

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ВКЛЮЧЕНИЯ ГЕНЕРИРУЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ПАРАЛЛЕЛЬНУЮ РАБОТУ С ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ

Фёдорова В.А.¹, Кириченко В.Ф.¹, Глазырин Г.В.¹

¹Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия
win.victoria08@mail.ru

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Синхронизация – это алгоритм действий по включению синхронных генераторов на параллельную работу с энергосистемой, является неотъемлемой частью процесса производства электроэнергии. На практике процесс синхронизации сопряжен с некоторыми трудностями. Разработанное автоматическое устройство синхронизации является цифровым и интегрируется в микропроцессорный терминал комплекса КПА-М, позволяя решить возникающие проблемы посредством выполнения синхронизации различными методами, в том числе разработанным методом ускоренной синхронизации. **ЦЕЛЬ.** Создать комплексную автоматизированную систему синхронизации на базе микропроцессорного терминала КПА-М с вариативностью используемых методов. Проанализировать существующие устройства синхронизации, синтезировать традиционные методы синхронизации, на их базе создать нетрадиционный промежуточный метод и интегрировать его в автоматизированную систему. Разработать алгоритмы работы измерительного и логического органов, а также органа управляющих воздействий системы синхронизации. Провести экспериментальную проверку алгоритмов подачи реальных сигналов от датчиков напряжения на физической модели с вращающейся синхронной машиной (тестируемый генератор мощностью 12 кВт). **МЕТОДЫ.** Проблема исследования изучена с использованием теоретических и практических подходов. Теоретические методы – анализ, синтез и классификация. Практические методы – моделирование в среде MatLab®, сравнение, эксперимент, наблюдение. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** В статье представлено описание архитектуры, принципов построения, выбора уставок системы синхронизации, а также взаимодействия её логической части со смежными блоками (измерительным блоком, блоком выходных воздействий). Работа дает исчерпывающее описание настройки системы и интеграции её измерительной и логической части в микропроцессорный терминал КПА-М с последующим испытанием работоспособности частей на физическом объекте. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Разрабатываемая система обладает расширенным по сравнению с аналогами функционалом, позволяя использовать традиционный метод точной синхронизации и разработанный метод ускоренной синхронизации. Прогнозируется снижение капитальных затрат на системы автоматики, так как одно устройство обеспечивает синхронизацию на нескольких выключателях и уменьшение издержек на эксплуатацию генератора (ТОиР), поскольку при включении подходящими методами части машины не подвержены недопустимым термическим и механическим воздействиям. Разработка актуальна для ликвидации аварийных ситуаций в энергосистеме. Социальная значимость проекта заключается в исключении человеческого фактора и необходимости высокой квалификации персонала для ручного осуществления процесса. Перспектива применения разработки – в учебном процессе университета и на реальных объектах энергетики, в частности на крупных синхронных генераторах.

Ключевые слова: синхронизация; параллельная работа; синхронный генератор; устойчивость энергосистемы; автоматическое регулирование; электромагнитные переходные процессы.

Благодарности: Исследование, по результатам которого подготовлена статья, выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-79-00181).

Для цитирования: Фёдорова В.А., Кириченко В.Ф., Глазырин Г.В. Разработка системы

автоматического включения генерирующего оборудования на параллельную работу с электроэнергетической системой // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 4. С. 3-17. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-4-3-17.

DEVELOPMENT OF THE AUTOMATIC SYSTEM FOR SWITCHING ON THE GENERATING EQUIPMENT FOR PARALLEL OPERATION WITH THE ELECTRIC POWER SYSTEM

VA. Fyodorova¹, VF. Kirichenko¹, GV. Glazyrin¹

¹Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

¹win.victoria08@mail.ru

Abstract: *RELEVANCE.* Synchronization is an algorithm of actions to switch on synchronous generators for parallel operation with the power system and is an integral part of the power generation process. In practice, the process of synchronization involves some difficulties. The developed automatic synchronization device is digital and is integrated into the microprocessor terminal of the CPA-M complex, allowing to solve the arising problems by means of synchronization using different methods, including the developed method of accelerated synchronization. *THE PURPOSE.* Create a comprehensive automated synchronization system based on the CPA-M microprocessor terminal (manufactured by a Novosibirsk company) with a variability of methods. Analyze existing synchronization devices, synthesize traditional synchronization methods, create a non-traditional intermediate method on their basis and integrate it into the automated system. Develop algorithms for the measuring and logical units, as well as for the synchronization system output unit. Experimental testing of algorithms by feeding real signals from voltage sensors on a physical model with a rotating synchronous machine (12 kW generator under test). *METHODS.* The problem of research studied using theoretical and practical approaches. Theoretical methods - analysis, synthesis and classification. Practical methods - modeling in MatLab® environment, comparison, experiment, observation. *RESULTS.* The paper describes the architecture, construction principles, settings selection of the synchronization system, as well as the interaction of its logical part with adjacent units (measuring unit, output unit). The work gives a comprehensive description of the system setup and integration of its measuring and logic parts into the CPA-M microprocessor terminal with a test on a physical object. *CONCLUSION.* The system has extended functionality compared to analogs, allowing the use of traditional methods and the developed method of accelerated synchronization. The results predict reduction of capital costs for automation systems, as one device provides synchronization on several circuit breakers and reduction of generator operation costs, as using this system, machine parts exposed to unacceptable thermal and mechanical effects. The development is relevant for the elimination of emergencies in the power system and reducing thermal and dynamic impacts on the generator. The social importance of the project is the exclusion of the human factor. The prospect of using the development - in the educational process of the university and at real power facilities, in particular on large synchronous generators.

Keywords: synchronization; parallel operation; synchronous generator; power system stability; automatic regulation; electromagnetic transients.

Acknowledgments: The reported study was supported by Russian Science Foundation, research project No. 22-79-00181.

For citation: Fyodorova VA, Kirichenko VF, Glazyrin GV. Development of the automatic system for switching on the generating equipment for parallel operation with the electric power system. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023;25(4):3-17. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-4-3-17.

Введение (Introduction)

Сегодня электрическая энергия является субститутотом без аналогов. Электроэнергетика России построена таким образом, что наибольший процент электроэнергии вырабатывается синхронными генераторами на электростанциях, объединенных в электроэнергетические системы (ЭЭС). Одна из операций постоянной эксплуатации вращающихся синхронных машин — синхронизация. Синхронизация —

это процесс, который подготавливает генератор к его корректному включению на параллельную работу с остальными частями электрической сети [1]. При синхронизации определенным образом изменяются режимные параметры синхронной машины (напряжение, частота и фаза) для их уравнивания с аналогичными параметрами эквивалентного генератора сети. Данный процесс происходит при любом включении генератора: при плановом, аварийном или при включении после капитального ремонта [2–4].

