

УДК 621.3

DOI: 10.53015/18159958_2025_21_3_28

ОСОБЕННОСТИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ШИННОГО РЕЗЕРВИРОВАНИЯ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ДВУХСТОРОННИМ ПИТАНИЕМ НА ПЛАТФОРМЕ ENGEE

FEATURES OF THE SIMULATION OF THE BUS REDUNDANCY SYSTEM OF THE POWER SUPPLY SCHEME WITH TWO-WAY POWER SUPPLY ON THE ENGEE PLATFORM

©2025

Зацепина Виолетта Иосифовна¹, доктор технических наук,
профессор кафедры электрооборудования
Шачнев Олег Ярославович, кандидат технических наук, доцент кафедры
электрооборудования
Zatsepina Violetta Iosifovna¹, Doctor of Technical Sciences, Professor of the
Department of Electrical Equipment
Shachnev Oleg Yaroslavovich, Candidate of Technical Sciences, Associate
Professor of the Department of Electrical Equipment

Липецкий государственный технический университет, Липецк (Россия)
Lipetsk State Technical University, Lipetsk (Russia)

E-mail: vizatsepina@yandex.ru

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8347-4479>

E-mail: sh.ol.ya@yandex.ru

Аннотация: Данная статья отражает реализацию переключения шинного выключателя для обеспечения питания потребителей в случае вывода в ремонт или отказа одного из силовых трансформаторов. Представлена упрощённая имитационная модель схемы подстанции, которая имеет два силовых трёхобмоточных трансформатора (110/35/10) и четыре секции шин с постоянными потребителями (пара шин на 35 кВ, пара шин на 10 кВ), реализованная на платформе Engage. Особое внимание уделено скриптовой составляющей данной модели на языке Julia, которая обеспечивает логику определения момента безопасного переключения с одной шины на другую. В результате отражены подходы к реализации вышеуказанного действия, какие допущения необходимы для адекватной работы логики модели, а также представлена аргументация проблематики выполнения всей имитационной модели в «едином окне».

Ключевые слова: коммутация, переходные режимы, Engage, Julia, перенапряжения, имитационное моделирование, подстанция, логика.

Для цитирования: Зацепина В.И. Особенности имитационного моделирования системы шинного резервирования схемы электроснабжения с двухсторонним питанием на платформе Engage / В.И. Зацепина, О.Я. Шачнев // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2025. – Т. 21, № 3 (79). – С. 28–39. – DOI 10.53015/18159958_2025_21_3_28.

Abstract: This article reflects the implementation of switching a bus switch to provide power to consumers in the event of a repair or failure of one of the power transformers. A simplified simulation model of a substation circuit is presented, which has two three-winding power transformers (110/35/10) and four bus sections with permanent consumers (a pair of 35 kV buses, a pair of 10 kV

buses) implemented on the Engee platform. Special attention is paid to the scripting component of this model in the Julia language, which provides the logic for determining the moment of safe switching from one side to another. As a result, the approaches to the implementation of the above action are reflected, which assumptions are necessary for the adequate operation of the logic of the model, and the argumentation of the problems of executing the entire simulation model in a "single window" is presented.

Keywords: switching, transient modes, Engee, Julia, overvoltage, simulation, substation, logic.

For citation: Zatsepina V.I. Features of the simulation of the bus redundancy system of the power supply scheme with two-way power supply on the Engee platform / V.I. Zatsepina, O.Ya. Shachnev // Vesti of Higher Educational Institutions of the Chernozem region. – 2025. – Vol. 21, № 3 (79). – P. 28–39. – DOI 10.53015/18159958_2025_21_3_28.

ВВЕДЕНИЕ

Надежность электроснабжения потребителей является одним из ключевых показателей качества работы электроэнергетической системы. По данным ПАО «Россети Центр», около 40 % от общего времени перерывов в подаче электроэнергии обусловлены плановыми работами по техническому обслуживанию и капитальному ремонту трансформаторного оборудования на подстанциях среднего напряжения. Традиционная схема питания с одним трансформатором оставляет потребителей без электроэнергии во время проведения таких работ, что недопустимо для критически важных объектов инфраструктуры и производства.

Рассматриваемая в статье система шинного резервирования потребителей с двухсторонним питанием решает проблему, обеспечивая контролируемый автоматический/полуавтоматический переход питания на резервный источник питания без разрыва подачи электроэнергии. Однако реализация такой системы требует сложного анализа процессов коммутации, включая расчет переходных режимов, оценку перенапряжений и выбор момента безопасного переключения выключателей.

С целью оценки переходных процессов при различных режимах коммутации без риска повреждения оборудования и оптимизации алгоритмов синхронизации перед включением шинных выключателей целесообразно провести имитационное моделирование вышеуказанных процессов.

Традиционные инструменты электротехнического моделирования MATLAB Simulink характеризуются высокой вычислительной сложностью при моделировании,

и интеграция логики управления с физическими процессами в единой визуальной среде часто приводит к избыточной параметризации моделей, затрудняющей интерпретацию результатов, а также к замедлению вычислений из-за необходимости отслеживания множества промежуточных переменных.

Платформа же Engee представляет собой альтернативу MATLAB/Simulink, построенную на основе языка Julia. Данная среда имитационного моделирования обеспечивает скорость, близкую к языку C, что критично для моделирования быстрых переходных процессов в электросетях. Посредством блока Engee Function возможно реализовать алгоритмы синхронизации напрямую в модели, избегая необходимости переключения между средой моделирования и областью Workspace.

Таким образом, целью работы является не только разработка и анализ имитационной модели системы шинного резервирования с двухсторонним питанием, но и реализация логики определения момента безопасного переключения шинных выключателей, т. е. реализация подачи команды на коммутацию выключателя при соблюдении определенных условий.

ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для обеспечения максимальной скорости симуляции и точности вычислений выполним упрощённую систему электроснабжения, которая будет включать в себя два силовых трёхфазных трёхобмоточных трансформатора, запитанных от двух отдельных источников напряжения, затем переходим сразу к секциям шин и потребителям, вы-

полненных по схеме «звезда». Отражение иного оборудования, прямо не влияющего на искомый результат, может замедлить скорость симуляции и усложнить результат.

Имитационная модель содержит следующие блоки:

«ThreePhaseVoltage» — моделирует исходные источники питания.

«Transformers.ThreePhase» — моделирует силовые трансформаторы.

«ThreePhaseRLC» — моделирует сопротивление на шинах.

«WyeConnectedLoad» — моделирует потребителей на шинах.

«ThreePhaseCircuitBreaker» — моделирует межсекционный выключатель.

