

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

ВСЕРЕЖИМНЫЙ МОДЕЛИРУЮЩИЙ КОМПЛЕКС РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

*Рекомендовано в качестве учебного пособия
Редакционно-издательским советом
Томского политехнического университета*

Издательство
Томского политехнического университета
2016

УДК 621.311.001.5(075.8)

ББК 31.27-051.3я73

В85

Авторы

М.В. Андреев, Н.Ю. Рубан, А.А. Суворов,
А.С. Гусев, А.О. Сулайманов

В85 Всережимный моделирующий комплекс реального времени электроэнергетических систем : учебное пособие / М.В. Андреев, Н.Ю. Рубан, А.А. Суворов и др. ; Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2016. – 108 с.

В пособии представлены ключевые особенности работы с всережимным моделирующим комплексом реального времени энергетических систем. Приведена информация, необходимая для подключения и управления данным комплексом, в том числе и через специализированное программное обеспечение. Представлен краткий лабораторный практикум для работы со студентами.

Предназначено для бакалавров, обучающихся по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» и магистров, обучающихся по направлению 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника».

УДК 621.311.001.5(075.8)

ББК 31.27-051.3я73

Рецензенты

Доктор технических наук, заведующий кафедрой
«Автоматизированные электрические системы» УрФУ

А.В. Паздерин

Доктор технических наук, заведующий кафедрой
«Электроэнергетика и электротехника» ДВФУ

Н.В. Силин

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2016

© Андреев М.В., Рубан Н.Ю., Суворов А.А.,
Гусев А.С., Сулайманов А.О., 2016

© Оформление. Издательство Томского
политехнического университета, 2016

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....	6
1.1. Математическая модель синхронных генераторов	6
1.2. Математическая модель трансформаторов и автотрансформаторов	16
1.3. Математическая модель линий электропередач.....	17
1.4. Математическая модель синхронных и асинхронных двигателей.....	24
1.5. Математическая модель обобщенной нагрузки	27
1.6. Математическая модель реакторов.....	29
2. РАБОТА С ВСЕРЕЖИМНЫМ МОДЕЛИРУЮЩИМ КОМПЛЕКСОМ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ	30
2.1. Общая характеристика моделирующего комплекса	30
2.2. Подключение моделирующего комплекса.....	33
2.2.1. Настройка и запуск серверного СПО	33
2.2.2. Настройка и запуск клиентского СПО	35
2.3. Пользовательский интерфейс моделирующего комплекса	36
2.3.1. Формы «ВМК РВ ЭЭС»	38
2.3.2. Осциллограф «ВМК РВ ЭЭС».....	48
2.3.3. Сценарии режимов	63
2.3.4. Редактор KoskaXmlEditor2010	65
3. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ.....	76
3.1. Лабораторная работа № 1. Исследование автоматических регуляторов возбуждения	76
3.1.1. Исследование автоматического регулятора возбуждения в квазиустановившемся режиме.....	76
3.1.2. Исследование автоматического регулятора возбуждения при переходных процессах	78
3.2. Лабораторная работа № 2. Исследование механизма управления турбиной.....	79
3.3. Лабораторная работа № 3. Исследование автоматической частотной разгрузки	80
3.4. Лабораторная работа № 4. Моделирование функционирования релейной защиты и автоматики	82
3.5. Лабораторная работа № 5. Моделирование процесса самосинхронизации генераторов	83
3.6. Лабораторная работа № 6. Регулирование реактивной мощности и напряжения в сети	84
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	86
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	87
ПРИЛОЖЕНИЕ. Подготовка параметров для всережимного моделирующего комплекса реального времени энергетических систем	91

ВВЕДЕНИЕ

В силу единства, непрерывности и параллельности генерации, распределения и потребления электроэнергии все участвующее в данном процессе оборудование: первичные двигатели, генераторы, трансформаторы, линии электропередачи, разнообразные электропотребители и множество другого основного и вспомогательного оборудования постоянно связано между собой в нормальных и аварийных режимах их работы.

Поскольку подавляющее большинство этого оборудования представляет собой динамические элементы, к тому же преимущественно нелинейные и с весьма значительным диапазоном постоянных времени, любая современная электроэнергетическая система (ЭЭС) образует большую, многопараметрическую, жесткую (отношение наибольшей постоянной времени к наименьшей >10), нелинейную, динамическую систему. Проектирование, исследование и эксплуатация таких систем, в отличие от статических, объективно являются несоизмеримо более сложными задачами, в значительной мере из-за трудностей получения, в том числе своевременного, полной и достоверной информации о протекающих в них процессах.

Необходимость этих упрощений и ограничений длительное время связывалась, главным образом, с несовершенством ЦЭВМ, развитие которых должно было их устранить. Между тем, стремительный и колоссальный прогресс компьютерной техники позволил практически полностью снять эту необходимость лишь для статических задач и далеко не пропорционально повлиял на принципиально значимые упрощения и ограничения для динамических задач и на оперативность их решения. В результате актуальная для надежного и эффективного решения многих важнейших задач проектирования, исследования и эксплуатации ЭЭС проблема полноты, достоверности и оперативности моделирования ЭЭС в значительной мере сохраняется.

С учетом особенностей физико-математических свойств и характеристик ЭЭС, а также проявившихся трудностей решения сформулированной выше проблемы сугубо численным путем, эвристически очевидно, что эффективной альтернативой может быть только комплексный подход, представляющий собой в широком смысле гибридное моделирование. Всережимный моделирующий комплекс реального времени ЭЭС (ВМК РВ ЭЭС) разработан в соответствии с концепцией комплексного подхода и представляет собой специализированную многопроцессорную программно-техническую систему гибридного типа.

С учетом особенностей функционирования современных ЭЭС, поддержание нормальной устойчивой их работы является крайне важной задачей, за выполнение которой отвечают различные устройства автоматики [1–7]. Все эти устройства в общем случае можно разделить на две большие группы: технологическую и системную автоматику.

Технологическая автоматика является локальной, то есть привязанной к конкретному объекту ЭЭС и не оказывающей существенного влияния на режим энергосистемы. Подобные автоматические устройства, как правило, используются для поддержания на требуемом уровне параметров силового оборудования. К устройствам такого рода, в частности, относятся автоматический регулятор возбуждения (АРВ), механизм управления турбиной (МУТ) и др.

С помощью системной автоматики осуществляется управление режимами в ЭЭС или в конкретных её частях.

Можно провести и другую градацию устройств автоматики ЭЭС, например, по функциональному назначению: автоматика управления в нормальном и аварийных режимах работы ЭЭС. К автоматике управления в нормальных режимах можно, в частности, отнести автоматическое регулирование частоты и мощности (АРЧМ). К автоматике управления в аварийных режимах относится релейная защита (РЗ) и противоаварийная автоматика (ПА).

Данное пособие рекомендовано к изучению в рамках дисциплины «Автоматика электроэнергетических систем», посвященному рассмотрению наиболее значимых устройств автоматического управления. Учебное пособие разработано с целью ознакомления учащихся вузов энергетического профиля с особенностями работы некоторых устройств технологической автоматики (АРВ, МУТ) и РЗ и ПА (дифференциальная защита (ДЗ), максимальная токовая защита с блокировкой по напряжению (МТЗ БН), автоматика повторного включения (АПВ), автоматика ввода резерва (АВР)). Кроме того, в процессе выполнения лабораторных работ учащиеся получают опыт работы с ВМК РВ ЭЭС. Данный комплекс обладает уникальными возможностями, которые позволяют студентам и магистрантам научиться работать в условиях, близких к реальным в ЭЭС, а также дадут представление о влиянии обозначенных устройств автоматики на процессы в конкретном оборудовании и ЭЭС в целом.

1. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

1.1. Математическая модель синхронных генераторов

Синхронные генераторы (СГ) являются важнейшими элементами ЭЭС и в большей степени определяют протекающие и возникающие в ней процессы. В связи с этим вопросу изучения и моделирования СГ, независимо от целей исследования и используемых способов, методов и средств, уделяется особое внимание. Более того, СГ являются одними из самых сложных элементов в ЭЭС, полная математическая модель которых неизбежно содержит жесткую нелинейную систему дифференциальных уравнений высокого порядка. При использовании полных математических моделей СГ, учитывающих математические модели первичных двигателей, систем возбуждения и их автоматических регуляторов, для моделирования многомашинной ЭЭС всегда получается система уравнений, которая даже при представлении остальных элементов ЭЭС статическими моделями, не воспроизводящими переходные процессы, оказывается плохо обусловленной на ограничительных условиях применимости численных методов интегрирования, что делает невозможным удовлетворительное численное решение такой системы [8]. Улучшение обусловленности возможно только путем снижения жесткости и дифференциального порядка системы уравнений моделируемой ЭЭС, а также ограничения интервала решения, что реализуемо только за счет использования декомпозиции объективно единого и непрерывного спектра процессов, согласно которой выделяются и отдельно рассчитываются установившиеся и переходные процессы, которые в свою очередь также делятся на электромагнитные и электромеханические стадии; существенных упрощений математических моделей, особенно СГ, а также за счет ограничения интервала воспроизведения процессов. Подробное описание устоявшихся и используемых повсеместно упрощений, декомпозиций и области их применения в практике моделирования ЭЭС рассмотрено в работах [9–12]. Одним из наиболее рассматриваемых и обсуждаемых упрощений для математической модели СГ является необходимость учета демпферных контуров и их количества [12], более того в настоящее время доказана необходимость их учета и как можно более подробного [13]. Кроме того, при внедрении быстродействующих коммутационных устройств, более быстродействующих локальных и системных средств технологической и противоаварийной автоматики, релейной защиты, способных оказывать существенное

влияние на процессы, протекающие в СГ и ЭЭС, в целом актуальность отказа от существенных упрощений и ограничений будет непрерывно возрастать. В связи с этим в качестве математической модели СГ используется полная система уравнений Парка–Горева повышенной точности, вместе с уравнениями формирования трехфазной системы координат a, b, c и взаимного преобразования переменных систем d, q и a, b, c ($d, q \leftrightarrow a, b, c$). Обозначенное повышение точности достигается за счет увеличения числа моделируемых демпферных контуров и учета частотной зависимости их параметров, а именно учет трех демпферных контуров по оси d и четырех демпферных контуров по оси q обеспечивает полноту и достоверность моделирования процессов, протекающих в СГ [13].

Применяя наиболее распространенную взаимную систему относительных единиц в теории электрических машин и считая ось d , опережающей ось q при вращении осей против часовой стрелки, отвечающую обозначенным условиям, математическую модель СГ можно представить следующей системой уравнений:

- уравнением движения ротора

$$T_j \frac{d\omega}{dt} + K_{\text{ПТ}}\omega = M_T - K_M (\Psi_{d i_q} - \Psi_{q i_d}); \quad (1.1)$$

- уравнением контура возбуждения

$$\frac{d\Psi_f}{dt} + r_f i_f = u_f; \quad (1.2)$$

- уравнением демпферных контуров по оси d

$$\frac{d\Psi_{D1}}{dt} + r_{D1} i_{D1} = 0, \quad (1.3)$$

$$\frac{d\Psi_{D2}}{dt} + r_{D2} i_{D2} = 0, \quad (1.4)$$

$$\frac{d\Psi_{D3}}{dt} + r_{D3} i_{D3} = 0; \quad (1.5)$$

- уравнением потокосцепления в воздушном зазоре по оси d

$$\Psi_{\delta d} = x_{ad} (K_M i_d + i_f + i_{D1} + i_{D2} + i_{D3}); \quad (1.6)$$

- уравнением потокосцепления обмотки возбуждения

$$\Psi_f = \Psi_{\delta d} + x_{\sigma f} i_f; \quad (1.7)$$

- уравнениями потокосцеплений демпферных контуров по оси d :

$$\Psi_{D1} = \Psi_{\delta d} + x_{\sigma D1} i_{D1}, \quad (1.8)$$

$$\Psi_{D2} = \Psi_{\delta d} + x_{\sigma D2} i_{D2}, \quad (1.9)$$

$$\Psi_{D3} = \Psi_{\delta d} + x_{\sigma D3} i_{D3}; \quad (1.10)$$

- уравнением результирующего потокосцепления по оси d

$$\Psi_d = \Psi_{\delta d} + x_{\sigma} K_M i_d = \Psi_{\delta d} + \Psi_{\delta d}; \quad (1.11)$$

- уравнениями демпферных контуров по оси q :

$$\frac{d\Psi_{Q1}}{dt} + r_{Q1} i_{Q1} = 0, \quad (1.12)$$

$$\frac{d\Psi_{Q2}}{dt} + r_{Q2} i_{Q2} = 0, \quad (1.13)$$

$$\frac{d\Psi_{Q3}}{dt} + r_{Q3} i_{Q3} = 0, \quad (1.14)$$

$$\frac{d\Psi_{Q4}}{dt} + r_{Q4} i_{Q4} = 0; \quad (1.15)$$

- уравнением потокосцепления в воздушном зазоре по оси q

$$\Psi_{\delta q} = x_{aq} (K_M i_q + i_{Q1} + i_{Q2} + i_{Q3} + i_{Q4}); \quad (1.16)$$

- уравнениями потокосцеплений демпферных контуров по оси q :

$$\Psi_{Q1} = \Psi_{\delta q} + x_{\sigma Q1} i_{Q1}, \quad (1.17)$$

$$\Psi_{Q2} = \Psi_{\delta q} + x_{\sigma Q2} i_{Q2}, \quad (1.18)$$

$$\Psi_{Q3} = \Psi_{\delta q} + x_{\sigma Q3} i_{Q3}, \quad (1.19)$$

$$\Psi_{Q4} = \Psi_{\delta q} + x_{\sigma Q4} i_{Q4}; \quad (1.20)$$

- уравнением результирующего потокосцепления по оси q

$$\Psi_q = \Psi_{\delta q} + x_{\sigma} K_M i_q = \Psi_{\delta q} + \Psi_{\sigma q}; \quad (1.21)$$

- уравнением результирующего потокосцепления в воздушном зазоре

$$\Psi_{\delta} = \sqrt{\Psi_{\delta d}^2 + \Psi_{\delta q}^2}; \quad (1.22)$$

- уравнением напряжения статора по оси d

$$u_d = -\omega \Psi_q - \frac{d\Psi_d}{dt} - r_a K_M i_d; \quad (1.23)$$

- уравнением напряжения статора по оси q

$$u_q = \omega \Psi_d - \frac{d\Psi_q}{dt} - r_a K_M i_q, \quad (1.24)$$

где T_j – постоянная инерции ротора; ω – частота вращения ротора; $K_{\text{ПТ}}$ – коэффициент потерь из-за трения в подшипниках и др.; M_T – момент турбины; Ψ_d – потокосцепление по продольной оси d ; Ψ_q – потокосцепление по поперечной оси q ; i_q , i_d – токи статора по соответствующим осям; Ψ_f – потокосцепление обмотки возбуждения; i_f – ток возбуждения;

r_f – активное сопротивление обмотки возбуждения; u_f – напряжение возбуждения; $\Psi_{D1}, \Psi_{D2}, \Psi_{D3}$ – потокосцепления соответствующих демпферных контуров по оси d ; i_{D1}, i_{D2}, i_{D3} – токи соответствующих демпферных контуров по оси d ; r_{D1}, r_{D2}, r_{D3} – активные сопротивления демпферных контуров по оси d ; x_{ad} – сопротивление взаимоиндукции между контурами ротора и статора по оси d ; $\Psi_{\delta q}$ – потокосцепление в воздушном зазоре по оси q ; $x_{\sigma f}$ – реактивное сопротивление рассеяния обмотки возбуждения; $x_{\sigma D1}, x_{\sigma D2}, x_{\sigma D3}$ – реактивные сопротивления рассеяния демпферных контуров по оси d ; $\Psi_{Q1}, \Psi_{Q2}, \Psi_{Q3}$ – потокосцепления соответствующих демпферных контуров по оси q ; i_{Q1}, i_{Q2}, i_{Q3} – токи демпферных контуров по оси q ; r_{Q1}, r_{Q2}, r_{Q3} – активные сопротивления демпферных контуров по оси q ; $\Psi_{\delta d}$ – потокосцепление в воздушном зазоре по оси d ; x_{aq} – сопротивление взаимоиндукции между контурами ротора и статора по оси q ; $x_{\sigma Q1}, x_{\sigma Q2}, x_{\sigma Q3}$ – реактивные сопротивления рассеяния соответствующих демпферных контуров по оси q ; x_{σ} – реактивное сопротивление рассеяния статорной обмотки; $\Psi_{\delta q}$ – потокосцепление рассеяния статора по оси q ; $\Psi_{\delta d}$ – потокосцепление рассеяния статора по оси d ; u_d, u_q – напряжения на выходах статорной обмотки в системе d, q ; K_M – коэффициент эквивалентной мощности СГ.