Данная статья посвящена исследованию процесса синхронизации и особенностей конструирования устройств для её выполнения. Проблема исследования заключается в отсутствии среди имеющихся синхронизаторов полноценной автоматической мультисистемы синхронизации, способной функционировать в условиях неопределенности режима ЭЭС. Дополнительное ограничение накладывает необходимость корректного функционирования подобной системы как в условиях нормального, так и вероятного аварийного режима работы ЭЭС. При этом автоматизированная система синхронизации должна рассматриваться в контексте использования для повышения надёжности электроэнергетических систем при её применении для ликвидации аварийных ситуаций, таких как снижение частоты (небаланс активной мощности). Возможность использования системой не только традиционных методов синхронизации позволит при необходимости производить быстрый пуск резервов генерации, тем самым снижая количество отключаемых для восстановления уровня частоты в энергосистеме потребителей.

На основе описанных проблем определена цель исследования.

Цель исследования – создать комплексную автоматизированную систему синхронизации с вариативностью используемых методов. Система синхронизации должна быть цифровой и интегрирована в микропроцессорный терминал КПА-М (производство новосибирской компании). Цель исследования достигнута с применением теоретических и практических научно-технических решений.

Научная значимость исследования заключается в разработке цифровой математической модели в среде MATLAB и написании алгоритма работы каждого структурного блока системы в виде программного кода. Математическая модель разработана для отображения процесса измерения и фильтрации входных параметров, с которыми в дальнейшем работает устройство в различных режимах. Данное решение необходимо для последующей интеграции системы синхронизации в различные микропроцессорные терминалы.

Теоретическая значимость исследования состоит в разработанных коллективом авторов положениях и структуре алгоритма функционирования предлагаемого метода ускоренной синхронизации (перечень рекомендуемых действий и значений параметров, с которыми генератор должен включаться в сеть). Решение получено на основании анализа особенностей и последствий включения синхронных генераторов на параллельную работу традиционными методами (точной и самосинхронизации), а также математического расчёта термических и динамических воздействий на генератор мощностью 12 кВт при нескольких вариантах синхронизации.

Литературный обзор (Literature Review)

Литературный обзор научных исследований в Российской Федерации (РФ) и за рубежом выполнен по двум ключевым направлениям: методы осуществления и устройства для выполнения процесса синхронизации.

Анализ исследований показал, что большой вклад в конструирование устройств синхронизации нового поколения внесли ученые, разработавшие синхронизаторы с логической частью на базе микроконтроллера PIC. Блок синхронизации выполняет обработку и вычисление необходимых для синхронизации параметров с применением компараторного модуля микроконтроллера [5, 6].

Еще одну систему синхронизации собственной разработки предлагают в [7, 8]. Микросинхронная генераторная установка объединяет блок обработки сигналов и блок усиления мощности, реализующие функции запуска и торможения генератора, автоматического регулирования частоты, напряжения и автоматического квазисинхронизирующего параллельного включения генератора. Мониторинг установки в реальном времени осуществляется PMU Light, а управление процессом — ICIMSG. Кроме того, учеными было разработано соответствующее программное обеспечение.

Также широкое распространение в автономных энергосистемах с большим содержанием микрогенерации получили активные синхронизаторы на базе источников преобразователей напряжения [9–11]. Такие устройства обеспечивают процесс

синхронизации на основе фазовой автоподстройки активным способом, снижая фазовую ошибку, поскольку фаза не регулируется в системе управления генератором, а изменяется в точке его подключения к сети. Таким образом, предложенный синхронизатор может сократить время синхронизации, но не может снизить воздействия на генератор, что является ключевой задачей.

Несмотря на то, что все описанные разработки являются автоматическими, они не объединяют в одном устройстве все необходимые блоки для полноценного выполнения синхронизации. Нерешенным вопросом в приведенных работах является отсутствие данных по эксплуатации предлагаемых устройств в аварийных режимах работы энергосистемы и возможности синхронизации несколькими методами (в том числе нетрадиционными). Таким образом, трудности при разработке темы связаны с выявлением особенностей конструирования устройств синхронизации различных производителей и возможности их применения в нормальных и аварийных режимах работы энергосистемы России.

В части научных исследований о методах осуществления синхронизации ученые РФ, в основном, рассматривают традиционные методы выполнения процесса и их последствия для генерирующего оборудования, а именно переходные процессы, возникающие в генераторе [12, 13]. Различные методы синхронизации оценивались авторами по критериям времени протекания переходного процесса и величине ударного тока, возникающего в момент включения генератора на параллельную работу. Такой вариант оценки является весьма корректным и использован авторами данного исследования.

Авторы [14, 15] исследовали синхронизацию генераторов мощностью от 6 до 1000 МВт и рекомендуют включение методом, исключающим диапазон углов между ЭДС генератора и системы в $130\text{--}140^\circ$, а также при отрицательном угле включения, когда вектор ЭДС генератора отстает от вектора ЭДС энергосистемы.

Зарубежные ученые из Испании исследовали возможность включения генератора на параллельную работу с использованием релейной защиты для предотвращения последствий от неуспешной синхронизации [16]. Данный метод заключается в использовании мгновенной токовой отсечки (МТО), которая активна только во время процесса синхронизации, с уставкой по току ISET выше нормального тока синхронизации на 0,4–0,8 о.е. Защита выводится из действия через регулируемое время TSET (примерно 1–2 секунды) после включения генераторного выключателя. Таким образом, обеспечивается необходимая защита от последствий несинхронного включения, но не предотвращается первопричина возникновения ошибочной синхронизации. Если синхронизация неуспешна, то генераторный выключатель отключается защитой, однако придется еще раз производить синхронизацию, которая снова может быть неуспешной. Решение по использованию устройства синхронизации в совокупности с МТО не представляет принципиально новый подход. Например, на лабораторной электростанции Новосибирского государственного технического университета (НГТУ) установлена и функционирует токовая отсечка генератора, которая надежно срабатывает при неуспешной синхронизации с большой величиной уравнительного тока.

На основании анализа рассмотренных исследований можно сделать вывод, что каждый из традиционных вариантов синхронизации в той или иной мере оказывает влияние на генератор в момент его включения. Для исключения основных недостатков каждого из двух традиционных методов возникает необходимость разработки некоторого модернизированного метода синхронизации. Таким образом, авторами исследования для интеграции в систему синхронизации разработан специальный метод ускоренной синхронизации, являющийся модернизацией двух традиционных методов, обеспечивающий оптимальные условия включения агрегата.

Материалы и методы (Materials and methods)

Объект данного исследования — процесс синхронизации. Предмет исследования — методы его осуществления.