«Sensors.CurrentVoltage» — выводит мгновенные значения напряжения/токов по фазам.

Построение имитационной модели с физическими связями между блоками приведено на рис. 1.

На рис. 2 отразим среднеквадратичные значения напряжений и токов на фазах при прямом подключении выключателей через блок «Step» (срабатывают при $t = 3$ с.).

Следует отметить, что в момент коммутации наблюдается переходный режим и затем наблюдается установившийся режим объединенных СШ1 и СШ2, СШ3 и СШ4. При этом, измерительное устройство было установлено только в левой части схемы,

чтобы не перегружать исходную имитационную модель.

Далее, нам необходимо указать ключевые параметры для минимизации амплитуды переходных режимов при коммутации секционных выключателей, соединяющих секции шин СШ1 и СШ2 на напряжение 35 кВ, СШ3 и СШ4 на напряжение 10 кВ соответственно. Для этого необходимо обеспечить выполнение следующих условий:

1. Амплитуды напряжений соединяемых шин должны быть идентичны. Рекомендуемый допуск отклонения составляет $\pm 2-5\%$ от номинального значения. В случае несоответствия напряжений возникает реактивная составляющая циркулирующего тока, которая создаёт механические усилия на обмотках трансформаторов и может привести к их повреждению.

2. Частоты напряжений тоже должны быть равны (отклонение в пределах 0,1–0,2 Гц). Неравенство частот может вызвать резонансные колебания в элементах сети, что приведёт к дополнительным потерям и искажению формы напряжения.

3. Фазная последовательность (А-В-С) должна быть одинаковой для обеих систем.

4. Разница угла сдвига фаз между напряжениями на шинах должна быть минимальной (менее $\pm 10-20$ градусов в момент замыкания выключателя).

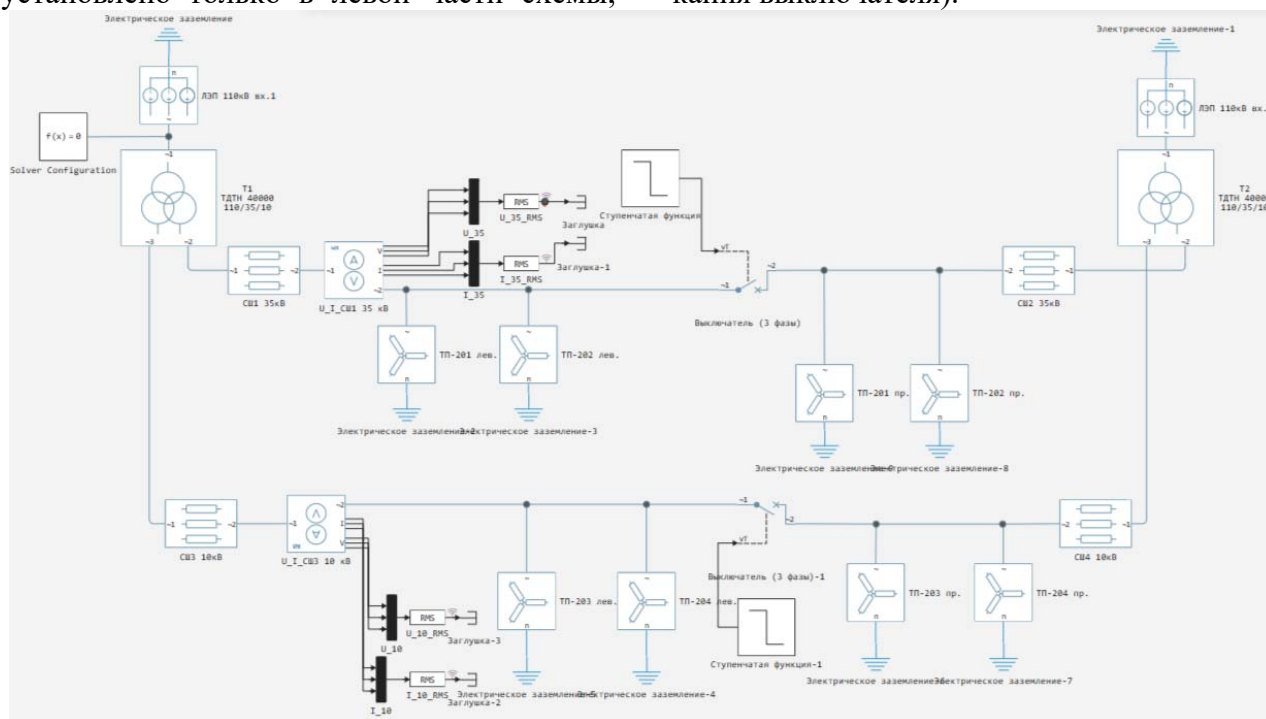


Рис. 1. Имитационная модель рассматриваемой схемы подстанции
Fig. 1. Simulation model of the substation circuit under consideration