Из представленной системы уравнений математической модели СГ видно, что коэффициент K_M является масштабирующим сомножителем для токов i_d, i_q и, следовательно, в зависимости от значений K_M изменяется чувствительность СГ к нагрузке, то есть осуществляется регулирование эквивалентной мощности СГ. Причем, если $K_M = 0$, то СГ становится нечувствительным к нагрузке, то есть оказывается эквивалентен шинам бесконечной мощности (ШБМ). Таким образом, введение в систему уравнений СГ коэффициента K_M в виде масштабирующего сомножителя токов i_d, i_q , расширяет функциональные возможности математической модели СГ.

Для обеспечения строго непрерывного преобразования системы напряжений u_d, u_q в трехфазную систему напряжений u_a, u_b, u_c , а также трехфазной системы токов нагрузки СГ: i_a, i_b, i_c в систему токов i_d, i_q в ВМК РВ ЭЭС используется собственный способ конвертации, осуществляемый согласно уравнению координатных преобразований $d, q \Leftrightarrow A, B, C$, переменных $i_d, i_q \rightarrow i_A(t), i_B(t), i_C(t)$ и $u_A(t), u_B(t), u_C(t) \rightarrow u_d, u_q$:

$$\left\{ \begin{array}{l}
i_A(t) \equiv U_{Am} \cdot \sin(\omega t) = i_d \cdot U_m \cdot \cos(\omega t) + i_q \cdot U_m \cdot \sin(\omega t); \\
i_B(t) \equiv U_{Bm} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{2}{3} \cdot \pi\right) = i_d \cdot U_m \cdot \cos\left(\omega t - \frac{2}{3} \cdot \pi\right) + \\
+ i_q \cdot U_m \cdot \sin\left(\omega t - \frac{2}{3} \cdot \pi\right); \\
i_C(t) \equiv U_{Cm} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{4}{3} \cdot \pi\right) = i_d \cdot U_m \cdot \cos\left(\omega t - \frac{4}{3} \cdot \pi\right) + \\
+ i_q \cdot U_m \cdot \sin\left(\omega t - \frac{4}{3} \cdot \pi\right); \\
u_d = \frac{2}{3} \left[u_A(t) \cdot U_m \cdot \cos(\omega t) + u_B(t) \cdot U_m \cdot \cos\left(\omega t - \frac{2}{3} \cdot \pi\right) + \right. \\
\left. + u_C(t) \cdot U_m \cdot \cos\left(\omega t - \frac{4}{3} \cdot \pi\right) \right]; \\
u_q = \frac{2}{3} \left[u_A(t) \cdot U_m \cdot \sin(\omega t) + u_B(t) \cdot U_m \cdot \sin\left(\omega t - \frac{2}{3} \cdot \pi\right) + \right. \\
\left. + u_C(t) \cdot U_m \cdot \sin\left(\omega t - \frac{4}{3} \cdot \pi\right) \right],
\end{array} \right. \quad (1.25)$$

где i_d, i_q – представленные напряжениями математические переменные, получаемые по уравнениям (1.11) и (1.21) в результате непрерывного и методически точного решения системы уравнений СГ (1.11–1.24), а $u_A(t), u_B(t), u_C(t)$ – формирующиеся в модельных фазных физических узлах статорных обмоток мгновенные значения напряжений; $i_A(t), i_B(t), i_C(t)$ – представленные напряжениями математические переменные мгновенных значений токов фаз A, B, C статорных обмоток, получающиеся в результате координатного преобразования токов i_d, i_q по уравнениям (1.25); u_d, u_q – представленные напряжениями математические переменные уравнений (1.23, 1.24), получающиеся в результате координатного преобразования напряжений $u_A(t), u_B(t), u_C(t)$ по уравнениям (1.25); $U_m \cdot \cos(\omega t), U_m \cdot \cos\left(\omega t - \frac{2}{3} \cdot \pi\right), U_m \cdot \cos\left(\omega t - \frac{4}{3} \cdot \pi\right)$

и $U_m \cdot \sin(\omega t)$, $U_m \cdot \sin\left(\omega t - \frac{2}{3} \cdot \pi\right)$, $U_m \cdot \sin\left(\omega t - \frac{4}{3} \cdot \pi\right)$ – ортогональные трехфазные базисы координатных преобразований (1.25), формируемые с использованием ω , получаемой в результате непрерывного решения уравнения (1.1), а также любого другого задаваемого значения ω , постоянного или изменяемого нужным образом, в том числе функционально.

Таким образом, в ходе решения представленных уравнений формируются напряжения фаз СГ: $u_a(t)$, $u_b(t)$, $u_c(t)$. Независимые переменные – токи фаз: $i_a(t)$, $i_b(t)$, $i_c(t)$, определяемые нагрузкой СГ, формируются в результате решения трехфазной системы дифференциальных уравнений, каждое из которых описывает фазный LR – контур с учетом реакции нагрузки СГ, находящийся под воздействием соответствующего фазного напряжения. При этом, указанными R , L параметрами при необходимости могут воспроизводиться аналогичные параметры x_T , r_T блочного трансформатора.

В настоящее время в эксплуатации находятся разнообразные системы возбуждения (СВ) с обычными электромашинными возбудителями, включая высокочастотные и автоматические регуляторы пропорционального действия, которые реализуют принцип управляемого компаундирования, в том числе фазового, и регулирования по отклонению напряжения, а эксплуатируемые современные СВ основаны на использовании бесщеточных возбудителей, тиристорных управляемых выпрямителей и автоматических регуляторов возбуждения сильного действия (АРВ-СД) [14–18]. Поскольку данные СВ были разработаны в разное время, используют различные принципы и реализованы на разнотипной элементной базе, то очевидно имеют существенно отличающиеся математические модели. Поэтому в ВМК РВ ЭЭС создана специальная универсальная математическая модель СВ. В данной модели все параметры и коэффициенты изменяются в диапазоне $(0 \dots P_{\max})$, где P_{\max} представляет собой для каждого регулируемого параметра наибольшее среди объединяемых параметров значение, в том числе учитывая возможное завышение параметра для исследовательских целей. Таким образом, изменяя параметры передаточных функций и задавая требуемые коэффициенты, используемую универсальную схему можно адаптировать под требуемый тип СВ с любым регулятором.

Поскольку в лабораторных работах, входящих в данное издание, предполагается работа с АРВ-СДП (1), то на рис. 1 приводится полная структурная схема именно этого АРВ, которая получается из универсальной математической модели СВ путем обнуления неиспользуемых параметров.

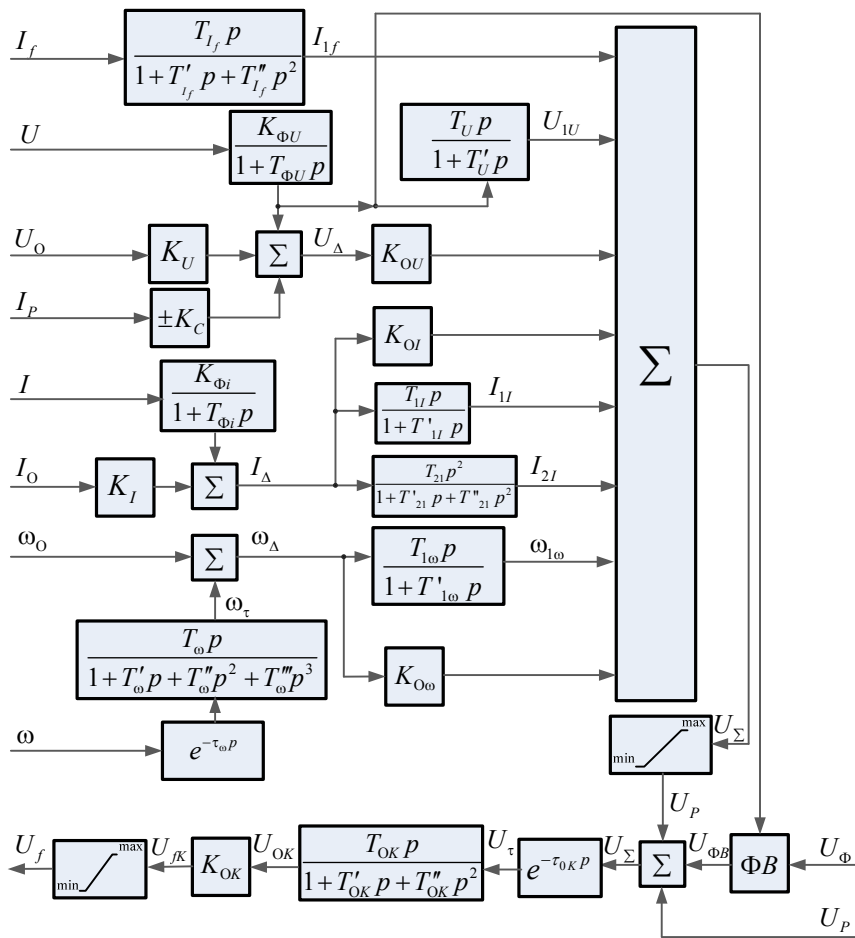


Рис. 1. Структурная схема системы возбуждения с АРВ-СДП(1)