Площадка проведения экспериментов — лабораторная электростанция НГТУ, состоящая из следующего электроэнергетического оборудования: явнополусный синхронный генератор мощностью 12 кВт, приводной электродвигатель постоянного тока, РУ генераторного напряжения и пульт управления. Гипотеза исследования — разрабатываемая система, работая в различных режимах (автономном и ручном), производит синхронизацию с минимальными воздействиями на генераторы (минимальные броски тока в обмотке статора и момент на валу) и корректно выполняет функции даже при аварийных режимах энергосистемы.

Важность исследования состоит в полной автоматизации и упрощении процессов, участвующих в цикле производства электроэнергии, и защите такого важного оборудования, как вращающиеся синхронные машины.

Проблема исследования изучена с использованием теоретических и практических подходов. Теоретические методы – анализ, синтез и классификация. С применением теоретических подходов решены следующие задачи:

1. Проанализированы существующие устройства синхронизации и проведена оценка состояния решаемой проблемы.

2. Синтезированы традиционные методы синхронизации, на их базе создан нетрадиционный промежуточный метод и интегрирован в multifunctionальную систему.

3. Multifunctionальная система синхронизации и её структурные части классифицированы по системным свойствам.

Практические методы – моделирование, сравнение, эксперимент/наблюдение. С применением практических подходов решены следующие задачи:

1. Разработана математическая модель процесса цифровой обработки входных сигналов в среде MATLAB, это помогло обосновать выбора элементов цифрового алгоритма. Ниже будут представлены основные положения его работы.

2. Разработаны алгоритмы работы измерительного и логического органов системы синхронизации и интегрированы в микропроцессорный блок КПА-М. Разработанные алгоритмы сравнены с алгоритмами существующих устройств по критерию точности определения параметров и качества работы системы. Проведена экспериментальная проверка алгоритмов подачи реальных сигналов от датчиков напряжения.

3. Описанные органы системы синхронизации испытаны на физической модели с вращающейся синхронной машиной (тестируемый генератор мощностью 12 кВт) и записью осциллограмм внутренним осциллографом микропроцессорного терминала.

Разработанная система синхронизации должна обладать следующими свойствами:

1. Гибкость – в случае изменения входных параметров система не теряет точность расчёта величин и корректирует выходные управляющие воздействия;

2. Адаптивность – система адаптируется под изменение параметров внешней среды;

3. Функциональность – каждая подсистема выполняет заданную функцию;

4. Эмерджентность – совокупность структурных блоков выполняет цель, которую каждый из блоков не может выполнить по отдельности.

Структурные органы разработанной системы должен обладать следующим функционалом:

1. Процесс синхронизации осуществляется различными способами: автоматически как в нормальном, так и в аварийном режиме, и ручным способом в крайне экстренных условиях, когда режимные параметры энергосистемы быстро изменяются во времени.

2. Процесс синхронизации осуществляется различными методами с учётом внешней ситуации в энергосистеме. При существовании нормального режима синхронизация может быть выполнена традиционными методами, при аварийной ситуации и требовании к быстрому запуску генерирующего оборудования – нетрадиционным промежуточным методом.

3. Возможность оцифровки входных режимных сигналов напряжения. Так как система синхронизации является цифровой входные аналоговые сигналы должны быть конвертированы в цифровые для их дальнейшего использования.

4. Режимные параметры генератора и энергосистемы определяются, не превышая допустимую погрешность, на основе входных оцифрованных сигналов напряжения. Данный процесс выполняется с достаточной точностью даже при отклонении параметров от номинальных значений.

Интерфейс системы должен быть гибким и интуитивно понятным:

5. На дисплее отображены все необходимые параметры: характеристики генератора и ЭЭС, разница в них и формируемые управляющие воздействия. Это нужно для оценки персоналом корректности работы системы и осуществления ручной синхронизации.

На плате дискретных выходов системы должны быть реализованы следующие управляющие воздействия:

6. Формирование сигнала на управление током возбуждения для изменения амплитуды напряжения генератора органом управляющих воздействий (контроллером тока возбуждения).

7. Формирование сигнала на управление частотой вращения первичного двигателя (турбины) для изменения частоты генератора органом управляющих воздействий (контроллером частоты вращения).

8. Формирование сигнала на автоматическое включение генераторного выключателя логическим органом

Результаты (Results)

Разрабатываемая система синхронизации является многофункциональной. Она на основе выборок напряжения генератора и энергосистемы вычисляет определенные параметры, анализирует их и определяет момент времени, в который нужно выдать особое управляющее воздействие.

Обобщенное описание разрабатываемой системы синхронизации и каждой из её структурных частей ранее публиковалось и представлено в статье [1]. В рамках данной статьи требуется частичное повторение информации из [1] для полного и комплексного восприятия работы и взаимодействия органов системы синхронизации. Также следует отметить, что в отличие от [1], представленное в данной работе описание структурных частей системы является развёрнутым и включает в себя анализ функционирования органов в рамках экспериментальной проверки на реальном генераторе мощностью 12 кВт.

Для осуществления комплексного процесса синхронизации система включает в себя следующие структурные части (органы) [17]:

1. Измерительный орган. Орган на основании мгновенных значений напряжения рассчитывает действующие значения напряжений генератора и энергосистемы, их частоты вращения и угол δ между векторами их ЭДС;
2. Логический орган. Орган по полученным из предыдущего органа выборкам определяет разницу в режимных параметрах генератора и энергосети, сравнивает её с интегрированными в блок уставками и принимает определенное решение по управляющим воздействиям;
3. Орган управляющих воздействий. Орган физически формирует выходные воздействия: подает импульсы на генераторный выключатель, либо на регуляторы тока возбуждения (АРВ) и частоты вращения (АРЧ).

Измерительный орган конструктивно разделяется на две части: физическую и программную. Физическая часть – это два измерительных датчика (АЦП), каждый из которых получает выборки мгновенных значений напряжения (рис.1). Для этой функции могут быть применены датчики любого типа с измерениями в классе точности не хуже 0,2 [18, 19].

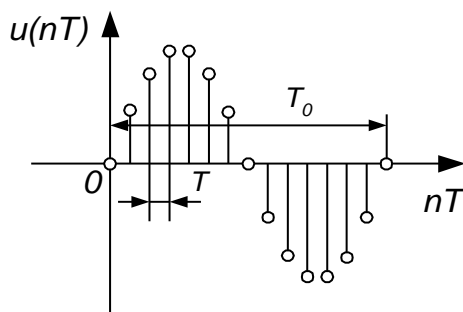


Рис. 1. Процесс цифрового преобразования аналогового синусоидального сигнала

Fig. 1. The process of digitally converting an analog sinusoidal signal

*Источник: составлено автором.