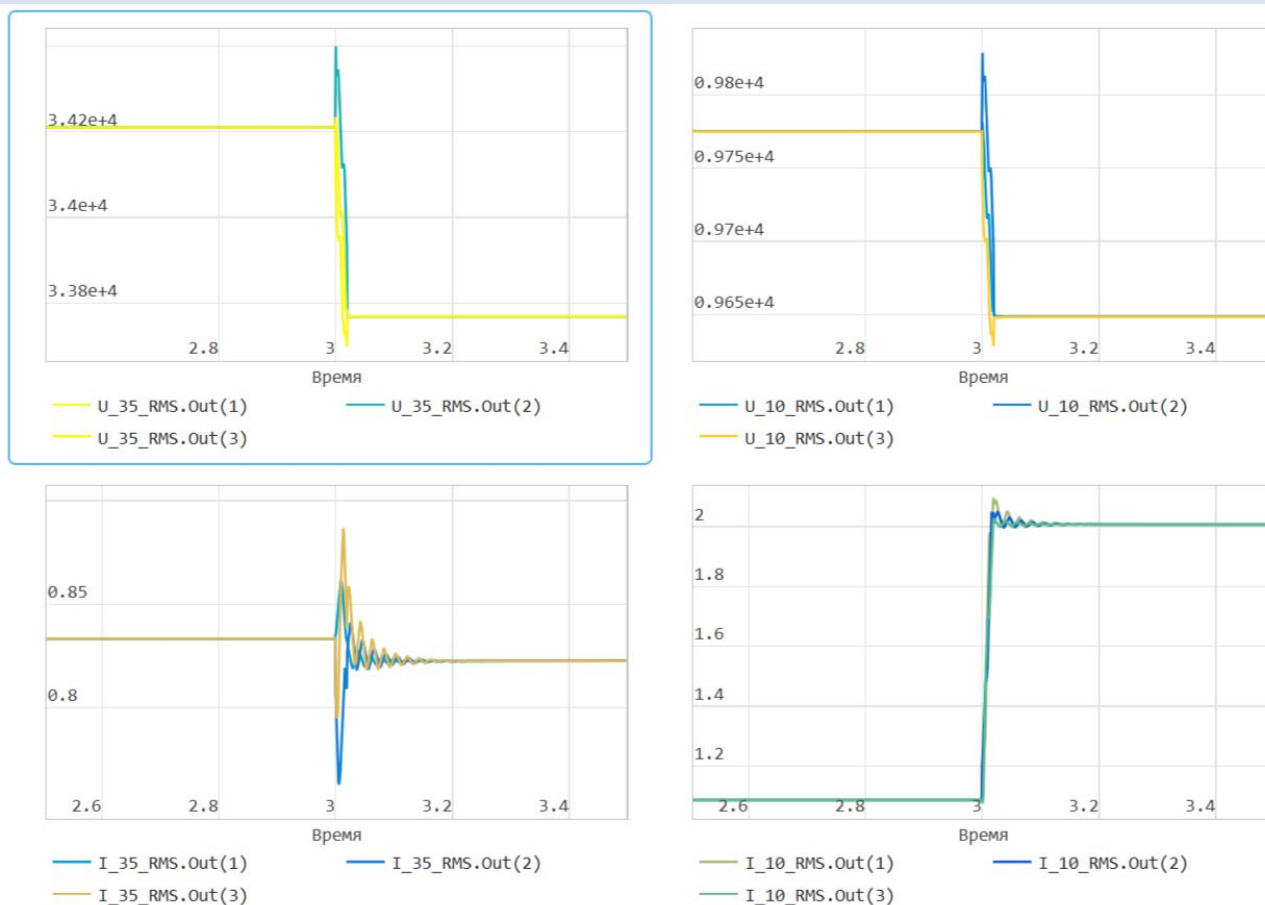


Рис. 2. Среднеквадратичные значения напряжений и токов на фазах во время переходного режима

Fig. 2. RMS values of phase voltages and currents during the transition mode

Для того чтобы реализовать такое количество условий и выполнить безопасное переключение, логичнее всего выполнить это в виде скрипта Julia в рамках блока Engsee Function. Реализация такого количества условий обеспечит поле Common Code. Итоговый скрипт отразим на рис. 3.

Более того, необходимо выполнить раздельное измерение левой части схемы (СШ1, СШ3) и правой части (СШ2, СШ4) для сравнения каждого из напряжений по фазам.

Поясним ключевые структуры скрипта:

1. Исходные данные:

- freq_nominal — номинальная частота;
- tol_voltage_35kV — величина отклонения по напряжению 35 кВ, т. е. разрешаем 3%-е отклонение = $35 \times 0.03 = 1.05$ кВ допуска;
- tol_voltage_10kV — аналогично для уровня 10 кВ, т. е. $10 \times 0.03 = 0.3$ кВ допуска;
- tol_phase — допуск по фазовому углу, т. е. разрешаем рассогласование фаз до $\pm 10^\circ$.

2. Затем, проводится расчёт среднеквадратичных значений, где `V::Float64` — одно мгновенное значение напряжения (в вольтах), затем `abs(V)` возвращает величину по модулю.

3. Далее, определяются фазы по знаку, где оператор `[V ≥ 0.0 ? 1 : -1]` возвращает 1, если напряжение больше 0, иначе – -1.

4. Затем, происходит проверка совпадения напряжений, где `r1a`, `r1b`, `r1c` — среднеквадратичные значения трёх фаз с левой стороны (в кВ), которые взяты из результата `rms(V_35A_1)/1000`, `rms(V_35B_1)/1000`, `rms(V_35C_1)/1000`. Аналогично с `r2a`, `r2b`, `r2c`. `Vnom` — номинальное напряжение и `tol` — допуск в процентах, которые передаются как параметры при вызове функции.

Если `dev = Vnom * tol / 100.0`, и если текущее напряжение отличается более чем на величину `dev`, то коммутация ключа запрещена, иначе (`V < dev`) — проверка проходит.

```

mutable struct Block <: AbstractCausalComponent
    freq_nominal::Float64
    tol_voltage_35kV::Float64
    tol_voltage_10kV::Float64
    tol_phase::Float64
    function Block()
        new(50.0, 5.0, 5.0, 10.0)
    end
end

function rms(V::Float64)
    return abs(V)
end

function phase_sign(V::Float64)
    return V ≥ 0.0 ? 1 : -1
end

function voltage_match(r1a,r1b,r1c, r2a,r2b,r2c, Vnom, tol)
    dev = Vnom*tol/100.0
    abs(r1a-r2a) ≤ dev && abs(r1b-r2b) ≤ dev && abs(r1c-r2c) ≤ dev
end

function seq_and_phase_match(s1a,s1b,s1c, s2a,s2b,s2c)
    (s1a == s2a) && (s1b == s2b) && (s1c == s2c)
end

function (b::Block)(t, V_35A_1, V_35B_1, V_35C_1, V_35A_2, V_35B_2, V_35C_2,
    V_10A_1, V_10B_1, V_10C_1, V_10A_2, V_10B_2, V_10C_2)

    r1a, r1b, r1c = rms(V_35A_1)/1000, rms(V_35B_1)/1000, rms(V_35C_1)/1000
    r2a, r2b, r2c = rms(V_35A_2)/1000, rms(V_35B_2)/1000, rms(V_35C_2)/1000
    vm35 = voltage_match(r1a,r1b,r1c, r2a,r2b,r2c, 35.0, b.tol_voltage_35kV)
    seq35 =
    seq_and_phase_match(phase_sign(V_35A_1),phase_sign(V_35B_1),phase_sign(V_35C_1),
        phase_sign(V_35A_2),phase_sign(V_35B_2),phase_sign(
V_35C_2))
    sync_35kV = vm35 && seq35

    r1a, r1b, r1c = rms(V_10A_1)/1000, rms(V_10B_1)/1000, rms(V_10C_1)/1000
    r2a, r2b, r2c = rms(V_10A_2)/1000, rms(V_10B_2)/1000, rms(V_10C_2)/1000
    vm10 = voltage_match(r1a,r1b,r1c, r2a,r2b,r2c, 10.0, b.tol_voltage_10kV)
    seq10 =
    seq_and_phase_match(phase_sign(V_10A_1),phase_sign(V_10B_1),phase_sign(V_10C_1),
        phase_sign(V_10A_2),phase_sign(V_10B_2),phase_sign(
V_10C_2))
    sync_10kV = vm10 && seq10

    return sync_35kV, sync_10kV
end

```

Рис. 3. Скрипт управления срабатывания ключа при выполнении условий
 Fig. 3. A script for managing key activation when conditions are met

Затем, функцией $\text{abs}(r1a-r2a) \leq \text{dev} \ \&\& \ \text{abs}(r1b-r2b) \leq \text{dev} \ \&\& \ \text{abs}(r1c-r2c) \leq \text{dev}$ определяем разницу напряжений на фазах А, В, С между сторонами 1 и 2 (левая и правая часть соответственно) с учетом сравнения с параметром dev. При этом, выходной параметр true выходит ТОЛЬКО если ВСЕ условия true (в физическом смысле: соответствие поставленным условиям по ВСЕМ фазам).

