complexes and electric drive systems with frequency regulators that have undergone major repairs. *METHODS.* When solving this problem, the method of direct evaluation of the mechanical characteristics of the system Source-Frequency Converter-Motor-Load was used, methods of direct evaluation of input parameters with subsequent calculation of indicators, methods of increasing algorithmic redundancy, mathematical methods of checks, logical control methods and complex control methods (the method of control tests, the method of control programs) were used. *RESULTS.* The analysis of test methods of frequency regulators was carried out, the necessary equipment was selected, stand control algorithms were determined, design documentation was developed, a stand was made to study the operability and quality of functioning of electrical complexes and electric drive systems with frequency regulators, the software of its control system was debugged, frequency converters were tested according to the developed methodology in accordance with GOST requirements. *CONCLUSION.* One of the most effective ways to determine the state of the frequency controller before sending it for installation is to check on a test bench to determine the degree of operability of the control and protection system, as well as the power part. The developed stand makes it possible to solve a wide range of tasks for the study of the operability and quality of functioning of electrical complexes and electric drive systems with frequency regulators that have undergone major repairs.

**Keywords:** *Electrical engineering complexes; electric drive systems with frequency controllers; frequency converter; automated process control system.*

**Acknowledgments:** *The work, based on the results of which the article was completed, was performed under contract No. 4a/2016 dated 01.08.2016, concluded between Diagnostics - Energoservice LLC and KGEU.*

**For citation:** Gibadullin RR, Nizamiev MF, Ivshin IV, Tsvetkov AN, Vladimirov OV, Shakurova ZM. A stand for the study of the operability and quality of functioning of electrical complexes and electric drive systems with frequency regulators. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022; 24 (1): 164-175. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-1-164-175.

### **Введение**

Преобразователь частоты – это статическое преобразовательное устройство, необходимое для управления скоростью вращения асинхронных электрических двигателей. Асинхронные электрические двигатели переменного тока существенно отличаются от устройств постоянного тока. Отличие приходится на простоту конструкции и удобство использования. Именно этот фактор объясняет такую популярность асинхронных электродвигателей [1-6].

Важно отметить, что регулирование скорости вращения может выполняться посредством таких устройств, как механический вариатор, гидравлическая муфта и прочие. Но все эти методы имеют значительные недостатки, к которым относят сложность использования, низкое качество работы, дороговизну и малый диапазон регулирования [7-9].

Избежать всех этих проблем позволяет частотный преобразователь для электродвигателя. В этом случае регулирование скорости вращения выполняется путем изменения напряжения питания и частоты электродвигателя. КПД такого преобразователя достигает 98%, а риск возникновения и развития аварийных ситуаций заметно снижается [10].

В настоящее время существует проблема оценки состояния частотных регуляторов, отправляемых в ремонт и возвращаемых из капитального ремонта, с целью снижения затрат на монтажно-демонтажные работы и времени простоя установок в результате применения неисправного регулятора частоты. Одним из эффективных способов определения состояния частотного регулятора до отправки его на монтаж, является проверка на испытательном стенде для определения степени работоспособности системы управления и защиты, а также силовой части. На сегодняшний день для контроля состояния частотных преобразователей применяется

большое количество методик, значительно отличающихся по своей методической сущности и аппаратной реализации. В основном они применяются производителями и осуществляются только на производственных площадках [11].

При реализации проекта первым делом был осуществлен обзор основных схем (устройство), принципа действия, управления и конструкции частотных преобразователей, произведен анализ методов испытаний регуляторов частоты.

В большинстве случаев устройство частотного преобразователя базируется на схеме двойного преобразования. Агрегаты включают: звено постоянного тока (неуправляемый выпрямитель), силовой импульсный инвертор и управляющую систему. В свою очередь, звено постоянного тока включает неуправляемый выпрямитель и фильтр. Здесь переменное напряжение сети преобразуется в напряжение постоянного тока. В силовой трехфазный импульсный инвертор входит шесть транзисторных ключей, и каждая обмотка двигателя подключается через определенный ключ к положительному/отрицательному выводам выпрямителя. Посредством инвертора выполняется преобразование выпрямленного напряжения в трехфазную переменную величину нужной частоты и амплитуды, прикладываемую к обмоткам статора электрического двигателя [12-13].