Source: compiled by the author.

Процесс представляет собой получение 24 выборок напряжения за период (частота дискретизации = 1200 Гц) и передачу их в комплекс КПА-М по интерфейсу RS-485.

Далее выборки попадают в программную часть, реализованную в терминале КПА-М с названием РМУ. РМУ – это алгоритм, который осуществляет цифровую фильтрацию сигнала и из одного сигнала напряжения выделяет три контролируемые параметра: амплитуду, частоту и фазу (рис.2). Элементами алгоритма является набор математических операций и цифровой фильтр низких частот (ФНЧ).

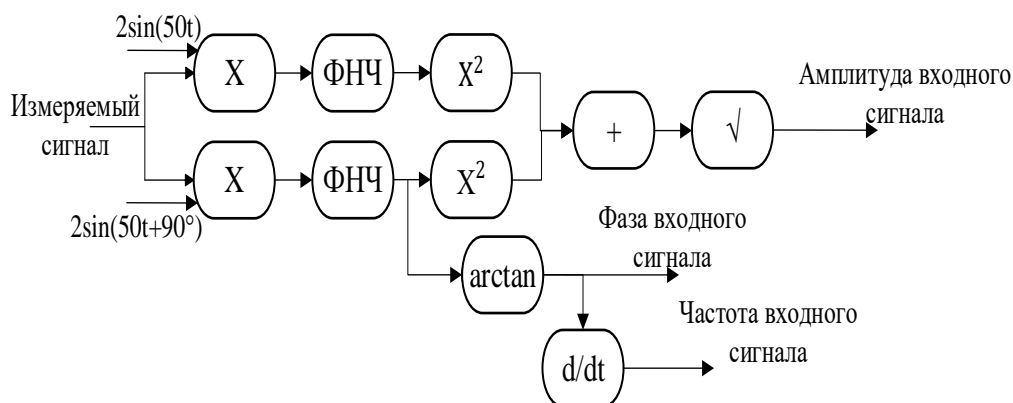


Рис. 2. Процесс цифровой фильтрации сигнала и получения контролируемых параметров

Fig. 2. The process of digital signal filtering and obtaining controlled parameters

*Источник: составлено автором.

Source: compiled by the author.

Работа алгоритма PMU смоделирована в среде MATLAB для визуализации процесса и обоснования выбора типа ФНЧ. Ниже представлены основные положения его работы.

Входной сигнал моделируется с параметрами: амплитуда – 5 В, фаза – 0° , частота – 50 Гц. Сигнал умножается на значения двух опорных синусоид, одна синусоида сдвинута относительно другой на 90° с частотой 50 Гц и амплитудой, равной двум. Одновременно ведутся вычисления в двух каналах.

Сигнал X_1 после вычисления первого канала, имеет двойную частоту и амплитуду, равную $2A = 10$ В (рис. 3). Сигнал X_3 – двойную частоту и амплитуду, равную $A = 5$ В (рис. 3).

В качестве ФНЧ может быть рассмотрено два возможных варианта фильтра. Первый вариант – цифровой фильтр-имитация аналогового R-C фильтра (ФИ). Работа фильтра заключается в том, что при быстрых изменениях входного сигнала, выходной сигнал стремится ко входу по экспоненте с постоянной времени T , и колебания входного сигнала фильтруются. К установке принимается три последовательных фильтра. Массив X_f формируется для фильтрации сигнала X_1 , а массив X_i формируется для фильтрации сигнала X_3 (рис.4).

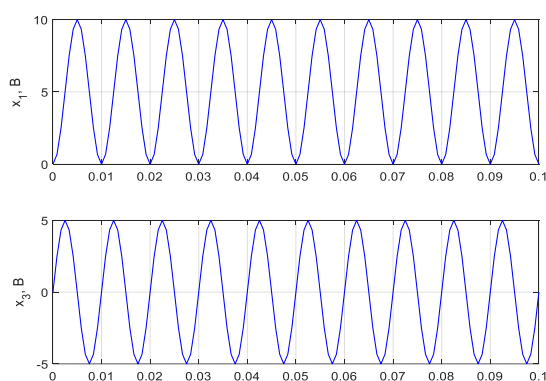


Рис. 3. Сигналы X_1 и X_3 после вычисления первого и второго канала

Fig. 3. X_1 and X_3 signals after calculating the first and second channels

*Источник: составлено автором.

Source: compiled by the author.

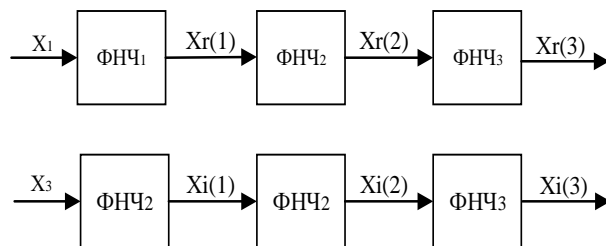


Рис. 4. Структурная схема работы трех последовательных фильтров-имитации

*Источник: составлено автором.

Fig. 4. Structural diagram of the operation of three consecutive simulation filters

Source: compiled by the author.

Второй вариант – цифровой фильтр скользящего среднего. Принцип действия фильтра заключается в усреднении выборок входного сигнала на периоде промышленной частоты. К установке принимаются два фильтра, по одному на период промышленной частоты (рис. 5).

Для данного фильтра формируются два массива размерностью N . При запуске алгоритма на каждом i -м шаге значения будут сдвигаться на одно, то есть второе – на место первого, третье – на место второго и т.д.

Далее необходимо выбрать фильтр, наиболее подходящий для поставленной задачи. Поведение фильтров при входном сигнале частотой 50 Гц (нормальный режим работы энергосистемы) представлен на рис. 6.

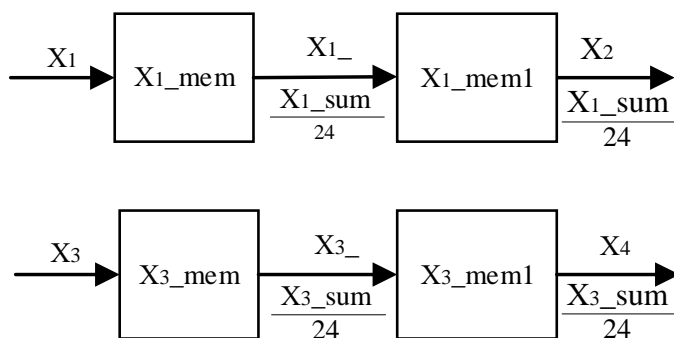


Рис. 5. Структурная схема работы фильтра скользящего среднего

*Источник: составлено автором.