5. Далее, происходит проверка совпадения угла сдвига фаз стороны 1 и 2 по формуле $(s1a == s2a) \ \&\& \ (s1b == s2b) \ \&\& \ (s1c == s2c)$, где $s1a, s1b, s1c$ — знаки напряжений фаз А, В, С со стороны 1, $s2a, s2b, s2c$ — со стороны 2.

Результат данных значений взят из $\text{phase_sign}(V_35A_1)$, $\text{phase_sign}(V_35B_1)$, $\text{phase_sign}(V_35C_1)$.

Логика следующая: на ОБЕИХ сторонах фаза А/В/С имеет одинаковый знак: $s1a/b/c == s2a/b/c \rightarrow \text{true}$ и все эти три условия связаны оператором $\&\&$ (И), то результат = true только если ВСЕ три условия выполнены.

6. В результате $\text{vm35} = \text{true}$ (напряжения совпадают), $\text{seq35} = \text{true}$ (фазы совпадают).
 $\text{sync_35kV} = \text{true} \ \&\& \ \text{true} = \text{true}$

Результирующий true означает, что ВСЕ условия выполнены, 35 кВ шины ГОТОВЫ к соединению, false означает: хотя бы одно условие не выполнено, соединение запрещено. Аналогична логика и для напряжения 10 кВ.

Очевидно, что для реализации этой схемы необходимы измерители со стороны 1 (СШ1 и СШ3) и стороны 2 (СШ2 и СШ4). Даже после их установки скрипт блока Engae Function некорректно работал и воспроизводил выход true даже при неверных входных параметрах.

Выяснилось, что ключ, соединяющий левую и правую шины на любом классе напряжения, имеет небольшую проводимость, что в схемах замещения действительно представляется в виде разрыва цепи. Однако математически данный допуск представляет собой именно электрическое соединение, следовательно, параметры угла сдвига фаз уже являются сопряженными (т. е. даже при изначальном сдвиге на одном из источников поставить 90 градусов и на фазе А получается чистый косинус, то, например, на СШ1 и СШ2 наблюдается полная идентичность по углу сдвига фаз при разных амплитудных значениях).

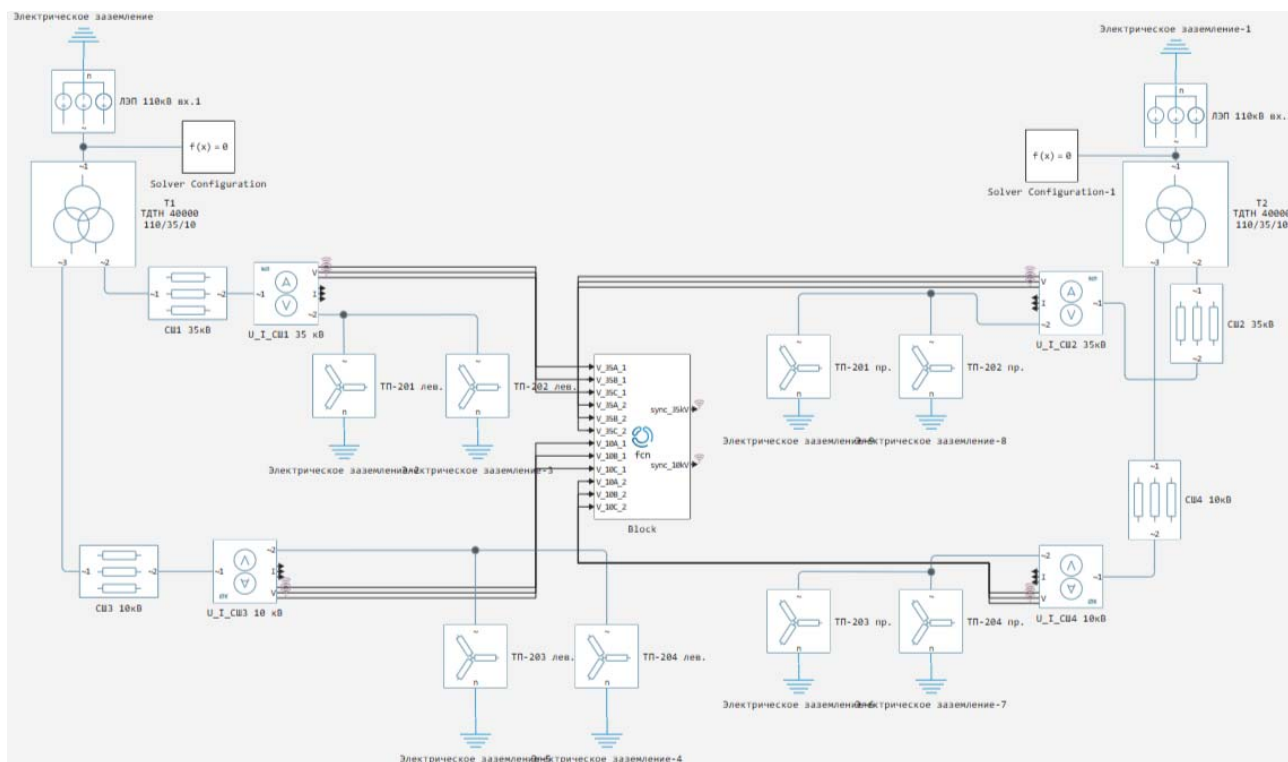


Рис. 4. Имитационная модель с реализованным скриптом в Engae Function
 Fig. 4. Simulation model with an implemented script in Engae Function

Реализовать данную систему можно при полностью раздельных и независимых источниках питания с отдельными решателями Solver Configuration.

Более того, с целью определения фазовых сдвигов, необходимо на ввод данных выставлять именно мгновенные значения напряжений.

Обновлённую имитационную модель мы можем наблюдать на рис. 4.