В роли ключей используются силовые IGBT-транзисторы (*Insulated Gate Bipolar Transistor*). Если сравнить их с тиристорами, то первые имеют более высокую частоту переключения, что дает возможность вырабатывать выходной сигнал синусоидальной формы при минимальных искажениях [14].

Различают два базовых принципа управления частотными преобразователями. Основной принцип скалярного управления состоит в изменении частоты и амплитуды питающего напряжения согласно закону:

$$\frac{U}{f^n} = \text{const}$$

где  $n \geq 1$ .

Эта формула показывает, что оговоренный принцип является наиболее простым и доступным способом реализации частотного управления. За счет доступной стоимости преобразователей со скалярным управлением, такие агрегаты широко используются для привода механизмов, диапазон регулирования частоты вращения двигателя которых составляет 1:40. Такое ограничение удовлетворяет требованиям по управлению насосами, компрессорами, вентиляторами. Весомым преимуществом скалярного метода выступает возможность одновременного управления группой электрических двигателей.

Второй тип систем управления представляет векторный принцип, обеспечивающий параметры асинхронного электропривода, максимально приближенные к характеристикам привода постоянного тока. Такие особенности системы реализуются посредством разделения каналов регулирования потокосцепления и скорости вращения двигателя. Преобразователи, работающие по векторному принципу, характеризуются относительно высокой стоимостью и используются в механизмах, предъявляющих повышенные требования к качеству регулирования скорости – станки, лифты, краны и т.п. [15].

### **Материалы и методы**

Существующие методы испытаний частотных преобразователей делятся на 3 вида: квалификационные, приемо-сдаточные и периодические. В ходе проведения работ было принято решение испытывать частотные преобразователи по программе периодических испытаний, методику проведения которых регламентируют ГОСТ 26567-85, ГОСТ 17441-84, ГОСТ 27.410-87, ГОСТ 16962.2-90.

Анализ причин выхода из строя преобразователей частоты показал, что основными причинами поломки регуляторов являются ошибки при их выборе и нарушения правил эксплуатации.

Короткое замыкание выходных цепей преобразователя частоты – вполне вероятная на практике аварийная ситуация, несмотря на то, что для предотвращения выхода из строя регуляторе имеется встроенная защита. Но быстродействие защиты – 5-10 микросекунд – может оказаться недостаточным, так как при коротком замыкании ток мгновенно возрастает за время от долей микросекунд до десятков микросекунд до опасного значения, превышающего номинальный ток IGBT-транзисторов в несколько раз, что может привести к выходу преобразователя из строя [16].

На основании проведенного анализа было установлено, что разрабатываемый стенд для исследования работоспособности и качества функционирования

электротехнических комплексов и систем электроприводов с регуляторами частоты должен решать следующие задачи.

Основная задача, возлагаемая на испытательный стенд, заключается в определении технического состояния основных узлов частотного регулятора после ремонта.

В первую очередь необходимо проверить систему управления преобразователем. В этой системе возможны отказы модулей связи, измерения, управления и защиты. Проверка заключается в определении работоспособности каналов связи, как правило, работающих с протоколом *ModBus*, и способности системы вести измерения и вычисления основных величин, используемых в управлении и в защитах.

Затем проверяется силовая часть преобразователя путем подключения эквивалента нагрузки к выходным клеммам при различном уровне питающего напряжения.

В данной части испытаний стенд решает задачи проверки целостности силовых преобразователей на базе транзисторов *IGBT* и выпрямителей для цепи постоянного тока.

Весь спектр испытаний проводится с помощью входящих в состав стенда сложных электронных модулей, состоящих из модулей управления и исполнительных механизмов.

Кроме этого стенд должен обеспечивать механическое воздействие и электрическую нагрузку, а также измерять параметры работы частотного регулятора в следующих диапазонах:

- мощность испытываемого частотного регулятора: 0...90 кВт;
- регулирование напряжения питания: 300...400В;
- измерение электрического тока: 0...200 А;
- измерение напряжения на нагрузке: 0...400 В;
- измерение мощности на нагрузке: 0...90 кВт;
- частота напряжения питания двигателя: 0...60 Гц.

Стенд должен обеспечивать работу испытываемого регулятора частоты в режимах перегрузки и обрыва фаз нагрузки.

Стенд для исследования работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем электроприводов с регуляторами частоты должен обеспечивать контроль и управление параметрами работы частотного регулятора с целью получения его характеристик и формирования заключения о работоспособности.