Fig. 5. Block diagram of the moving average filter

Source: compiled by the author

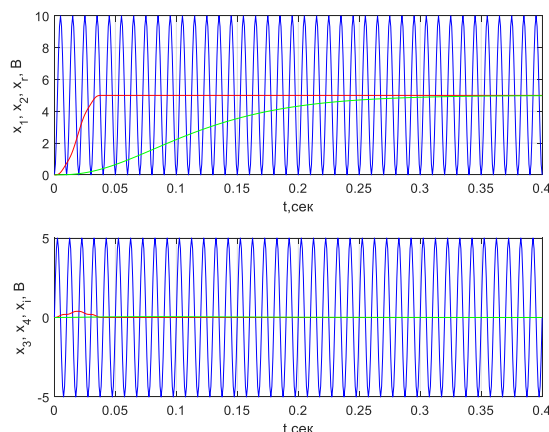


Рис. 6. Поведение фильтров в нормальном режиме работы энергосистемы

*Источник: составлено автором.

Fig. 6. Behavior of filters in normal power system operation

Source: compiled by the author.

При сигнале с частотой 50 Гц оба фильтра работают корректно и преобразуют сигнал X_1 до значения 5 В, а сигнал X_3 до значения 0 В. Работа фильтра-имитации вызывает слишком большую задержку во времени, что недопустимо для функционирования устройства автоматической синхронизации. Далее необходимо проанализировать работу фильтров при входном сигнале в аварийном режиме работы энергосистемы (с частотой 51 Гц), представленную на рис. 7.

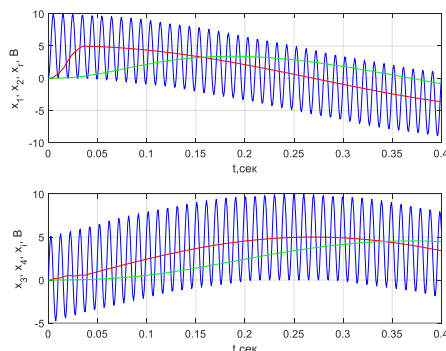


Рис. 7. Поведение фильтров в аварийном режиме работы энергосистемы

Fig. 7. Behavior of filters in emergency operation of the power system

*Источник: составлено автором.

Source: compiled by the author.

При входном сигнале с частотой отличной от номинальной фильтр-имитация ведет себя некорректно и не фильтрует сигнал до нужного значения, в отличие фильтра скользящего среднего. Таким образом, наиболее подходящим для данной задачи оказался фильтр скользящего среднего. Визуализация процесса цифровой обработки входного сигнала в среде MATLAB и визуализация расчёта режимных параметров генератора и энергосистемы приведена на рис. 8.

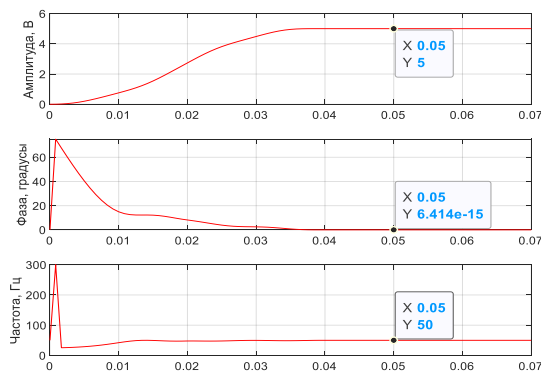


Рис. 8. Результат работы алгоритма по определению необходимых параметров входного сигнала напряжения

Fig. 8. The result of the algorithm for determining the necessary parameters of the input voltage signal

*Источник: составлено автором.

Source: compiled by the author.

Корректность работы всего алгоритма подтверждается полученными значениями амплитуды (5 В), фазы (0 градусы) и частоты входного сигнала напряжения (50 Гц), поскольку они совпадают с параметрами смоделированного сигнала (табл. 1).

Логический орган системы реализован программно, его главная задача – выполнять синхронизацию вариативно (автоматически традиционным и нетрадиционным методами или с переводом системы в режим ручного выполнения). Для логического органа разработан алгоритм с названием «Syn» и интегрирован в микропроцессорный терминал КПА-М.

Традиционный метод, которым система может выполнять синхронизацию,

является метод точной синхронизации (ТС). При методе ТС необходимо обеспечить равенство режимных параметров генератора и энергосистемы. То есть разница амплитуд электродвижущих сил (ЭДС), частот, фаз ЭДС (угол δ между векторами ЭДС) в пределе должны стремиться к нулю [1–3].

Существует еще один традиционный метод синхронизации – самосинхронизация. Выполнение процесса системой данным методом не предусмотрено в следствии большой величины уравнильных токов в момент включения.

Традиционные методы синхронизации не могут обеспечить успешный быстрый запуск генераторов (в аварийном режиме), поэтому возникла необходимость в разработке промежуточного метода синхронизации. Он является усовершенствованием существующих методов. Уставки для данного метода: угол δ в пределах от 0 до 30–40°, ток возбуждения – около 60 % от номинального тока (для тестируемого генератора от 6 до 10 А). Усовершенствованный метод назван ускоренным (УС), его алгоритм выполнения, моделирование и опробование подробно описаны в [1].

Логический орган использует рассчитанные в алгоритме PMU режимные параметры как входные величины, они нужны для получения разницы в параметрах генератора и энергосистемы (угол δ , скольжение s и разницы напряжений ΔU). Эти величины формируют условия включения генератора. Если их значение меньше уставки, то условия включения считаются оптимальными и логический орган формирует выходной сигнал на включение выключателя, что означает окончание цикла синхронизации.

Дополнительно в алгоритм вводятся переменные, отражающие неоптимальные условия включения аналогичные дискретным сигналам (текущее значение контролируемых параметров превышает заданную уставку).

После расчета параметров логический орган приступает к выполнению цикла синхронизации. Все методы синхронизации имеют идентичную структурой выполнения алгоритма и для его успешного окончания должны сочетаться несколько условий [20, 21]. Автоматическая синхронизация выполняется в случае, если:

- Ключ на лицевой панели терминала КПА-М находится в положении «автоматическая точная/ускоренная синхронизация»;
- Отсутствует блокировка по неоптимальным условиям включения. Величина текущих параметров скольжения s , угла δ и ΔU ниже уставок для данного метода;
- Отсутствие блокировки по напряжению (при исчезновении или снижении напряжения энергосистемы ниже 50 % от номинального);
- Нахождение угла опережения в допустимом диапазоне. Команда на включение должна подаваться заблаговременно с некоторым опережением. Это связано с инерционностью и ненулевым временем включения генераторного выключателя.