На рис. 5 отражены результаты, полученные в имитационной модели исходя из параметров, которые мы указали в Engage Function, а именно: $\text{freq_nominal} = 50.0$, $\text{tol_voltage_35kV} = 3.0$, $\text{tol_voltage_10kV} = 3.0$, $\text{tol_phase} = 10.0$.

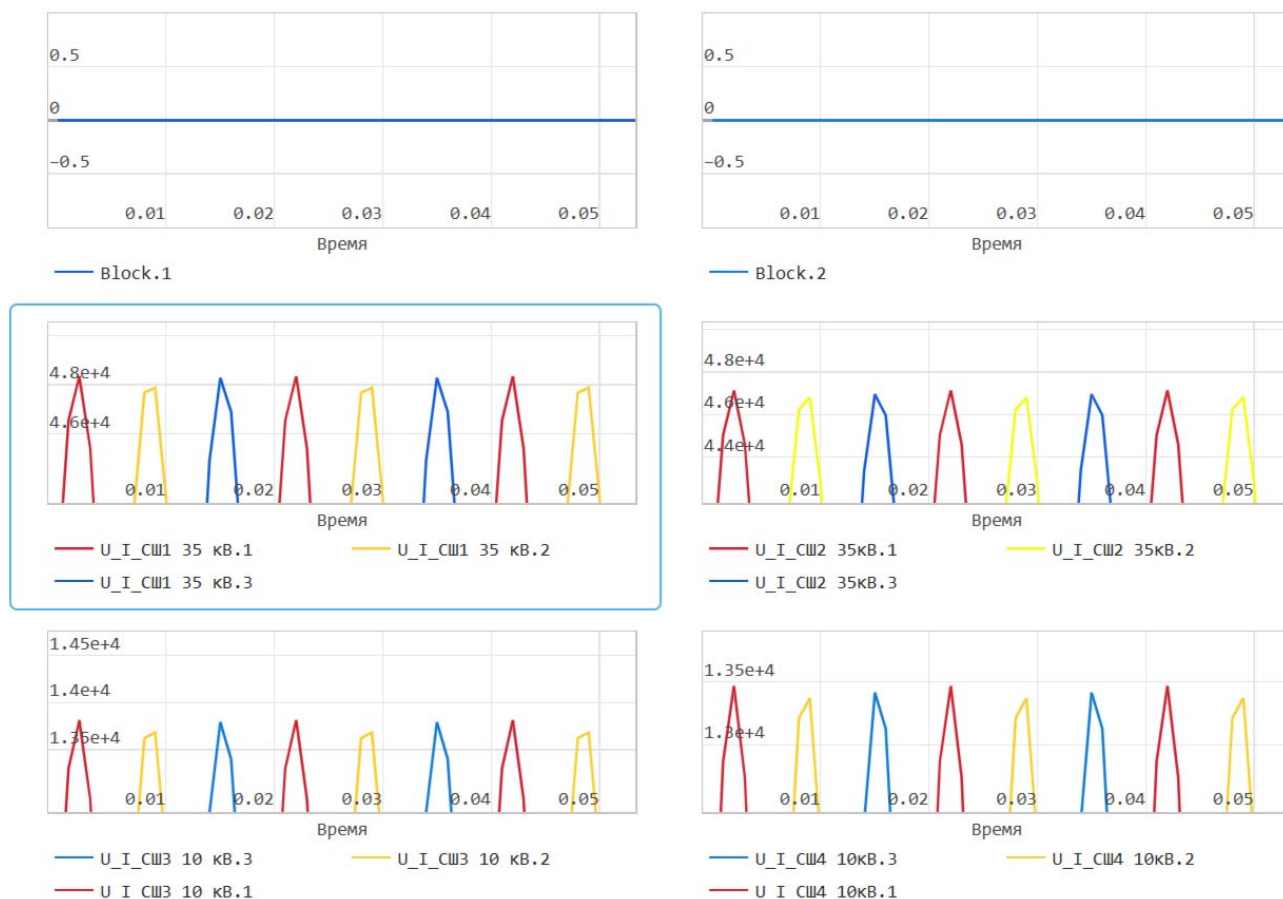


Рис. 5. Результаты имитационного моделирования при $\text{sync35kV/10kV} = \text{false}$

Fig. 5. Simulation results at $\text{sync35kV/10kV} = \text{false}$

Как было ранее уже упомянуто, измерения были выполнены в мгновенных значениях, поэтому зона нашего интереса заключается в пиковых значениях амплитудных значений, что было и отображено на рис. 5.

Видно, что на СШ1 и СШ2 на напряжение 35 кВ есть разница в фазах и значения $\text{def} > 1.05$, а для СШ3 и СШ4 (напряжение 10 кВ) $\text{def} > 0.3$, следовательно, управляемый сигнал будет давать команду false, т. к. один из обязательных пунктов (касательно совпадений напряжений по фазам) не выполняется.

Попробуем уменьшить строгость по допустимому диапазону соответствия до $\pm 5\%$.

Тогда параметры $\text{tol_voltage_35kV} = 5.0$, $\text{tol_voltage_10kV} = 5.0$. Результаты отразим на рис. 6.

При выборе менее строгих параметров мы смогли добиться, чтобы $\text{sync_35kV} = \text{true}$, $\text{sync_10kV} = \text{true}$. Если направить данные вектора на управляемый ключ, то в соответствующий момент времени произойдёт коммутация. При этом видно, что на различных секциях шин наблюдается разность качества напряжений в результатах имитационного моделирования. Это связано с тем, что полная мощность потребителей на секциях шин достаточно сильно отличается друг от друга.