Стенд должен обеспечивать контроль и управление параметрами частотного регулятора посредством программно-аппаратных средств.

Система управления лабораторным стендом должна обеспечивать управление исполнительными механизмами стенда, а также должна реализовывать алгоритмы управления частотным регулятором для получения исследуемых характеристик.

Система управления также должна обеспечивать защиту при аварийных режимах работы.

Стенд и его электронные компоненты системы управления должны соответствовать стандарту электромагнитной совместимости ГОСТ Р 50397-2011 и соответствовать нормам по электротехнической безопасности.

Конструкцией разрабатываемого испытательного стенда должна быть обеспечена безопасность при эксплуатации от поражения обслуживающего персонала электрическим током, травмирования вращающимися и подвижными частями и от получения ожогов от частей, нагретых до высокой температуры.

Испытательный стенд должен представлять собой комплексное устройство, состоящее из модулей сбора информации и управления силовыми элементами. Кроме этого стенд должен реализовывать различные методики испытаний и объемы проводимых исследований.

Все вышеизложенное, а также ряд дополнительных научно-исследовательских работ позволило нам перейти к выбору оборудования, необходимого и достаточного для реализации стенда. В ходе выполнения данного этапа была спроектирована структурная схема стенда (рис. 1), которая в дальнейшем стала основой функциональной схемы.

Изъясняясь патентной терминологией, можно вкратце описать общую концепцию функционирования стенда следующим образом.

Управляемый регулятор (1) напряжения осуществляет изменение входного напряжения при испытаниях и имитирует скачки и провалы напряжения сети для

удаленных объектов. Конструктивно он представляет собой стабилизатор напряжения с широким пределом уставок.

Блок защиты (2) и измерения предназначен для защиты сети от аварийных ситуаций, возникающих при испытаниях, подачу напряжения на объект испытания (3) и измерение электрических параметров.

Объектом испытания (3) является частотный регулятор, поступивший после ремонта или отправляемый на ремонт.

Нагрузочное устройство (4) создает электрическую нагрузку для силовых цепей объекта испытания (3).

Система управления (5) осуществляет подачу команд исполнительным устройствам, сбор и архивирование информации, связь с системой управления объекта испытаний (3).

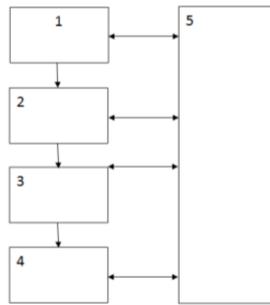


Рис.1. Структурная схема испытательного стенда: 1 – управляемый регулятор напряжения; 2 – блок защиты и измерения; 3 – объект испытания; 4 – нагрузочное устройство; 5 – система управления

Fig.1. Block diagram of the test bench: 1 - controlled voltage regulator; 2 - protection and measurement unit; 3 - test object; 4 - load device; 5 - control system

Далее была разработана конструкторская документация, подготовлен перечень оборудования, входящего в состав стенда, произведена отладка программного обеспечения. Виды и комплектность конструкторских документов на стенд для исследования работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем электроприводов с регуляторами частоты были составлены с учетом требований Технического задания и ГОСТ 2.102-2013.

После того как было приобретено необходимое оборудование и созданы основные узлы стенда, стало возможно приступить к скрупулезному процессу отладки программного обеспечения системы управления. Первым шагом в данном направлении явилась программная реализация испытаний. Программа испытаний включает:

- проверку функционирования системы управления;
- проверку функционирования силовых элементов преобразователя частоты.

При этом каждый из двух пунктов включает множество отдельных испытаний (проверка функционирования преобразователя, испытание на нагрев, определение значения КПД и т.д.)

Постоянное совершенствование алгоритма управления стендом привела к реализации требуемого программного кода.

На следующем этапе работ был изготовлен испытательный стенд и разработана методика и программа испытаний, проводились испытания.

Методика и программа проведения испытаний разрабатывались на основе требований производителей преобразователей частоты и согласно регламентам, прописанным в ГОСТ 26567-85, ГОСТ 17441-84, ГОСТ 27.410-87 и ГОСТ 16962.2-90. Пример схемных решений, обеспечивающих процесс проведения испытаний, рекомендуемых такими производителями преобразователей частоты как Mitsubishi Electric и Hyundai показан на рисунке 2, из которого видно, что общая структура испытательного стенда соответствует требованиям производителей.