Основные обозначения на рис. 1:

$W(p) = e^{-\tau_{\text{Б}}p} \frac{K_{\text{Б}}}{1 + T_{\text{Б}}p}$ – передаточная функция быстродействующего канала отклонения напряжения статора СГ;

канала отклонения напряжения статора СГ;

$W(p) = \frac{1}{1 + T_{\text{Ф}}p}$ – передаточная функция фильтра нижних частот интегрирующего канала отклонения напряжения статора СГ;

интегрирующего канала отклонения напряжения статора СГ;

$W(p) = \frac{K_{\text{И}}}{T_{\text{И}}p}$ – передаточная функция собственно интегратора интегрирующего канала отклонения напряжения статора СГ;

$K_{\text{О}} = (0 \dots 1)$ – задаваемый коэффициент передачи жесткой отрицательной обратной связи интегрирующего канала отклонения напряжения;

$K_{\text{ОУ}}$ – задаваемый коэффициент передачи канала регулирования возбуждения по отклонению напряжения статора СГ;

$K_{\text{ОИ}}$ – задаваемый коэффициент передачи канала регулирования возбуждения по отклонению тока статора СГ;

$$W(p) = \frac{T_{1U}p}{1 + T'_{1U}p + T''_{1U}p^2} - \text{передаточная функция канала регулиро-}$$

вания возбуждения по первой производной напряжения статора СГ;

K_{1U} – задаваемый коэффициент передачи канала регулирования возбуждения по первой производной напряжения статора СГ;

$$W(p) = \frac{T_{1If}p}{1 + T'_{1If}p + T''_{1If}p^2 + T'''_{1If}p^3} - \text{передаточная функция канала}$$

регулирования возбуждения по первой производной тока возбуждения СГ;

K_{1If} – задаваемый коэффициент передачи канала регулирования возбуждения по первой производной тока возбуждения СГ;

$$W(p) = e^{-\tau_{\omega}p} \frac{K_{\omega}T_{\omega}p}{1 + T'_{\omega}p + T''_{\omega}p^2 + T'''_{\omega}p^3} - \text{передаточная функция блока}$$

измерения и преобразования частоты;

$$W(p) = \frac{T_{O\omega}p}{1 + T'_{O\omega}p + T''_{O\omega}p^2} - \text{передаточная функция канала регулиро-}$$

вания возбуждения по отклонению частоты;

$K_{O\omega}$ – задаваемый коэффициент передачи канала регулирования возбуждения по отклонению частоты;

$$W(p) = \frac{T_{1\omega}p}{1 + T'_{1\omega}p + T''_{1\omega}p^2} - \text{передаточная функция канала регулиро-}$$

вания возбуждения по первой производной частоты;

$K_{1\omega}$ – задаваемый коэффициент передачи канала регулирования возбуждения по первой производной частоты.

Математическая переменная механического момента турбины (момент турбины), вводимая в дифференциальное уравнение движения ротора генератора (1.1), формируется в результате воспроизведения универсальной математической модели первичного двигателя (ПД) генератора, которая получается путем анализа и синтеза полных и апробированных математических моделей разнообразных паровых турбин с различными котлоагрегатами и автоматическими системами их регулирования, вспомогательного оборудования или гидротурбины и иногда газовых, парогазовых турбин и ветродвигателей. Аналогично математической модели СВ, все настроечные коэффициенты и параметры универсальной математической модели ПД можно изменять, регулировать, в том числе обнулять, что позволяет различным образом адаптировать и видоизменить универсальную математическую модель ПД, а также

формировать любые нужные модели ПД. Поскольку в лабораторных работах исследуется функционирование паровой турбины, то основное внимание будет уделено именно этому виду ПД и его автоматической системе регулирования частоты и мощности (АРЧМ), причем в лабораторных работах математическая модель котлоагрегата упрощается и задается только постоянным давлением пара на выходе котла.

Математическая модель паровых турбин получена путем анализа и синтеза опубликованных результатов об изучении конструктивных исполнений, различных режимов работы и их специфики, моделирования различных видов паровых турбин: конденсационных, в том числе с промежуточным пароперегревом; с противодавлением; с промышленными и теплофикационными отборами пара, и обеспечивает совместно с АРЧМ адекватное воспроизведение функционирования всех типов паровых турбин [19–24]. Структурная схема математической модели паровой турбины и автоматической системы регулирования частоты и мощности турбин представлена на рис. 2.

Основные обозначения на рис. 2:

$K_{ЗМ}$ – коэффициент задания нагрузки энергоблока, определяющий в регуляторе мощности (РМ) задаваемую генератору мощность, которая при программном изменении может отображать нужный график нагрузки;

$K_{ПАУ}$ – коэффициент задания послеаварийной разгрузки (догрузки) энергоблока, воздействующей через РМ и через электрогидравлический преобразователь (ЭГП), который обеспечивает заданный закон воздействия;

$K_{АРЧМ}$ – многофункциональный программно-изменяемый коэффициент передачи, используемый например для воспроизведения системного АРЧМ;

$K_{МУТ}$ – коэффициент передачи механизма управления турбиной (МУТ);

$$\frac{P_{МУТ}}{P_{\Delta M}} = \frac{1}{1 + T_{МУТ}p} \text{ – передаточная функция МУТ;}$$

$$\frac{\mu_{\eta}}{P_{\Sigma}} = \frac{1}{1 + T_{\eta}p} \text{ – передаточная функция промежуточного золотника}$$

регулятора турбины;

$$\frac{\rho_{ПП}}{D_{ПП}} = \frac{1}{T_{ПП}p} \text{ – передаточная функция промежуточного пароперегревателя.}$$