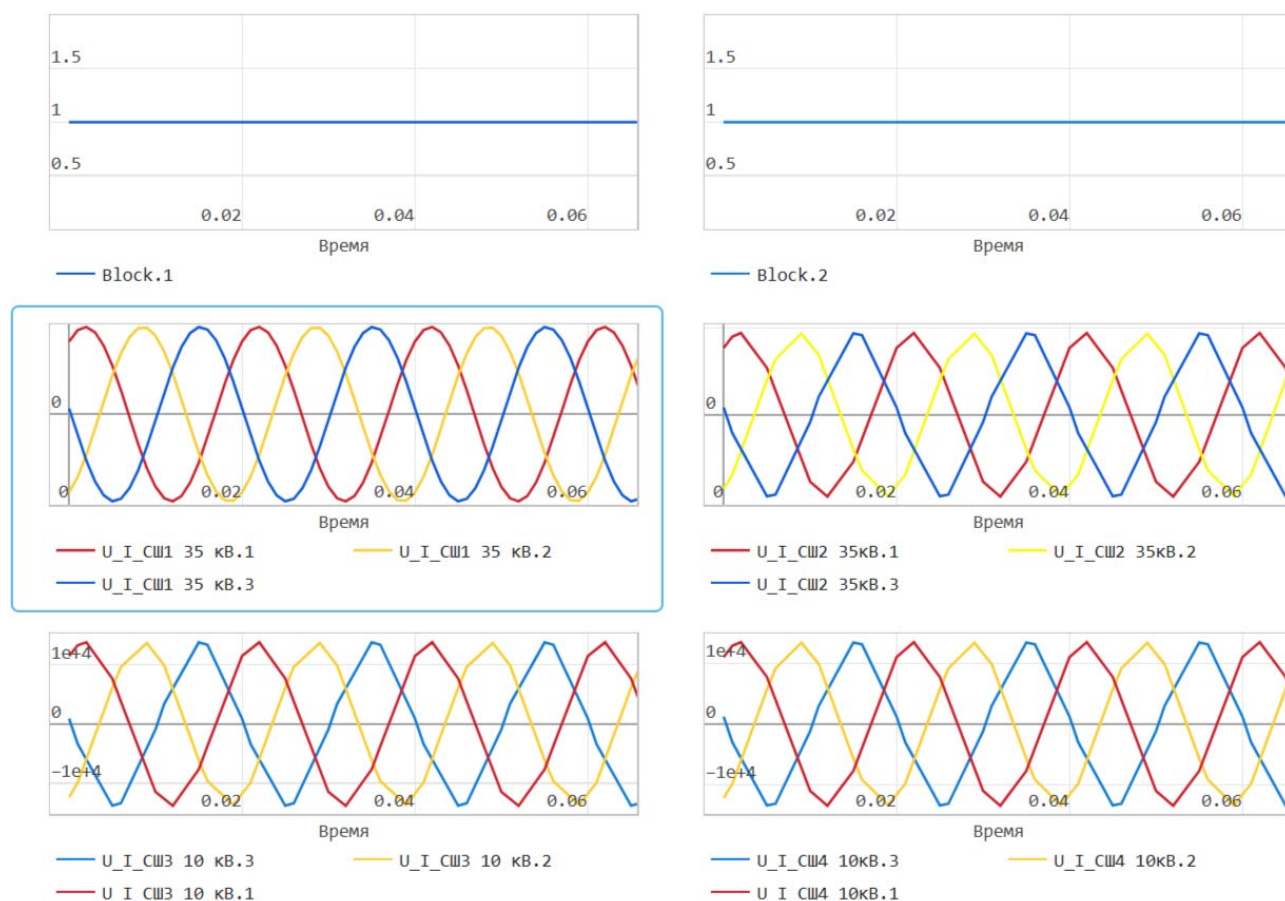


Рис. 6. Результаты имитационного моделирования при $\text{sync35kV}/10\text{kV} = \text{true}$
 Fig. 6. Simulation results at $\text{sync35kV}/10\text{kV} = \text{true}$

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Несмотря на то, что цель работы была выполнена успешно и мы получили упрощенную имитационную модель подстанции, а также скрипт, который работает в общей системе электроснабжения в режиме реального времени, реализовать цифровой двойник с понятными физическими блоками будет проблематично. Математические методы расчётов сложных жёстких систем, применяемые на платформе Engae, обеспечивают быстрый расчет/компиляцию, однако для этого нужен ряд определенных математических допущений, что логично. Так, например, относительно простая электрическая трёхфазная схема электроснабжения с наличием коммутационных устройств может содержать систему уравнений из 80–90 дифференциальных уравнений второго порядка.

Разумеется, что для упрощения и ускорения расчётных операций требуется в обязательном порядке ставить ненулевое значение проводимости открытого ключа, однако это тот немногочисленный случай, когда электрофизические законы могут конфликтовать с математическими допущениями, т. к. наличие даже минимальной проводимости между двумя секциями шин обеспечивает равновесные значения по частотным характеристикам и по фазным сдвигам.

Решение задачи в изначальной интерпретации возможно, но усложнится и, соответственно, замедлится математический решатель. Использование же дополнительных скриптов вместо стандартного выключателя может привести к алгебраической петле. Получившееся решение предполагает наличие минимум двух решателей, что усложнит расчёт более сложной системы электроснабжения и потеряется основной эффект управления в реальном времени.

Использование статичных же начальных условий полезно для отдельных систем электроснабжения, но противоречит понятию имитации динамических систем с постоянным изменением параметров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье рассмотрен практический пример реализации логики на языке Julia в синхронизации с физическими блоками в рамках виртуальной среды Engage.

Построение имитационных моделей лежит в основе анализа любых современных цифровых подстанций, а логика управления отдельными параметрами – в основе цифрового автоматического управления интеллектуальными устройствами. Обеспечить взаимосвязь эффективных математических решателей в комбинации с физическими законами – основа реализации цифровых двойников.

Предложенный в статье набор логических элементов может быть полезен не только для коммутации секций шин для конкретных случаев вывода в ремонт резервного трансформатора (в некоторых случаях и при аварийном отключении, но в этом случае необходимо отделить параметры переходного режима посредством анализа Фурье или вейвлет-анализа), но и при минимальном изменении кода позволит управлять источниками питания, режимами работы потребителей, компенсаторами реактивной мощности и т. д. в автоматическом режиме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Припяткин А.В., Крохин А.А. Автоматическое управление режимами работы средневольтных сетей с распределённой генерацией // *Электротехника*. 2017. № 8. С. 16-24.
2. Кулаков А.Б., Турбаев Р.Х. Системы резервирования питания в распределительных сетях 35 кВ // *Электрические станции*. 2018. № 12. С. 39-47.
3. Воробьев В.П., Смирнов И.Н. Проектирование схем электроснабжения промышленных предприятий с резервированием по источникам питания // *Электротехника и электромеханика*. 2015. № 4. С. 8-15.
4. Токарев И.И., Раскатов В.Я. Переходные процессы при автоматическом переключении питания в схемах с двумя трансформаторами // *Энергетика и промышленность России*. 2019. № 6. С. 28-34.
5. Зыбин Л.М., Баев В.С., Корнеев А.Н. Защита систем шинного резервирования от несинхронных переключений // *Вестник МЭИ*. 2016. № 3. С. 74-82.
6. Козлов, А.В., Петров, Ю.П. Мониторинг и управление режимами работы подстанций среднего напряжения : монография. Москва : Энергоатомиздат, 2018. 256 с.
7. Фёдоров В.К., Голубев А.А. Алгоритмы синхронизации и управления шинными выключателями в системах с параллельными источниками питания // *Электроэнергетика и электротехника*. 2020. № 2. С. 11-19.
8. Абрамова С.И., Волковицкий О.В., Кравченко А.В. Имитационное моделирование переходных процессов в электросетях // *Современные тенденции развития электроэнергетики : сборник материалов конференции*. Москва, 2017. С. 45-52.
9. Лободанов Е.Н. Анализ переходных перенапряжений при коммутации в сетях среднего напряжения // *Вестник научнотехнического развития*. 2019. № 11 (135). С. 31-39.
10. Родионов В.А., Бычков Н.А., Нечеунов И.А. Особенности моделирования систем управления коммутационными аппаратами // *Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика*. 2018. № 2. С. 95-103.
11. Волков И.А., Рудоман В.Е., Беяков В.О. Цифровая обработка сигналов в устройствах управления шинными выключателями // *Микроэлектроника и информатика*. 2017. № 4. С. 24-31.
12. Сорокин М.Л., Панченко А.А. Надежность и технико-хозяйственные показатели систем резервирования на подстанциях 35 кВ // *Вестник ИрГТУ*. 2016. № 7 (114). С. 48-56.
13. Драчев, П.В., Качалова, И.В., Сафин, З.Н. Применение микроконтроллеров в системах управления электроснабжением : учебное пособие. Екатеринбург :