Согласно разработанной методике испытаний, стенд выполняет проверку следующих параметров преобразователя частоты:

- передача данных по сети *ModBus*;
- измерение напряжения в цепи постоянного тока;
- проверка времени работы преобразователя;

- проверка времени включения преобразователя;
- проверка неисправностей, выявленных преобразователем при самотестировании;
- разгон привода до номинальной скорости вращения;
- остановка и реверс привода;
- проверка системы защиты от обрыва фаз;
- проверка системы защиты от перегрузки;
- испытание на нагрев;
- определение КПД;
- испытание на кратковременное воздействие повышенного напряжения;
- испытание на кратковременное воздействие пониженного напряжения;
- измерение входного напряжения;
- измерение выходного напряжения;
- измерение входного тока;
- измерение выходного тока;
- измерение входной мощности;
- измерение выходной мощности;
- измерение коэффициента входной мощности;
- измерение коэффициента выходной мощности;
- определение значений установившегося отклонения выходного переменного напряжения;
- измерение частоты выходного напряжения;
- определение отношения выходного напряжения к частоте;
- определение гармонических составляющих выходного напряжения;
- определение искажений напряжения входной электрической цепи, вносимых преобразователем;
- определение значения коэффициента мощности;
- определение значения коэффициента небаланса напряжений трехфазного тока;
- проверка правильности функционирования системы управления и состояния силовых ключей преобразователя.

Для всех проверяемых параметров установлены величины предельного отклонения и при наличии отклонения по любому параметру принимается решение о выбраковке испытываемого преобразователя частоты.

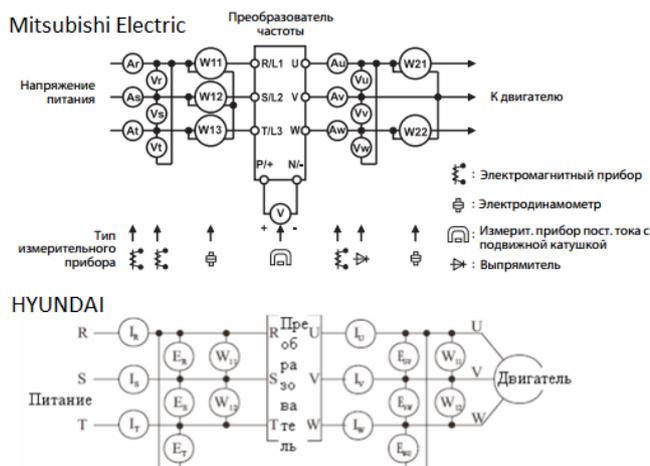


Рис. 2. Рекомендуемые схемы измерения параметров преобразователей частоты

Fig. 2. Recommended schemes for measuring the parameters of frequency converters

### Результаты

Испытательный стенд изготовлен на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский государственный энергетический университет» из материалов, приобретенных у отечественных поставщиков. Все материалы изготовлены промышленно (рис. 3).



Рис. 3. Общий вид стенда для исследования работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем электроприводов с регуляторами частоты

*Fig. 3. General view of the stand for the study of the operability and quality of functioning of electrical complexes and electric drive systems with frequency regulators*

В ходе проведения работ существенной доработке подверглись изделия, функционал которых влияет на реализацию принятой методики проведения испытаний.

Изменение величины нагрузки на двигатель осуществляется регулированием напряжения возбуждения нагрузочного генератора, которое изменяется при помощи регулируемого источника выполненного на основе ЛАТРа (Лабораторный автотрансформатор регулируемый) с встроенным в него электроприводом, выполняющим команды системы управления стенда (рис. 4). В результате применения данного устройства появилась возможность автоматического изменения величины нагрузки исследуемого преобразователя частоты на подключенном к нему электромашином преобразователе.

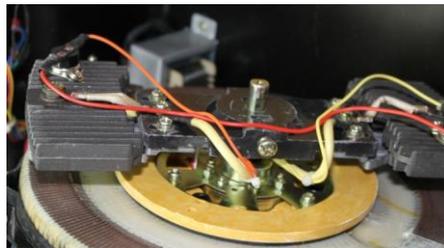


Рис. 4. ЛАТР Энергия TDGC2

*Fig. 4. LATR Energy TDGC2*

В качестве регулируемого источника напряжения, выбран промышленный стабилизатор напряжения, для которого были изготовлены элементы системы управления, позволяющие устанавливать требуемый уровень напряжения на выходе прибора. Устройство по командам системы управления выдает пять уровней напряжения:

- номинальное 380В
- повышенное 400В (+5%)
- высокое 420 В (+10%)
- пониженное 360В (-5%)
- низкое 340 В (-10%)

Система управления стенда собрана из элементов автоматического управления, подчиненных центральному процессору, и вспомогательных устройств.