Величины, рассчитываемые в алгоритме SYN
Values calculated in SYN algorithm

| Величина | Расчётная формула | Единица измерения |
|-----------------------------|----------------------------------------------------------------|-------------------|
| Скольжение s | $s = f_c - f_r$ | Гц |
| Угол δ | $\delta = \varphi_c - \varphi_r$ | ° |
| Угол $\delta_{\text{опер}}$ | $\delta_{\text{опер}} = s \cdot t_{\text{ВВ}} \cdot 2\pi$ | ° |
| ΔU | $\Delta U = U_c - U_r$ | В |
| $s_{\text{неопт}}$ | $s_{\text{неопт}} = s_{\text{max}} < s $ | 1/0 (дискр.) |
| $\Delta U_{\text{неопт}}$ | $\Delta U_{\text{неопт}} = \Delta U_{\text{max}} < \Delta U $ | 1/0 (дискр.) |
| $\delta_{\text{неопт}}$ | $\delta_{\text{неопт}} = \delta_{\text{max}} < \delta $ | 1/0 (дискр.) |

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

Метод ускоренной синхронизации является нетрадиционным и для него к описанному перечню добавляется дополнительное условие:

- Разница текущего тока возбуждения и уставки по току (6 А) не должна составлять более чем 0.5 А. Условие вводится во избежание ситуации синхронизации с пониженным током возбуждения.

Орган управляющих воздействий конструктивно объединяет два типа регуляторов: АРВ и АРЧ. При работе регуляторов в составе системы синхронизации АРВ необходимо работать в режиме выполнения заданий по напряжению и току возбуждения, а регулятору АРЧ – по частоте.

Основная цель взаимодействия регуляторов и логического органа с алгоритмом

синхронизации – приведение объекта (синхронного генератора) к заданному состоянию с режимными параметрами близкими к параметрам энергосистемы (рис. 9).

Логический орган системы формирует два типа выходных сигналов: первый дискретный, разрешающий регуляторам работу в качестве органа управляющих воздействий в составе системы синхронизации, второй тип сигнала – величина, к которой должны быть приближены параметры синхронизируемого генератора (задание на регулятор).

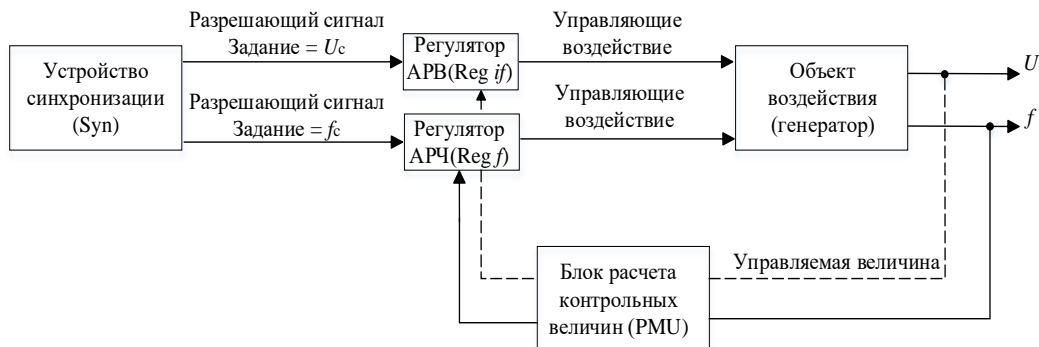


Рис. 9. Совокупность устройства синхронизации и регуляторов APЧ и APB

Fig. 9. A set of synchronization device and regulators of rotational speed and excitation current

*Источник: составлено автором.

Source: compiled by the author.

Обсуждение (Discussions)

После разработки алгоритмов измерительного и логического органов осуществляется их программная реализация на языке программирования C++ и интеграция в терминал КПА-М. Операция интеграции выполнена с помощью формирования и загрузки в комплекс специальных конфигурационных файлов, описывающих группы сигналов, с которыми взаимодействует система синхронизации.

После реализации предложенных алгоритмов была произведена экспериментальная проверка корректности их работы на физической модели — синхронном генераторе мощностью 12 кВт с записью осциллограмм для метода точной и ускоренной синхронизации.

Представленные на рис. 10, 11 осциллограммы охватывают весь процесс синхронизации методом ТС от начала работы системы до втягивания агрегата в синхронизм. Действующее значение напряжения повторяет изменение кривой мгновенных значений. Фаза напряжения генератора изменяется пилообразно, что связано с изменением частоты вращения генератора. Частота генератора незначительно изменяется в течение процесса, а частота вращения эквивалентного генератора энергосистемы постоянна в течение всего времени процесса и составляет 50 Гц. На этапе выполнения цифровой фильтрации входных сигналов метод ускоренной синхронизации не имеет отличительных особенностей от метода ТС.

Измерительный орган работает корректно, поскольку рассчитанные действующие значения повторяют форму мгновенных значений, диапазон изменения фазы не превышает 180 градусов, а отклонение частоты не превышает $\pm 0,5$ Гц.



Рис. 10. Фрагмент осциллограммы с входными

Fig. 10. A fragment of an oscillogram with voltage

сигналами напряжения из алгоритма PMU

input signals from the PMU algorithm

*Источник: составлено автором.

Source: compiled by the author.

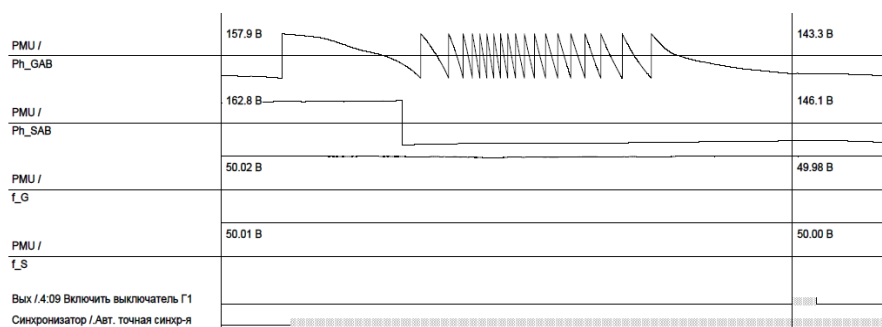


Рис. 11. Фрагмент осциллограммы с входными сигналами фазы и частоты из алгоритма PMU

Fig. 11. A fragment of an oscillogram with input phase and frequency signals from the PMU algorithm

*Источник: составлено автором.

Source: compiled by the author.

На рисунке 12 приведены сигналы, рассчитываемые в алгоритме Syn логического органа на основании режимных параметров из алгоритма PMU (s , ΔU , δ). В момент времени, когда данные сигналы превышают выбранную уставку, формируются дискретные сигналы. Также в алгоритме синхронизации определяется угол опережения, форма которого повторяет форму скольжения.