- УрФУ, 2017. 192 с.
14. Трифанов В.И. Анализ режимов восстановления питания при использовании автоматического шинного резервирования // Вестник энергетической безопасности. 2020. Т. 5, № 3. С. 22-30.
 15. Винниченко, В.В., Ермаков, А.С. Динамическая устойчивость электроэнергетических систем : справочное пособие. Санкт-Петербург : Политехника, 2015. 328 с.
 16. Huang, Y., Li, M., Wang, X., Zhang, H., Chen, Y. Real-time simulation and experimental validation of synchronous bus-tie breaker switching scheme in microgrids // IEEE Transactions on Power Delivery. 2021. Vol. 36, № 2. P. 1089-1101. DOI 10.1109/TPWRD.2020.3009876
 17. Liu, S., Wang, B., Zhang, Q., Li, P. Transient overvoltage assessment and mitigation strategies during automatic bus sectionalizing in AC distribution networks // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2020. Vol. 115. P. 105426. DOI 10.1016/j.ijepes.2019.105426
 18. Chen, X., Yang, Y., Liu, G., Wu, R., Zhang, D. Control strategies for seamless synchronous transfer switch operation in dual-source power systems // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2019. Vol. 66, № 8. P. 6254-6266. DOI 10.1109/TIE.2018.2869350
 19. Ruan, X., Jiao, Y., Wang, X., Liu, Y., Li, W., He, Z. Fast synchronization and seamless power transfer for grid-tied inverters during grid faults // IEEE Transactions on Power Electronics. 2018. Vol. 33, № 5. P. 3976-3990. DOI 10.1109/TPEL.2017.2714122
 20. Ma, T., Cai, G., Li, H., Wu, S., Zhou, W. Adaptive synchronization control for multi-parallel grid-forming inverters during unscheduled islanding events // IEEE Transactions on Industry Applications. 2019. Vol. 55, № 1. P. 576-586. DOI 10.1109/TIA.2018.2865368
 21. Zhang, M., Wang, L., Liu, H., Yang, J., Chen, Y., Lin, Z. Digital control implementation and experimental validation of automatic bus transfer scheme for three-phase four-wire distribution systems // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2022. Vol. 135. P. 107486. DOI 10.1016/j.ijepes.2021.107486
 22. Li, J., Yang, X., Wang, D., Wu, Y., Feng, Q. Zero steady-state error synchronization strategy for parallel-connected converters during islanding // IEEE Transactions on Power Electronics. 2021. Vol. 36, № 6. P. 7234-7245. DOI 10.1109/TPEL.2020.3041923
 23. Wang, H., Chen, J., Wang, P., Hu, Z., Li, X. Impact analysis of automatic bus sectionalizing on low-voltage ride-through characteristics in distribution networks with distributed generation // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 12456-12467. DOI 10.1109/ACCESS.2020.2965432
 24. Liu, D., Cai, L., Wang, S., Zhang, C., Wang, J., Liu, Z. Real-time HIL testing platform for bus-tie breaker automatic synchronization controller in hybrid AC/DC distribution systems // Electric Power Systems Research. 2021. Vol. 195. P. 107112. DOI 10.1016/j.epsr.2021.107112
 25. Ye, J., Sun, Y., Liu, Z., Wu, Y., Wang, X., Zhang, L. Simulation and performance evaluation of automatic distribution network sectionalizing with multiple microgrids integration // IEEE Transactions on Smart Grid. 2022. Vol. 13, № 1. P. 142-153. DOI 10.1109/TSG.2021.3119865
 26. Zhou, W., Li, H., Gao, F., Wang, Y., Liu, W. Synchronous switching control for parallel inverters with low harmonic distortion during grid faults / W. Zhou, H. Gao, F. Liu, Y. Wang, W. Liu // IEEE Transactions on Power Electronics. 2020. Vol. 35, № 8. P. 8147-8160. DOI 10.1109/TPEL.2019.2958755
 27. Панов А.И., Павлова Е.В., Сидоров К.С. Применение открытых платформ для моделирования систем управления электроэнергией // Информационные технологии и системы. 2021. № 3. С. 67-76.
 28. Гамм А.З., Голуб И.И. Анализ чувствительности режимов электроэнергетических систем при автоматическом резервировании питания // Электротехника. 2018. № 11. С. 44-52.
 29. Chen, Q., Li, W., Huang, H., Yang, J., Dong, Z. Novel rapid synchronization algorithm for automatic sectionalizing of distribution networks incorporating distributed resources // IEEE Transactions on

Smart Grid. 2021. Vol. 12, № 4. P. 3112-3125. DOI 10.1109/TSG.2021.3056789

30. Wang, Z., Zhang, Y., Liu, X., Hu, B., Chen, L., Yang, W. Experimental platform and validation method for dual-source automatic transfer switch in medium voltage distribution systems with large-scale DG penetration // International Transactions on Electrical Energy Systems. 2022. Vol. 32, № 4. P. e12234. DOI 10.1002/2050-7038.12234