На последнем этапе работ была осуществлена доводка испытательного стенда под технологические требования Заказчика. В ходе проведения испытаний, а также в результате экспертного обмена мнениями с представителями Заказчика было принято решение о доработке и (или) усовершенствовании отдельных механизмов, узлов и систем стенда для исследования работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем электроприводов с регуляторами частоты.

Подключение частотных преобразователей оказалось несколько неудобно для эксплуатации. Поэтому были использованы новые силовые разъемы марки ССИ-214(рис. 5) и 32А 3Р+N+E IP44 (рис. 6).



Рис. 5. Розетка переносная ССИ-214 на испытательном стенде *Fig. 5. Portable socket SSI-214 on the test bench*



Рис. 6. Вилка кабельная 32А 3P+N+E IP44 на ПЧ *Fig. 6. Cable plug 32A 3P+N+E IP44 on the IF*

Силовые штепсельные разъемы незаменимы при эксплуатации внутри помещений и на открытом воздухе совместно с мобильным электрооборудованием с кабельной системой питания и стационарным электрооборудованием однофазного и трехфазного исполнения. Подходят для подключения строительного электрооборудования и электроинструмента, станков и другого промышленного оборудования и т.д.

Корпуса и изолирующие детали, несущие токоведущие части силовых разъемов выполнены из термостойких и самозатухающих материалов. Крышки обеспечивают защиту от попадания внутрь разъема пыли, влаги и надежно закреплены. Пружины защищены от коррозии. Винты, применяемые для механических и электротехнических соединений, защищены от самоотвинчивания. Имеется возможность эксплуатировать во влажной среде (IP44).

Были выявлены недостатки месторасположения *USB* разъёма, необходимого для подключения внешнего *USB*-флеш-накопителя. Поскольку разъем находился внутри шкафа, оператору приходилось открывать его каждый раз, когда требовалось снятие данных о результатах испытаний. Для устранения данного недостатка *USB* разъем был перенесен на внешнюю стенку шкафа (рис. 7), что обеспечило быстрый и безопасный доступ к *USB*-флеш-накопителю.

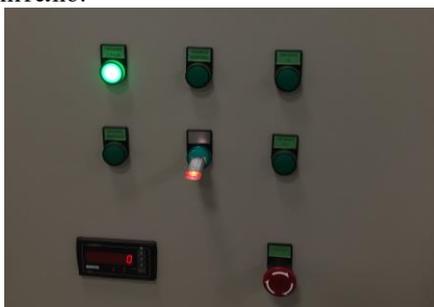


Рис. 7. *USB*-флеш-накопитель на испытательном стенде *Fig. 7. USB flash drive on the test bench*

Оформление отчета в формате *TXT* (*Plain Text File*) не соответствует требованиям по защите информации, кроме того, при обмене данными между компьютерами

различных платформ возможны конфликты кодировок и *TXT* не поддерживает стили текста и графику. Поэтому было принято решение поменять формат вывода отчета на *PDF (Portable Document Format)*.

Файл *TXT* – стандартный текстовый документ *Windows*. Содержит текст без форматирования. Может быть открыт любой программой для работы с текстом. Самая простая и доступная - Блокнот *Windows*, текстовые файлы по умолчанию ассоциированы именно с ней. Текстовые файлы также открывают и большинство других программ, например, любые браузеры - *Internet Explorer*, *Chrome* или *Firefox*. Не является проблемой открытие текстовых файлов и на мобильных устройствах, в других операционных системах.