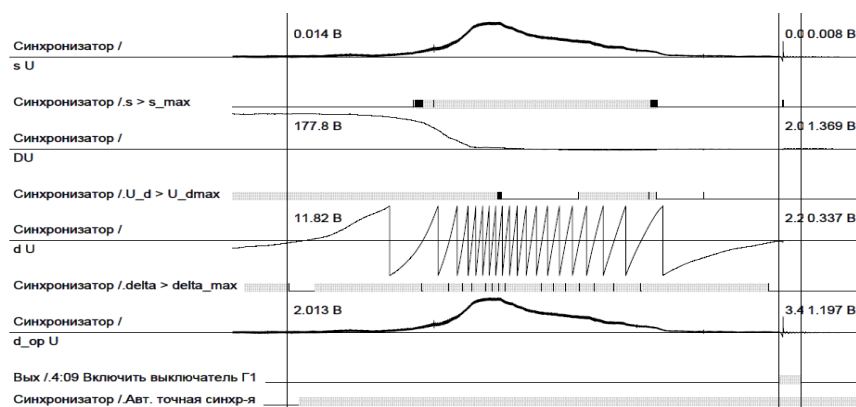


Рис. 12. Фрагмент осциллограммы с внутренними сигналами из алгоритма PMU

Fig. 12. Fragment of an oscillogram with internal signals from the PMU algorithm

*Источник: составлено автором.

Source: compiled by the author.

При выполнении логическим органом синхронизации методом точной синхронизации в момент подачи команды на включение каждая из представленных величин не превышает принятых уставок для данного метода ($s = 0,21$ Гц, $\Delta U = 4,16$ В, $\delta = 7,26^\circ$, $\delta_{\text{опер}} = 30,1^\circ$). Логический орган корректно выдает сигнал на включение и при выполнении метода ускоренной синхронизации ($s = 0,035$ Гц, $\delta = 1,82^\circ$, $\delta_{\text{опер}} = 5,08^\circ$).

Это подтверждает корректность работы логического органа, поскольку он верно идентифицирует оптимальные условия и выдает команду на включение привода генераторного выключателя. После подачи команды ни один из дискретных сигналов неоптимальных условий не формируется.

Заключение (Conclusions)

Проект находится на стадии разработки, для логического и измерительного органов подсистемы сформированы алгоритмы работы. Практическая значимость и ожидаемые характеристики конечного варианта системы синхронизации:

- Расширенный по сравнению с аналогами функционал: использование традиционного метода точной синхронизации и разработанного метода ускоренной синхронизации;

- Автоматизация процесса синхронизации, снижение капитальных затрат на системы автоматики, так как одно устройство обеспечивает синхронизацию на нескольких выключателях;

- Стоимость устройства почти в 3 раза ниже по сравнению с аналогами, поскольку оно является цифровым и интегрируется в микропроцессорный терминал КПА-М, который параллельно может быть использован для решения других задач автоматизации;

- Уменьшение издержек на эксплуатацию генератора (ТОиР) в 1,5 раза, так как при включении подходящими методами части машины не подвержены недопустимым термическим и механическим воздействиям.

Социальная значимость проекта – исключение человеческого фактора и необходимости высокой квалификации персонала для ручного осуществления процесса [1].

Испытание работоспособности частей разрабатываемой системы проведено на генераторе мощностью 12 кВт. Алгоритм измерительного органа показывает корректную работу и высокую точность определения параметров (погрешность не превышает 0,6 %). Алгоритм синхронизации в момент подачи команды на включение верно идентифицирует условия (s , ΔU , δ не превышают принятых уставок). Это подтверждает корректность работы логического органа системы и успешность втягивания генератора в синхронизм.

Перспектива применения разработки – в учебном процессе университета и на реальных объектах энергетики. Потребителями данной системы могут быть электростанции (ТЭЦ, ГЭС и т.д), а также крупные промышленные предприятия с собственной генерацией.

Литература

1. Фёдорова В. А. Разработка автоматического устройства ускоренной синхронизации генераторов // Интеллектуальная электротехника. 2022. № 3. С. 32–48.
2. Фёдорова В. А., Корнилович Д. В., Кириченко В. Ф., Глазырин Г. В. Разработка цифрового устройства синхронизации для автоматического включения в сеть генераторов различными методами // Электроэнергетика глазами молодежи-2021. 12 междунар. научно-техническая конференция. 2022. Ч. 1. С. 193–196.
3. Стогов А.Ю., Беляев А.Н. Повышение динамической устойчивости автономной энергосистемы на основе управления по взаимным параметрам // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. №21(1-2). С. 55-66.
4. Amin M., Rygg A., Molinas M. Self-synchronization of wind farm in an MMC-based HVDC system: A stability investigation // IEEE Transactions on Energy Conversion. 2017. Vol. 32. No. 2. Pp. 458-470.
5. Bekiroglu E., Bayrak A. Automatic synchronization unit for the parallel operation of synchronous generators // IEEE EUROCON 2009. 2009. Pp. 766–771.
6. Bolf A. et al. Synchronization device for the model of distribution grid 22 kV // 2017 6th International Youth Conference on Energy (IYCE). IEEE. 2017. Pp. 1–4.
7. Li H., Zhang H., Xu Q. Design and implementation of integrated control instrument for micro synchronous generation unit // 2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). IEEE. 2017. Pp. 1–6.
8. Lee S. B. et al. Condition monitoring of industrial electric machines: State of the art and future challenges // IEEE Industrial Electronics Magazine. 2020. Vol. 14. No. 4. Pp. 158–167.
9. Shah S. et al. VSC-based active synchronizer for generators // IEEE Transactions on Energy Conversion. 2018. Vol. 33. No. 1. Pp. 116-125.
10. Wen B. et al. Impedance-based analysis of grid-synchronization stability for three-phase paralleled converters // IEEE Transactions on Power Electronics. 2019. Vol. 31. No. 1. Pp. 26-38.
11. Zhan W. et al. Synchronization Process and a Pre-synchronization Method of the Virtual Synchronous Generator // 2020 4th International Conference on HVDC (HVDC). IEEE. 2020. Pp. 197-203.
12. Коновалов Ю. В. и др. Исследование электромеханических комплексов с синхронными генераторами при различных методах синхронизации // Вестник Ангарского государственного технического университета. 2018. №. 12. С. 54–57.
13. Садовский С. А., Алафьева М. А. Исследование переходных процессов при включении синхронных генераторов на параллельную работу // Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. 2017. Т. 1. №. 1. С. 208–215.
14. Углов А. В., Гусева Е. В., Углова М. Б. Влияние факторов синхронизации на качество переходного процесса при включении синхронного генератора на параллельную

работу с энергосистемой // Энергетические установки и технологии. 2017. Т. 3. №. 4. С. 71–76.