REFERENCES

1. Pripyatkin A.V., Krokhin A.A. Automatic control of operating modes of medium-voltage networks with distributed generation // Electrical Engineering. 2017. № 8. pp. 16-24.
2. Kulakov A.B., Turbaev R.H. Power backup systems in 35 kV distribution networks // Electric stations. 2018. № 12. pp. 39-47.
3. Vorobyov V.P., Smirnov I.N. Designing power supply schemes for industrial enterprises with redundancy by power sources // Electrical engineering and electromechanics. 2015. № 4. pp. 8-15.
4. Tokarev I.I., Raskatov V.Ya. Transients during automatic power switching in circuits with two transformers // Russian energy and industry. 2019. № 6. pp. 28-34.
5. Zybin L.M., Baev V.S., Korneev A.N. Protection of bus redundancy systems from asynchronous switching // Bulletin of the MEI. 2016. № 3. pp. 74-82.
6. Kozlov, A.V., Petrov, Yu.P. Monitoring and control of operating modes substations of medium voltage : monography. Moscow : Energoatomizdat, 2018. 256 p.
7. Fedorov V.K., Golubev A.A. Algorithms for synchronization and control of bus switches in systems with parallel power sources // Electric power and electrical engineering. 2020. № 2. pp. 11-19.
8. Abramova S.I., Volkovitsky O.V., Kravchenko A.V. Simulation modeling of transient processes in electric power grids // Modern trends in the development of electrical energy : a collection of conference materials. Moscow, 2017. pp. 45-52.
9. Lobodanov E.N. Analysis of transient over-voltages during switching in medium voltage networks // Bulletin of Scientific and Technical Development. 2019. № 11 (135). pp. 31-39.
10. Rodionov V.A., Bychkov N.A., Nechunov I.A. Features of modeling control systems for switching devices // Bulletin of AGTU. Series: Management, computing and information technology. 2018. № 2. pp. 95-103.
11. Volkov I.A., Rudoman V.E., Belyakov V.O. Digital signal processing in bus switch control devices // Microelectronics and Informatics. 2017. № 4. pp. 24-31.
12. Sorokin M.L., Panchenko A.A. Reliability and technical and economic indicators of redundancy systems at 35 kV substations // Bulletin of IrSTU. 2016. № 7 (114). pp. 48-56.
13. Drachev, P.V., Kachalova, I.V., Safin, Z.N. The use of microcontrollers in power supply management systems : a textbook. Yekaterinburg : UrFU, 2017. 192 p.
14. Trifanov V.I. Analysis of power recovery modes when using automatic bus redundancy // Bulletin of Energy Security. 2020. Vol. 5, № 3. pp. 22-30.
15. Vinnichenko, V.V., Ermakov, A.S. Dynamic stability of electric power systems : a reference manual. Saint Petersburg : Polytechnic, 2015. 328 p.
16. Huang, Y., Li, M., Wang, X., Zhang, H., Chen, Y. Real-time simulation and experimental validation of synchronous bus-tie breaker switching scheme in microgrids // IEEE Transactions on Power Delivery. 2021. Vol. 36, № 2. P. 1089-1101. DOI 10.1109/TPWRD.2020.3009876
17. Liu, S., Wang, B., Zhang, Q., Li, P. Transient overvoltage assessment and mitigation strategies during automatic bus sectionalizing in AC distribution networks // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2020. Vol. 115. P. 105426. DOI 10.1016/j.ijepes.2019.105426
18. Chen, X., Yang, Y., Liu, G., Wu, R., Zhang, D. Control strategies for seamless synchronous transfer switch operation in dual-source power systems // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2019. Vol. 66, № 8. P. 6254-6266. DOI 10.1109/TIE.2018.2869350
19. Ruan, X., Jiao, Y., Wang, X., Liu, Y., Li, W., He, Z. Fast synchronization and seam-

- less power transfer for grid-tied inverters during grid faults // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2018. Vol. 33, № 5. P. 3976-3990. DOI 10.1109/TPEL.2017.2714122
20. Ma, T., Cai, G., Li, H., Wu, S., Zhou, W. Adaptive synchronization control for multi-parallel grid-forming inverters during unscheduled islanding events // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2019. Vol. 55, № 1. P. 576-586. DOI 10.1109/TIA.2018.2865368
 21. Zhang, M., Wang, L., Liu, H., Yang, J., Chen, Y., Lin, Z. Digital control implementation and experimental validation of automatic bus transfer scheme for three-phase four-wire distribution systems // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2022. Vol. 135. P. 107486. DOI 10.1016/j.ijepes.2021.107486
 22. Li, J., Yang, X., Wang, D., Wu, Y., Feng, Q. Zero steady-state error synchronization strategy for parallel-connected converters during islanding // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2021. Vol. 36, № 6. P. 7234-7245. DOI 10.1109/TPEL.2020.3041923
 23. Wang, H., Chen, J., Wang, P., Hu, Z., Li, X. Impact analysis of automatic bus sectionalizing on low-voltage ride-through characteristics in distribution networks with distributed generation // *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 12456-12467. DOI 10.1109/ACCESS.2020.2965432
 24. Liu, D., Cai, L., Wang, S., Zhang, C., Wang, J., Liu, Z. Real-time HIL testing platform for bus-tie breaker automatic synchronization controller in hybrid AC/DC distribution systems // *Electric Power Systems Research*. 2021. Vol. 195. P. 107112. DOI 10.1016/j.epsr.2021.107112
 25. Ye, J., Sun, Y., Liu, Z., Wu, Y., Wang, X., Zhang, L. Simulation and performance evaluation of automatic distribution network sectionalizing with multiple microgrids integration // *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2022. Vol. 13, № 1. P. 142-153. DOI 10.1109/TSG.2021.3119865
 26. Zhou, W., Li, H., Gao, F., Wang, Y., Liu, W. Synchronous switching control for parallel inverters with low harmonic distortion during grid faults // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2020. Vol. 35, № 8. P. 8147-8160. DOI 10.1109/TPEL.2019.2958755
 27. Panov A.I., Pavlova E.V., Sidorov K.S. Application of open platforms for modeling electric power management systems // *Information technologies and systems*. 2021. No. 3. P. 67-76.
 28. Gamm A.Z., Golub I.I. Sensitivity analysis of electric power system modes with automatic power backup // *Electrical Engineering*. 2018. No. 11. pp. 44-52.
 29. Chen, Q., Li, W., Huang, H., Yang, J., Dong, Z. Novel rapid synchronization algorithm for automatic sectionalizing of distribution networks incorporating distributed resources // *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2021. Vol. 12, № 4. P. 3112-3125. DOI 10.1109/TSG.2021.3056789
 30. Wang, Z., Zhang, Y., Liu, X., Hu, B., Chen, L., Yang, W. Experimental platform and validation method for dual-source automatic transfer switch in medium voltage distribution systems with large-scale DG penetration // *International Transactions on Electrical Energy Systems*. 2022. Vol. 32, № 4. P. e12234. DOI 10.1002/2050-7038.12234