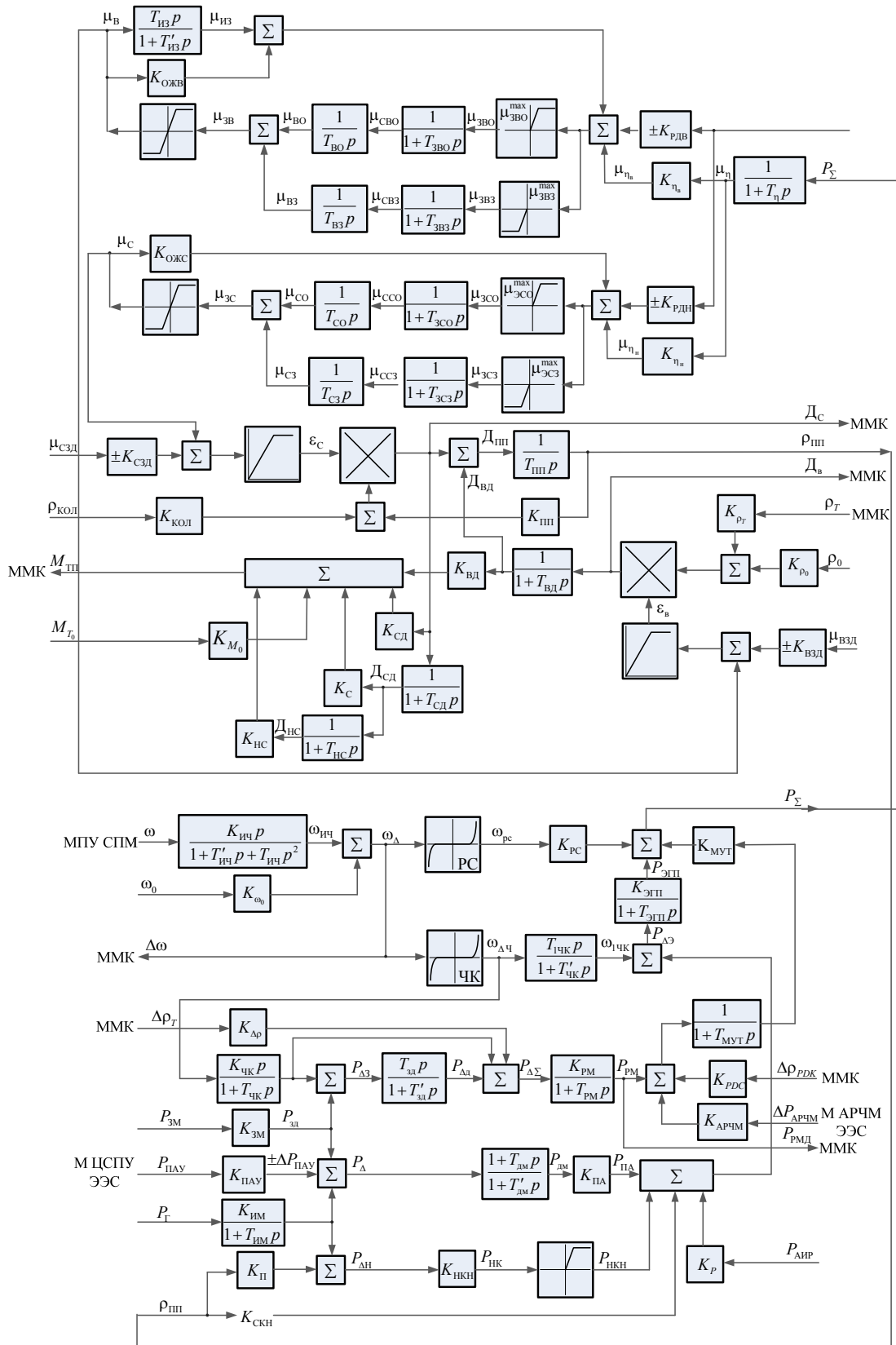


Рис. 2. Структурная схема математической модели паровой турбины и автоматической системы регулирования частоты и мощности турбин

1.2. Математическая модель трансформаторов и автотрансформаторов

Применяемые в настоящее время различные виды трехфазных трансформаторов и автотрансформаторов включают в себя трехфазные группы однофазных двухобмоточных и трехобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов, которые имеют отдельные магнитопроводы для каждой фазы, а также трехфазные двухобмоточные и трехобмоточные трансформаторы и автотрансформаторы. Помимо этого, обмотки низшего и среднего напряжения трансформаторов могут быть расщепленными на 2–4 электрически несвязанных цепи. Принимая во внимание схемы соединения обмоток фаз: Y_0 , Y , Δ и различные их сочетания, перечень используемых видов трансформаторов и автотрансформаторов будет полным, не считая редко используемых четырехобмоточных трансформаторов, которые при необходимости могут быть замещены двумя двухобмоточными трансформаторами [25]. В качестве макета для синтеза универсальной всережимной математической модели трехфазного трансформатора (автотрансформатора) принят адаптируемый пятиобмоточный трансформатор, который объединяет все разнообразие перечисленных трансформаторов и автотрансформаторов.

Согласно вышеуказанному подходу к моделированию трансформаторов, их универсальная математическая модель объединяет в себе системы уравнений трех фаз пятиобмоточного трансформатора, каждая из которых включает в себя:

1. Уравнения, магнитосвязанных потоком данной фазы контуров обмоток, вида

$$W_{i\xi} \frac{d\Phi_\xi}{dt} + L_{i\xi} \frac{di_{i\xi}}{dt} + r_{i\xi} i_{i\xi} - u_{i\xi} = 0,$$

где $W_{i\xi}$ – число витков i -й обмотки ($i = 1, 2, \dots, 5$) фазы $\xi = A, B, C$; Φ_ξ – мгновенное значение основного магнитного потока ξ ; $L_{i\xi}$ – индуктивность рассеивания i -й обмотки фазы ξ ; $i_{i\xi}$ – мгновенное значение тока в i -й обмотке фазы ξ ; $u_{i\xi}$ – мгновенное значение напряжения в i -й обмотке фазы ξ ;

2. Уравнения баланса магнитодвижущих сил для каждой фазы

$$\sum_{i=1}^{i=5} i_{i\xi} \cdot W_{i\xi} = F_{\mu\xi},$$

где $F_{\mu\xi}$ – намагничивающая сила электромагнитной системы фазы ξ пятиобмоточного трансформатора, определяемая с учетом возможного на-

сыщения стали для Φ_ξ выражением $F_{\mu\xi} = K_\mu \Phi_\xi^p$ [25, 26], в котором K_μ – коэффициент размерности, реализуемых при переходе к относительным единицам измерения, а p – обычно нечетный показатель степени, принимаемый $p=3$ или $p=5$, хотя наиболее эффективная аппроксимация нелинейной зависимости $F_{\mu\xi} = f(\Phi_\xi)$ достигается при нецелых значениях p [26].

3. Уравнение формирования $u_{i\xi}$ в зависимости от схемы соединения обмоток W_{iA} , W_{iB} , W_{iC} :

$$u_{iA} = \begin{cases} u_{Ai} & \text{для схемы соединения } Y \text{ и } Y_0; \\ \frac{u_{Ai} - u_{Bi}}{\sqrt{3}} & \text{для схемы соединения } \Delta \end{cases}$$

$$u_{iB} = \begin{cases} u_{Bi} & \text{для схемы соединения } Y \text{ и } Y_0; \\ \frac{u_{Bi} - u_{Ci}}{\sqrt{3}} & \text{для схемы соединения } \Delta \end{cases}$$

$$u_{iC} = \begin{cases} u_{Ci} & \text{для схемы соединения } Y \text{ и } Y_0; \\ \frac{u_{Ci} - u_{Ai}}{\sqrt{3}} & \text{для схемы соединения } \Delta \end{cases}$$

где u_{Ai} , u_{Bi} , u_{Ci} – мгновенное значение соответствующих фазных напряжений.

1.3. Математическая модель линий электропередач

Физическая сущность большинства элементов в ЭЭС позволяет считать их, без особой погрешности, элементами с сосредоточенными параметрами, однако для линий электропередач (ЛЭП), особенно длинной свыше 50 км сверхвысокого и ультравысокого класса напряжения, учет распределенности их параметров во многих случаях становится необходим. При этом приближенный учет активных поперечных проводимостей ЛЭП является допустимым для точности воспроизведения реального спектра трехфазных процессов, а функциональное управление этой проводимостью позволяет учесть процесс коронирования ЛЭП. Кроме того, хотя распределенность параметров в ЛЭП неоднородна и ЛЭП в строгом представлении являются несимметричными, повсеместно используемое транспонирование ЛЭП симметрирует их. Таким об-

разом, ЛЭП считаются симметричными и описываются известной, апробированной системой уравнений [27]:

$$\begin{aligned} (L_{\Phi i} - M_{M\Phi i}) \frac{\partial i_{Ai}}{\partial t} + r_{\Phi i} i_{Ai} + (L_{3i} + 3M_{M\Phi i}) \frac{\partial i_{0i}}{\partial t} + r_{3i} 3i_{0i} &= -\frac{\partial u_{Ai}}{\partial l_i}; \\ (L_{\Phi i} - M_{M\Phi i}) \frac{\partial i_{Bi}}{\partial t} + r_{\Phi i} i_{Bi} + (L_{3i} + 3M_{M\Phi i}) \frac{\partial i_{0i}}{\partial t} + r_{3i} 3i_{0i} &= -\frac{\partial u_{Bi}}{\partial l_i}; \\ (L_{\Phi i} - M_{M\Phi i}) \frac{\partial i_{Ci}}{\partial t} + r_{\Phi i} i_{Ci} + (L_{3i} + 3M_{M\Phi i}) \frac{\partial i_{0i}}{\partial t} + r_{3i} 3i_{0i} &= -\frac{\partial u_{Ci}}{\partial l_i}; \\ C_{\Phi i} \frac{\partial u_{Ai}}{\partial t} + 3C_{M\Phi i} \frac{\partial (u_{Ai} - u_{0i})}{\partial t} &= -\frac{\partial i_{Ai}}{\partial l_i}; \\ C_{\Phi i} \frac{\partial u_{Bi}}{\partial t} + 3C_{M\Phi i} \frac{\partial (u_{Bi} - u_{0i})}{\partial t} &= -\frac{\partial i_{Bi}}{\partial l_i}; \\ C_{\Phi i} \frac{\partial u_{Ci}}{\partial t} + 3C_{M\Phi i} \frac{\partial (u_{Ci} - u_{0i})}{\partial t} &= -\frac{\partial i_{Ci}}{\partial l_i}, \end{aligned}$$

где для некоторой i -й ЛЭП или ее участка:

$L_{\Phi i}$ – индуктивность контура: фаза линии – обратный эквивалентный провод (земля), обусловленная только магнитным потоком в воздухе, при пренебрежении, ввиду малости, соответствующей индуктивности, определяемой магнитным потоком в самом проводе фазы, и в предположении бесконечно большой проводимости земли;

L_{3i} – дополнительная индуктивность контура: фаза-земля, обусловленная только потоком в земле;

$M_{M\Phi i}$ – взаимоиндуктивность между любыми двумя из трех контуров фаза-земля;

$r_{\Phi i}$ – активное сопротивление фазы линии;

r_{3i} – активное сопротивление обратного эквивалентного провода (земли);

$C_{\Phi i}$ – емкость провода фазы относительно земли;

$C_{M\Phi i}$ – емкость между любыми двумя проводами фаз линии;

i_{Ai}, i_{Bi}, i_{Ci} – мгновенные значения фазных токов;

u_{Ai}, u_{Bi}, u_{Ci} – мгновенные значения фазных напряжений;

$i_{0i} = (i_{Ai} + i_{Bi} + i_{Ci})/3$ – мгновенное значение тока нулевой последовательности;

$u_{0i} = (u_{Ai} + u_{Bi} + u_{Ci})/3$ – мгновенное значение напряжений нулевой последовательности;

l_i – длина i -й ЛЭП или ее участка.