15. Ревякин Е. Е., Власова Е. П. Анализ систем автоматики включения синхронных генераторов на параллельную работу // Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе. 2018. С. 303–306.

16. Tian P., Platero C. A., Blázquez F. Protection method for synchronous machine during the paralleling connection process // 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM). IEEE. 2018. Pp. 2385–2390.

17. Фёдорова В. А. Автоматическое устройство для включения в сеть генераторов методом ускоренной синхронизации // Наука. Технологии. Инновации. 15 Всерос. науч. конф. молодых ученых, посвящ. Году науки и технологий в России. 2021. Ч. 4. С. 196–200.

18. Burova A. Reducing the error of digital algorithms for deductive signal processing based on their multi-stage discrete Fourier transform by the difference digital filters // 2020 22th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA). IEEE. 2020. Pp. 1–3.

19. Kovalenko P. Y. et al. Synchrophasor Evaluation based on point-on-wave Measurements // 2020 Ural Smart Energy Conference (USEC). IEEE. 2020. Pp. 155–158.

20. Fyodorova V. et al. Application of Automatic Device for Generator Connection to the Network by Method of Accelerated Synchronization // IEEE 23 International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). 2022. Pp. 461–466.

21. Fyodorova V. et al. Synchronization Digital Device Development for Generators Automatic Connection to the Network by Various Methods // 2021 Ural-Siberian Smart Energy Conference (USSEC). 2021. Pp. 89–93.

Авторы публикации

Фёдорова Виктория Александровна - аспирант, младший научный сотрудник лаборатории ЛДвЭЭС, Новосибирский государственный технический университет. *Email:* win.victoria08@mail.ru. *ORCID:* <https://orcid.org/0009-0005-9607-5713>.

Кириченко Виктор Фёдорович - аспирант, Новосибирский государственный технический университет. *Email:* glazyring@gmail.com.

Глазырин Глеб Владимирович - канд. техн. наук, доцент кафедры электрических станций, Новосибирский государственный технический университет. *Email:* viktorkirichenko-v@mail.ru.

References

1. Fyodorova V. A. Development of automatic device for generator accelerated synchronization. *Smart electrical engineering*. 2022; 3: 32–48.

2. Fyodorova V. A., Kornilovich D.V., Kirichenko V.F., Glazyrin G.V. Synchronization digital device development for generators automatic connection to the network by various methods. *Electric power industry through the eyes of youth-2021. 12 International Scientific and Technical Conference*. 2022. 1: 193–196.

3. Stogov A.Y., Belyaev A.N. Increasing the dynamic stability of an autonomous power system based on control by mutual parameters. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019; 21: 55–66.

4. Amin M., Rygg A., Molinas M. Self-synchronization of wind farm in an MMC-based HVDC system: A stability investigation. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2017; 32: 458–470.

5. Bekiroglu E., Bayrak A. Automatic synchronization unit for the parallel operation of synchronous generators. *IEEE EUROCON 2009*. 2009: 766–771.

6. Bolf A. et al. Synchronization device for the model of distribution grid 22 kV. *2017 6th International Youth Conference on Energy (IYCE)*. 2017: 1–4.

7. Li H., Zhang H., Xu Q. Design and implementation of integrated control instrument for micro synchronous generation unit. *2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*. 2017: 1–6.

8. Lee S. B. et al. Condition monitoring of industrial electric machines: State of the art and future challenges. *IEEE Industrial Electronics Magazine*. 2020; 14: 158–167.

9. Shah S. et al. VSC-based active synchronizer for generators. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2018; 33: 116–125.

10. Wen B. et al. Impedance-based analysis of grid-synchronization stability for three-phase paralleled converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2019. 31: 26-38.
11. Zhan W. et al. Synchronization Process and a Pre-synchronization Method of the Virtual Synchronous Generator. 2020 4th International Conference on HVDC (HVDC). 2020: 197-203.
12. Konovalov U.V. et al. Research of electromechanical complexes with synchronous generators with various methods of synchronization. *Vestnik Angarskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta*. 2018; 12: 54–57.
13. Sadovskij S. A., Alaf'eva M. A. Issledovanie perekhodnykh processov pri vklyuchenii sinhronnykh generatorov na parallel'nuyu rabotu. *Sbornik nauchnykh trudov Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2017; 1: 208–215.
14. Uglov A. V., Guseva E. V., Uglova M. B. Synchronization factors influence on the transitional process quality of synchronous generator powering on parallel work with powerful network. *Power plants and technologies*. 2017; 3: 71–76.
15. Revyakin E. E., Vlasova E. P. Analiz sistem avtomatiki vklyucheniya sinhronnykh generatorov na parallel'nuyu rabotu. *Energoberezhenie i innovacionnye tekhnologii v toplivno-energeticheskom komplekse*. 2018: 303–306.
16. Tian P., Platero C. A., Blázquez F. Protection method for synchronous machine during the paralleling connection process. 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM). 2018: 2385–2390.
17. Fyodorova V. A. Разработка мультифункциональной системы синхронизации генераторов. *Nauka. Tekhnologii. Innovacii. 15 Vserossiyskaya nauchnaya konferenciya molodykh uchennykh*. 2021; 4: 196–200.
18. Burova A. Reducing the error of digital algorithms for deductive signal processing based on their multi-stage discrete Fourier transform by the difference digital filters. 2020 22th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA). 2020: 1–3.
19. Kovalenko P. Y. et al. Synchrophasor Evaluation based on point-on-wave Measurements. 2020 Ural Smart Energy Conference (USEC). 2020: 155–158.
20. Fyodorova V. et al. Application of Automatic Device for Generator Connection to the Network by Method of Accelerated Synchronization. IEEE 23 International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). 2022: 461–466.
21. Fyodorova V. et al. Synchronization Digital Device Development for Generators Automatic Connection to the Network by Various Methods. 2021 Ural-Siberian Smart Energy Conference (USSEC). 2021: 89–93.

Authors of the publication

Viktoriya A. Fyodorova - Novosibirsk state technical university, Novosibirsk, Russia. Email: win.victoria08@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9607-5713>.

Gleb V. Glazyrin - Novosibirsk state technical university, Novosibirsk, Russia. Email: glazyring@gmail.com.

Viktor F. Kirichenko - Novosibirsk state technical university, Novosibirsk, Russia. Email: viktorkirichenko-v@mail.ru.

Шифр научной специальности: 2.4.3. «Электроэнергетика».

Получено 26.06.2023г.

Отредактировано 17.07.2023г.

Принято 24.07.2023г.