*Portable Document Format (PDF)* – межплатформенный формат электронных документов, разработанный фирмой *Adobe Systems, INC (USA, California)* с использованием ряда возможностей языка *PostScript*. В первую очередь предназначен для представления полиграфической продукции в электронном виде. Для просмотра существует множество программ, а также официальная бесплатная программа *Adobe Reader*. Значительное количество современного профессионального печатного оборудования имеет аппаратную поддержку формата *PDF*, что позволяет производить печать документов в данном формате без использования какого-либо программного обеспечения. Традиционным способом создания *PDF*-документов является виртуальный принтер, то есть документ как таковой готовится в своей специализированной программе – графической программе или текстовом редакторе, САПР (Система автоматизированного проектирования) и т.д., а затем экспортируется в формат *PDF* для распространения в электронном виде, передачи в типографию и т.п. *PDF* с 1 июля 2008 года является открытым стандартом *ISO 32000*.

Формат *PDF* имеет собственные технические форматы для полиграфии: *PDF/X-1a*, *PDF/X-3*. Включает механизм электронных подписей для защиты и проверки подлинности документов. В этом формате распространяется большое количество сопутствующей документации.

В результате эксплуатации компьютера с сенсорным экраном были выявлены ограничения эксплуатационных характеристик. Было принято решение о применении дополнительного персонального компьютера (нетбука), что позволило модернизировать программный продукт и существенно усовершенствовать стенд. Кроме того, это позволит удаленно (через Интернет) вносить корректировки в программу и алгоритм работы стенда.

Стандарты отдельной продукции, применяемой в энергохозяйстве, не соответствуют общепринятым промышленным стандартам. В связи с этим в меню программы стенда был добавлен пункт, позволяющий проводить измерения в ручном режиме.

В связи с нахождением электротехнического оборудования на неровной поверхности, либо на поверхности в теле которой смонтировано нагревательное оборудование, монтаж электроагрегатов к полу невозможен. Принято решение об установке рамы на дополнительную фундаментную часть.

Учитывая пожелания Заказчика, была проведена модернизация программного продукта (рис. 8).

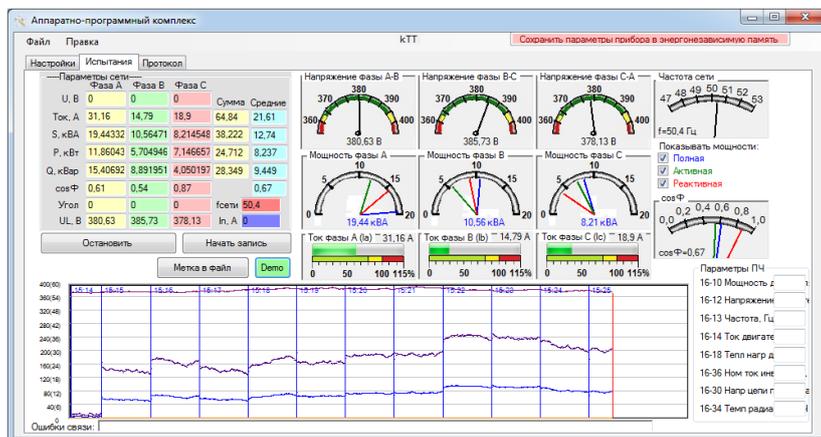


Рис. 8. Работа программы при испытании

Fig. 8. Operation of the program during testing

В ходе проведения различных этапов работ нами был проведен анализ методов испытаний частотных регуляторов, определены задачи исследования и методы их решения, выбрано оборудование и определены алгоритмы управления стендом. Была разработана конструкторская документация, произведена отладка программного обеспечения, разработаны программа и методики испытаний частотных преобразователей. Разработан стенд для исследования работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем электроприводов с регуляторами частоты, прошедших капитальный ремонт.

Дальнейший опыт эксплуатации показал, что разработанный и изготовленный стенд полностью решает поставленные перед ним задачи.

### **Выводы**

В результате проделанной работы установлено:

1. Частотные регуляторы, прошедшие капитальный ремонт, необходимо проверять на предмет работоспособности и соответствия характеристикам до монтажа на месте эксплуатации. Лучше всего для этого подходят тестирования на испытательном стенде, установленном на ремонтной базе. Это в свою очередь позволяет снизить затраты на монтажно-демонтажные работы и сократить расходы, связанные с простоем оборудования.

2. Из основных причин выхода из строя преобразователей, можно отметить ошибки проектирования, ошибки монтажа, ненормальные параметры питающего напряжения и нарушение условий эксплуатации, что в свою очередь влечет за собой отказы силовой части (*IGBT*-модули, входные выпрямители, конденсаторы звена постоянного тока и др.); отказы в цепях управления (платы управления силовыми модулями, плата контроллера, платы интерфейсов и др.); «отказы» программного обеспечения (сбои вследствие выхода из строя микросхем памяти); отказы в системе охлаждения (выход из строя подшипников вентиляторов, трансформаторов и преобразователей питания вентиляторов, загрязнение вентиляционных каналов).