Однако приведенная система уравнений практически не используется, а служит математической основой для формирования различных модифицированных систем уравнений, представляющих собой более удобные для применения математические модели ЛЭП. В общем случае, в связи с необходимостью учета электромагнитного и электростатического взаимовлияния параллельных линий или соответствующих участков, а также грозозащитных тросов, используется симметричная система составляющих α , β , o . Достоинством такой математической модели является компактность, то есть естественное количество уравнений, связывающих токи и напряжения нулевой последовательности, что позволяет более просто осуществлять воспроизведение взаимовлияния параллельных цепей.

Для некоторой i -й ЛЭП или ее участка исходная система уравнений приобретает вид в системе α , β , o [27]:

$$\begin{aligned} L_i \frac{\partial i_{\alpha i}}{\partial t} + r_i i_{\alpha i} &= -\frac{\partial u_{\alpha i}}{\partial t}; & C_i \frac{\partial u_{\alpha i}}{\partial t} &= -\frac{\partial i_{\alpha i}}{\partial t}; \\ L_i \frac{\partial i_{\beta i}}{\partial t} + r_i i_{\beta i} &= -\frac{\partial u_{\beta i}}{\partial t}; & C_i \frac{\partial u_{\beta i}}{\partial t} &= -\frac{\partial i_{\beta i}}{\partial t}; \\ L_{oi} \frac{\partial i_{oi}}{\partial t} + r_{oi} i_{oi} &= -\frac{\partial u_{oi}}{\partial t}; & C_{oi} \frac{\partial u_{oi}}{\partial t} &= -\frac{\partial i_{oi}}{\partial t}, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} i_{\alpha i} &= \frac{2}{3} i_{Ai} - \frac{1}{3} (i_{Bi} + i_{Ci}); & u_{\alpha i} &= \frac{2}{3} u_{Ai} - \frac{1}{3} (u_{Bi} + u_{Ci}); \\ i_{\beta i} &= \frac{1}{\sqrt{3}} (i_{Bi} - i_{Ci}); & u_{\beta i} &= \frac{1}{\sqrt{3}} (u_{Bi} - u_{Ci}); \\ i_{oi} &= \frac{1}{3} (i_{Ai} + i_{Bi} + i_{Ci}); & u_{oi} &= \frac{1}{3} (u_{Ai} + u_{Bi} + u_{Ci}) \end{aligned}$$

– представляют собой мгновенные значения токов и напряжений в системе α , β , o ;

L_i – индуктивность для прямой и обратной последовательностей, именуемая также рабочей индуктивностью трехфазной линии;

C_i – емкость для прямой и обратной последовательностей, именуемая также рабочей емкостью трехфазной линии;

r_i – активное сопротивление трехфазной линии для прямой и обратной последовательностей, представляющее собой активное сопротивление провода фазы;

L_{oi} – собственная индуктивность i -й трехфазной линии для нулевой последовательности;

C_{OI} – собственная емкость i -й трехфазной линии для нулевой последовательности;

i_{oi} – собственное активное сопротивление i -й трехфазной линии для нулевой последовательности.

Особое внимание уделяется параметрам нулевой последовательности из-за сложного индуктивного и электростатического взаимовлияния линии и земли, а также наличия близких параллельных цепей: линий, участков линий, грозозащитных тросов, взаимодействующих между собой через землю. В частности, проведенные многочисленные исследования [27] указывают на необходимость учета для нулевой последовательности явления поверхностного эффекта в земле, тогда как в проводах ЛЭП им можно пренебрегать, что не вызовет существенную погрешность [27].

Активное сопротивление земли, определяемое формулой [27]:

$$r_3 = \pi^2 \cdot f \cdot 10^{-4} \text{ [Ом/м]},$$

практически не зависит от удельной проводимости грунта:

$$\gamma = (10^{-5} \dots 10^{-2}) \text{ [Ом/см}^{-1}\text{]},$$

поскольку изменение последней компенсируется соответствующим увеличением или уменьшением сечения, по которому распространяется ток в земле.

Индуктивность провода, обусловленная магнитным потоком в земле, определяется формулой [27]:

$$L_3 = 2 \ln \frac{D_3}{2h_{cp}} \cdot 10^{-4} \text{ [Гн/км]},$$

где f – частота тока возврата [Гц]; h_{cp} – средняя геометрическая высота проводов фаз над землей [м].

Из приведенных уравнений очевидна зависимость распространения тока в земле от его частоты, а также возможность описания этого процесса посредством эквивалентного обратного провода, который состоит из параллельных $r_3 L_3$ -ветвей с распределенными или сосредоточенными параметрами.

В соответствии с опубликованными данными [27] для моделирования эквивалентного обратного провода достаточно использовать три параллельных $r_3 L_3$ -ветви, что обеспечит приемлемую точность в диапазоне частот до 1000 Гц, что охватывает весь значимый диапазон реальных квазиустановившихся и переходных процессов в ЭЭС, в том числе коммутационные перенапряжения. Вычисление параметров указанных $r_3 L_3$ -ветвей производится исходя из условия [27]:

$$\sum_{k=1}^3 \frac{1}{r_{3k} + j\omega L_{3k}} = \frac{1}{r_{3k}(\omega_k) + j\omega L_3(\omega_k)},$$

где $r_{3k}L_{3k}$ – искомые параметры r_3L_3 -ветвей, определение которых осуществляется в результате решения системы из шести алгебраических уравнений (три для r_{3k} и три для L_{3k} для трех значений ω_k , обычно:

$$\omega_1 = 70 \text{ Гц}, \quad \omega_2 = 200 \text{ Гц}, \quad \omega_3 = 800 \text{ Гц}.$$

Учитывая, что учет поверхностного эффекта в земле носит уточняющий характер, следует считать его применение оправданным только для параметров нулевой последовательности ЛЭП. Учет электромагнитного взаимовлияния параллельных линий считается достаточным учитывать только традиционным способом [27], предполагающим для каждого индуцируемого тока нулевой последовательности одну $r_{ij}L_{ij}$ -ветвей.

В общем случае, для универсальной математической модели трехфазной ЛЭП безотносительно к её параметрам и воспроизводимым процессам, наиболее удобен способ применения вышеизложенной системы уравнений, учитывающей распределенность параметров ЛЭП и поверхностный эффект в земле. Теоретическую основу такого способа составляет методика, базирующаяся на волновой интерпретации процессов в ЛЭП [27]. В соответствии с этой методикой, применительно к идеализированной ЛЭП рассматривается распространение волн токов и напряжений. Идеализированная ЛЭП:

- не имеет нелинейных элементов;
- симметрична и однородна, то есть имеет равномерное распределение параметров r_i, g_i, L_i, C_i вдоль линии;
- имеет продольные активные сопротивления r_i и поперечные активные проводимости g_i , равные нулю, потери в которой учитываются с помощью коэффициента затухания, но без влияния частоты (поверхностного эффекта) как для неискажающей линии: $r/L = g/C$ [27].