3. Установлено, что испытания преобразователей необходимо проводить по разработанной методике в соответствии с требованиями ГОСТ 26567-85, ГОСТ 17441-84, ГОСТ 27.410-87, ГОСТ 16962.2-90.

4. Основой испытательного стенда является отечественное оборудование производства компании «ОВЕН» и «Энергия», работающие на основе алгоритмов, написанных в среде программирования *CoDeSys* и использующих для обмена данными между отдельными элементами протокол связи *ModBus*.

5. Разработанный стенд представляет собой отдельное устройство с силовой частью, реализующей функции подачи питания и защиты, и системой управления, включающую в себя сенсорный дисплей управления, осуществляющую управление всеми узлами стенда.

### **Литература**

1. Цветков А.Н., Корнилов В.Ю., Сафин А.Р., и др. Разработка стенда для исследования электроприводов станков-качалок // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. 2020. № 4. С. 364-375.

2. Цветков А.Н., Корнилов В.Ю., Сафин А.Р., и др. Управляющая измерительно-информационная система экспериментального стенда // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. № 4. С. 88-98.

3. Ившин И.В., Сафин А.Р., Петров Т.И., и др. Разработка и реализация испытательного стенда для исследования характеристик синхронного электродвигателя // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2018. № 3 (39). С. 45-55.

4. Мустафа Г.М., Гусев С.И., Кузиков С.В., и др. Комбинированный преобразователь частоты для плавного разгона асинхронных электроприводов с тяжёлыми условиями пуска // Электротехника. 2018. № 4. С. 70-75.

5. Макаров В.Г., Цвенгер И.Г., Толмачева А.В., и др. Моделирование системы преобразователь частоты - асинхронный двигатель (пч-ад) в программном пакете LTSPICE // Вестник Технологического университета. 2019. № 7. С. 133-138.

6. Дунаев А.М. Процедура построения оптимального логического алгоритма диагностирования // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. № 9 (140). С. 82-90.

7. Новаков А.В. Система управления нагрузочным устройством для исследования электроприводов с преобразователем частоты // Известия Тульского государственного

университета. Технические науки. 2021. № 3. С. 79-85.

8. Омельченко Е.Я., Белый А.В., Енин С.С., и др. Энергоэффективные испытательные стенды для электродвигателей // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 3 (40). С. 12-19.

9. Lillo A.V., Skakun A.D. Development of the three-phase active voltage rectifier // Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIConRus. 2021. С. 1000-1003.

10 Novotnak J., Oravec M., Hijj J. Slip control by identifying the magnetic field of the elements of an asynchronous motor // SAMI 2021 - IEEE 19th World Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics, Proceedings. 19. 2021. С. 273-277.

11. Al-Mahturi F.S., Samokhvalov D.V., Jaber A.I. Sensorless load torque control of BLDC machine // Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIConRus 2021. 2021. С. 782-785.

12. Kozhanov R.V., Mirgorodskaya E.E. Methods of frequency control as an indicator electricity quality control system // Current Trends in History, Culture, Science and Technology. Саратов, 2021. С. 54-56.

13. Klimash V.S., Petuhov A.V. Electric drive with common rectifier and individual inverters for asynchronous electric motors of woodworking line // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2019. 2019. С. 8934051.

14. Sen'kov A.P., Dmitriev B.F., Kalmykov A.N., Tokarev L.N. Ship unified electric-power systems // Russian Electrical Engineering. 2017. Т. 88. № 5. С. 253-258.

15. Al-Mashakbeh A.S., Mamchur D., Kalinov A. A diagnostic of induction motors supplied using frequency converter basing on current and power signal analysis // Przegląd Elektrotechniczny. 2016. Т. 92. № 12. С. 5-8.

16. Udovichenko A.V., Kovetskaya A.D. AC voltage regulators review // International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM. 22. Сеп. "2021 IEEE 22nd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials, EDM 2021 - Proceedings" 2021. С. 324-330.

#### Авторы публикации

**Гибадуллин Рамил Рифатович** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

**Низамиев Марат Фирденантович** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

**Ившин Игорь Владимирович** – д-р. техн. наук, профессор, проректор по науке и коммерциализации, Казанский государственный энергетический университет.