При таких условиях возможно получение общего решения вышеобозначенной системы уравнений, в котором постоянные интегрирования выражаются через операторные изображения напряжения и тока начала-конца ЛЭП:

$$\begin{aligned} U_{\xi Hi}(p) - Z_{\xi i} I_{\xi Hi}(p) &= [U_{\xi Ki}(p) - Z_{\xi i} I_{\xi Ki}(p)] e^{-p\tau_{\xi j}} e^{-\sigma_{\xi j}}, \\ U_{\xi Ki}(p) + Z_{\xi i} I_{\xi Ki}(p) &= [U_{\xi Hi}(p) + Z_{\xi i} I_{\xi Hi}(p)] e^{-p\tau_{\xi j}} e^{-\sigma_{\xi j}}, \end{aligned}$$

где H и K – обозначение условного начала и конца линии или ее участка;

$\xi = \alpha, \beta, o$ – индекс составляющих системы α, β, o ; $Z_{\xi i} = \sqrt{\frac{L_{\xi i}}{C_{\xi i}}}$ – волно-

вое сопротивление идеализированной линии для соответствующих составляющих системы α, β, o ; $\tau_{\xi i} = l_i \sqrt{L_{\xi i} C_{\xi i}}$ – постоянная изменения фазы волны соответствующих составляющих α, β, o системы в идеали-

зированной линии длиной l_i ; $\left(\frac{r_{\xi i}}{2Z_{\xi i}} + \frac{g_{\xi i}}{2} Z_{\xi i} \right) \cdot l_i$ – параметр затухания

соответствующих составляющих α, β, o системы, обусловленного потерями в реальной линии длиной l_i из-за $r_{\xi i} \neq 0$ и $g_{\xi i} \neq 0$.

Наряду с функциональным коэффициентом затухания $e^{-\sigma_{\xi}} e^{-\rho \tau_{\xi i}}$ волн напряжения и тока, уравнения содержат функцию запаздывания $e^{-\rho \tau_{\xi i}}$, которая показывает изменения фазы волн, а переходя к оригиналам запаздывания, уравнения принимают вид [27]:

$$U_{\xi Hi}(t) - Z_{\xi i} i_{\xi Hi}(t) = \left[U_{\xi Ki}(t - \tau_{\xi i}) - Z_{\xi i} i_{\xi Ki}(t - \tau_{\xi i}) \right] e^{-\sigma_{\xi i}};$$

$$U_{\xi Ki}(t) + Z_{\xi i} i_{\xi Ki}(t) = \left[U_{\xi Hi}(t - \tau_{\xi i}) + Z_{\xi i} i_{\xi Hi}(t - \tau_{\xi i}) \right] e^{-\sigma_{\xi i}},$$

где $f(t - \tau_{\xi i})$ – функция запаздывания.

Для учета поверхностного эффекта в земле в данных уравнениях необходимо явно выделить в выражениях для Z_{oi} , τ_{oi} параметры r_{3i} и L_{3i} , а затем заменить их параметрами трех параллельных $r_{3i} L_{3i}$ -ветвей: r'_3, L'_3 ; r''_3, L''_3 ; r'''_3, L'''_3 . Принимая во внимание вышеизложенное, можно составить универсальную всережимную математическую модель i -й многоцепной ЛЭП:

$$U_{\alpha Hi}(t) - Z_i i_{\alpha Hi}(t) = \left[U_{\alpha Ki}(t - \tau_i) - Z_i i_{\alpha Ki}(t - \tau_i) \right] \cdot e^{-\sigma_i};$$

$$U_{\alpha Ki}(t) + Z_i i_{\alpha Ki}(t) = \left[U_{\alpha Hi}(t - \tau_i) + Z_i i_{\alpha Hi}(t - \tau_i) \right] \cdot e^{-\sigma_i};$$

$$U_{\beta Hi}(t) - Z_i i_{\beta Hi}(t) = \left[U_{\beta Ki}(t - \tau_i) - Z_i i_{\beta Ki}(t - \tau_i) \right] \cdot e^{-\sigma_i};$$

$$U_{\beta Ki}(t) + Z_i i_{\beta Ki}(t) = \left[U_{\beta Hi}(t - \tau_i) + Z_i i_{\beta Hi}(t - \tau_i) \right] \cdot e^{-\sigma_i};$$

$$U_{oHi}(t) - Z'_{oi} i'_{oHi}(t) = \left[U_{oKi}(t - \tau'_{oi}) - Z'_{oi} i'_{oKi}(t - \tau'_{oi}) \right] \cdot e^{-\sigma'_{oi}};$$

$$U_{oKi}(t) + Z'_{oi} i'_{oKi}(t) = \left[U_{oHi}(t - \tau'_{oi}) + Z'_{oi} i'_{oHi}(t - \tau'_{oi}) \right] \cdot e^{-\sigma'_{oi}};$$

$$U_{oHi}(t) - Z''_{oi} i''_{oHi}(t) = \left[U_{oKi}(t - \tau''_{oi}) - Z''_{oi} i''_{oKi}(t - \tau''_{oi}) \right] \cdot e^{-\sigma''_{oi}};$$

$$\begin{aligned}
U_{OKi}(t) + Z''_{O_i} i''_{OKi}(t) &= [U_{OHi}(t - \tau''_{O_i}) + Z''_{O_i} i''_{OHi}(t - \tau''_{O_i})] \cdot e^{-\sigma''_{O_i}}; \\
U_{OHi}(t) - Z''_{O_i} i''_{OHi}(t) &= [U_{OKi}(t - \tau''_{O_i}) - Z''_{O_i} i''_{OKi}(t - \tau''_{O_i})] \cdot e^{-\sigma''_{O_i}}; \\
U_{OKi}(t) + Z''_{O_i} i''_{OKi}(t) &= [U_{OHi}(t - \tau''_{O_i}) + Z''_{O_i} i''_{OHi}(t - \tau''_{O_i})] \cdot e^{-\sigma''_{O_i}}; \\
i_{OHi}(t) &= i'_{OHi}(t) + i''_{OHi}(t) + i'''_{OHi}(t); \\
i_{OKi}(t) &= i'_{OKi}(t) + i''_{OKi}(t) + i'''_{OKi}(t); \\
U_{OHi}(t) &= U_{Hii}(t) - U_{Hil}(t) - \dots - U_{Hij}(t) - \dots - U_{Hin}(t); \\
U_{OKi}(t) &= U_{Kii}(t) - U_{Kil}(t) - \dots - U_{Kij}(t) - \dots - U_{Kin}(t); \\
U_{\alpha Hi}(t) &= \frac{2}{3} U_{AHi}(t) - \frac{1}{3} [U_{BHi}(t) + U_{CHi}(t)]; \\
U_{\beta Hi}(t) &= \frac{1}{\sqrt{3}} [U_{BHi}(t) - U_{CHi}(t)]; \\
U_{Hii}(t) &= \frac{1}{3} [U_{AHi}(t) + U_{BHi}(t) + U_{CHi}(t)]; \\
U_{\alpha Ki}(t) &= \frac{2}{3} U_{AKi}(t) - \frac{1}{3} [U_{BKi}(t) + U_{CKi}(t)]; \\
U_{\beta Ki}(t) &= \frac{1}{\sqrt{3}} [U_{BKi}(t) - U_{CKi}(t)]; \\
U_{Kii}(t) &= \frac{1}{3} [U_{AKi}(t) + U_{BKi}(t) + U_{CKi}(t)]; \\
i_{AHi}(t) &= i_{OHi} + i_{\alpha Hi}; \\
i_{BHi}(t) &= i_{OHi}(t) - \frac{1}{2} i_{\alpha Hi}(t) + \frac{\sqrt{3}}{2} i_{\beta Hi}(t); \\
i_{CHi}(t) &= i_{OHi}(t) - \frac{1}{2} i_{\alpha Hi}(t) - \frac{\sqrt{3}}{2} i_{\beta Hi}(t); \\
i_{AKi}(t) &= i_{OKi} + i_{\alpha Ki}; \\
i_{BKi}(t) &= i_{OKi}(t) - \frac{1}{2} i_{\alpha Ki}(t) + \frac{\sqrt{3}}{2} i_{\beta Ki}(t); \\
i_{CKi}(t) &= i_{OKi}(t) - \frac{1}{2} i_{\alpha Ki}(t) - \frac{\sqrt{3}}{2} i_{\beta Ki}(t),
\end{aligned}$$

где $Z_i = Z_{\alpha i} = Z_{\beta i} = \sqrt{\frac{L_i}{C_i}}$ – волновое сопротивление для составляющих α ,

β , такое же, как и для составляющих прямой и обратной последовательностей.

1.4. Математическая модель синхронных и асинхронных двигателей

Принципиальные отличия между синхронным двигателем (СД) и СГ состоят в противоположном направлении электромагнитного и электромеханического моментов, а также в физической сущности последнего, который для СД является моментом сопротивления M_c приводимого механизма (ПМ). Помимо этого, некоторые отличия и соответствующая специфика есть в СВ. Таким образом, в рассмотренной универсальной математической модели СГ математическая модель ПД заменяется математической моделью ПМ, математическая модель СВ для СГ заменяется на соответствующую математическую модель СВ для СД, а также обеспечивается указанное формирование моментов в уравнении движения ротора, то универсальная математическая модель СГ преобразуется в универсальную математическую модель СД.