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

**Владимиров Олег Вячеславович** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

**Шакурова Зумейра Мунировна** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

#### References

1. Tsvetkov AN, Kornilov VYu, Safin AR, et al. Development of a stand for the study of electric drives of rocking machines. *Vestnik MSTU*. Proceedings of the Murmansk State Technical University. 2020;4:364-375.

2. Tsvetkov AN, Kornilov VYu, Safin AR, et al. The control measuring and information system of the experimental stand. *Izvestia of higher educational institutions. Energy problems*. 2020;4:88-98.

3. Ivshin IV, Safin AR, Petrov TI, et al. Development and implementation of a test bench to study the characteristics of a synchronous electric motor. *Bulletin of KSPEU*. 2018;3 (39):45-55.
4. Mustafa GM, Gusev SI, Kuzikov SV, et al. Combined frequency converter for smooth acceleration of asynchronous electric drives with severe start-up conditions. *Electrical engineering*. 2018;4:70-75.
5. Makarov VG, Tsvenger IG, Tolmacheva AV, et al. Simulation of the frequency converter - asynchronous motor (if-ad) system in the LTSPICE software package. *Bulletin of the Technological University*. 2019;7:133-138.
6. Dunaev AM. Procedure for constructing an optimal logical algorithm for diagnosis. *Bulletin of Irkutsk State Technical University*. 2018;9 (140):82-90.
7. Novakov AV. Load device control system for the study of electric drives with a frequency converter. *Proceedings of Tula State University. Technical sciences*. 2021;3:79-85.
8. Omelchenko EYa, Bely AV, Enin SS, et al. Energy-efficient test benches for electric motors. *Electrotechnical systems and complexes*. 2018;3 (40):12-19.
9. Lillo AV, Skakun AD. *Development of a three-phase active voltage rectifier*. Proceedings of the IEEE 2021 Conference of Young Researchers in the Field of Electrical Engineering and Electronics, ElConRus. 2021. pp. 1000-1003.
10. Novotnak J, Oravets M, Hijj J. *Slip control by identifying the magnetic field of asynchronous motor elements*. SAMI 2021. 19th IEEE World Symposium on Applied Machine Intelligence and Computer Science, Materials. 19. 2021;19:273-277.
11. Al-Mahturi FS, Samokhvalov DV, Jaber AI. *Load torque control without BLDC machine sensors*. Proceedings of the IEEE 2021 Conference of Young Researchers in the field of electrical engineering and electronics, ElConRus 2021. 2021;782-785.
12. Kozhanov RV, Mirgorodskaya EE. Methods of frequency regulation as an indicator of an electric power quality control system. *Modern trends in history, culture, science and technology*. Saratov, 2021. pp. 54-56.
13. Klimash VS, Petukhov AV. *Electric drive with a common rectifier and individual inverters for asynchronous electric motors of a woodworking line*. International Multi-conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, Fareastcon 2019. 2019. pp. 8934051.
14. Senkov AP, Dmitriev BF, Kalmykov AN, Tokarev LN. Ship unified electric power systems. *Russian Electrical Engineering*. 2017;88(5):253-258.
15. Al-Mashakbe AS, Mamchur D, Kalinov A. Diagnostics of asynchronous motors powered by a frequency converter based on the analysis of current and power signals. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2016;92(12):5-8.
16. Udovichenko AV, Kovetskaya AD. *Overview of AC voltage regulators*. International Conference of Young Specialists in Micro/Nanotechnology and Electronic Devices, EDM. 22. Ser. "2021 IEEE 22nd International Conference of Young Specialists in the Field of Electronic Devices and Materials, EDM 2021 - Materials" 2021. pp. 324-330.

#### **Authors of the publication**

**Ramil R. Gibadullin** – Kazan State Power Engineering University.

**Marat F. Nizamiev** – Kazan State Power Engineering University.

**Igor V. Ivshin** – Kazan State Power Engineering University.

**Alexey N. Tsvetkov** – Kazan State Power Engineering University.

**Oleg V. Vladimirov** – Kazan State Power Engineering University.

**Zumeira M. Shakurova** – Kazan State Power Engineering University.

**Получено** 31.02.2022г.

**Отредактировано** 14.03.2022г.

**Принято** 21.03.2022г.