Для преобразования универсальной математической модели СД в аналогичную модель асинхронного двигателя (АД) предусматривается возможность обнуления напряжения возбуждения в уравнении роторного контура двигателя, используемое для моделирования обмотки возбуждения. Кроме того, если отсутствует какая-либо несимметрия роторных контуров, то их параметры задаются симметрично для уравнений роторных контуров по осям d и q . Таким образом, при моделировании АД из универсальной математической модели СД исключается обмотка возбуждения, а в остальном их универсальные математические модели идентичны.

В результате, для создания универсальной математической модели СД, и соответственно АД, необходимо синтезировать универсальную математическую модель ПМ и СВ для СД.

Согласно [28, 29] наиболее распространённой и апробированной математической моделью множества разных ПМ является уравнение моментно-скоростной характеристики вида:

$$m_c = m_{\text{нач}} + (m_{\text{ном}} - m_{\text{нач}}) \left(\frac{\omega_d}{\omega_{\text{дн}}} \right)^p,$$

где $m_{\text{нач}}$ – начальный статистический момент сопротивления ПМ; $m_{\text{ном}}$ – номинальный момент сопротивления, развиваемый ПМ при номинальном вращающем моменте электродвигателя, соответствующем его номинальной активной мощности и синхронной номинальной частоте $\omega_0 = 314 \text{ с}^{-1}$; ω_d – фактическая частота вращения ротора электродвигателя; $\omega_{\text{дн}}$ – номинальная частота вращения ротора электродвигателя,

при которой момент сопротивления ПМ равен номинальному, получаемому при синхронной номинальной частоте вращения электромагнитного поля статора ω_0 ; p – показатель степени, зависящей от вида ПМ, принимаемый чаще всего равным $p = 2$ или $p = 1$.

Для произвольной загрузки ПМ СД или АД, определяемой коэффициентов загрузки $k_3 = P/P_{\text{НОМ}}$ и произвольной частоты сети $\omega_c \neq \omega_0$, а также для базисного момента $m_s = m_{\text{НОМ}}/\cos \varphi_{\text{H}}$, который соответствует номинальной мощности и базисной частоте ω_0 , приведенное уравнение в относительных единицах имеет вид:

$$M_{\text{C}} = \left[m_{\text{СТ}} + (1 - m_{\text{СТ}}) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{H}}} \right)^p \right] k_3 \cdot \cos \varphi_{\text{H}},$$

где $M_{\text{C}} = \frac{m_{\text{с}}}{m_{\text{s}}}$; $m_{\text{СТ}} = \frac{m_{\text{нач}}}{m_{\text{НОМ}}}$; $\omega = \frac{\omega_{\text{Д}}}{\omega_0}$; $\omega_{\text{H}} = \frac{\omega_{\text{ДН}}}{\omega_0}$.

После введения обозначений и соответствующих преобразований, уравнение приобретает вид

$$M_{\text{C}} = M_{\text{СТ}} + M_{\omega} \cdot \omega^p,$$

где $M_{\text{СТ}} = m_{\text{СТ}} \cdot k_3 \cdot \cos \varphi_{\text{H}}$ – статическая (частотно-независимая) часть момента сопротивления ПМ; $M_{\omega} = \frac{(1 - m_{\text{СТ}}) k_3 \cdot \cos \varphi_{\text{H}}}{\omega_{\text{H}}^p} \cdot \omega^p$ – динамическая (частотно-независимая) часть момента сопротивления ПМ, в которой $M_{\omega} = \frac{(1 - m_{\text{СТ}}) k_3 \cdot \cos \varphi_{\text{H}}}{\omega_{\text{H}}^p}$.

Обычно считают, что для большинства ПМ частотно-зависящая составляющая имеет линейную или квадратичную зависимость от ω . Однако в соответствии с [28] степенная аппроксимация с дробным показателем степени является более достоверной для этой зависимости. С учетом данного факта, аппроксимирующее выражение для $M_{\omega} \cdot \omega^p$ имеет вид

$$\omega^p \approx \omega^2 + \alpha \cdot (\omega - \omega^2),$$

где α – коэффициент, определяемый исходя из требуемой степенной зависимости расчетным или графическим путем [27].

Универсальность разработанной математической модели СД или АД обеспечивается за счет автоматизированной или автоматической управляемости $M_{\text{СТ}}$, а также M_{ω} и p посредством коэффициента α .

Используемые СВ СД [28, 30] имеют много общего с СВ СГ, а основные различия заключаются:

- в наличии зоны нечувствительности канала АРВ по отклонению напряжения статора СД;

- АРВ по току возбуждения и АРВ с компаундированием различного типа происходит в основном аналогично подобным СВ СГ.

Поскольку в режимах работы СД есть своя специфика, то для АРВ СД необходимы специальные законы [30]:

- обеспечение постоянства отношений реактивной и активной мощностей СД, называемого АРВ на постоянство заданного коэффициента мощности $\cos \varphi = \text{const}$ (или $\varphi = \text{const}$);

- АРВ, обеспечивающего заданное постоянство реактивной мощности $Q = \text{const}$ СД;

- АРВ по внутреннему углу нагрузки θ и его производным, которое обычно заменяется менее эффективным, но более простым АРВ по активной мощности СД.

Таким образом, рассмотренная ранее универсальная математическая модель СВ СГ может служить основой для построения универсальной математической модели СВ СД после внесения необходимых изменений в соответствии с указанными различиями.

Для реализации зоны нечувствительности канала АРВ по отклонению напряжения статора СД достаточно на выходе сумматора (см. рис. 1), на котором формируется ΔU , включить звено управляемой нелинейности вида зоны нечувствительности и ограничения. Замена в универсальной математической модели СВ СГ переменных соответствующими переменными регулирования названных специальных законов АРВ СД полностью обеспечивает их адекватное воспроизведение, а среди упомянутых переменных Q , φ , P , θ , вычисление активной и реактивной мощностей осуществляется уравнениями, предусмотренными в универсальной математической модели СГ: $P = U_q \cdot K_M \cdot i_q + U_d \cdot K_M \cdot i_d$, $Q = U_q \cdot K_M \cdot i_d - U_d \cdot K_M \cdot i_q$. Для вычисления переменных φ и θ , также необходимых для моделирования указанных законов АРВ СД, применяются уравнения:

$$\varphi = \arctg \frac{Q}{P} \approx \frac{\pi}{2} \frac{\left(\frac{Q}{P}\right)^{1.21}}{1 + \left(\frac{Q}{P}\right)^{1.21}}, \quad \theta = \arctg \frac{U_d}{U_q} \approx \frac{\pi}{2} \frac{\left(\frac{U_d}{U_q}\right)^{1.21}}{1 + \left(\frac{U_d}{U_q}\right)^{1.21}}.$$

1.5. Математическая модель обобщенной нагрузки

При моделировании сложных ЭЭС неизбежно эквивалентруется электрическая нагрузка, в связи с чем необходимо достаточно адекватное её воспроизведение. Согласно опубликованным результатам исследований [9, 28, 31] наиболее адекватная математическая модель эквивалентной нагрузки включает в себя эквивалентные синхронный и асинхронный двигатели, обобщенную нагрузку, описываемую характеристиками зависимостей P_N и реактивной Q_N мощностей этой нагрузки от изменения частоты и величины питающего напряжения U_N , в том числе участка его возможного регулирования.

Согласно [31] процессы изменения P_N и Q_N обобщенной нагрузки во всем диапазоне U_N , в том числе учитывая регулируемый участок $U_H \pm \Delta U_N$, воспроизводятся полиномами, которые описываются уравнениями в относительных единицах:

$$P_N = P_H (1 - K_{1P} - K_{2P} + K_{1P}U_N + K_{2P}U_N^2);$$
$$Q_N = Q_H (1 - K_{1Q} - K_{2Q} + K_{1Q}U_N + K_{2Q}U_N^2),$$

при условии выделения в диапазоне U_N интервалов

$$U_N < (U_H - \Delta U_N) \text{ и } (U_H - \Delta U_N) < U_N < (U_H + \Delta U_N),$$

каждому из которых соответствуют определенные коэффициенты K_{1P} , K_{2P} , K_{1Q} , K_{2Q} полиномов, где

$\pm \Delta U_H$ – интервал регулирования U_N ;

U_H – напряжение в узле нагрузки в нормальном исходном режиме ЭЭС;

P_H – активная мощность обобщенной нагрузки в нормальном исходном режиме ЭЭС;

Q_H – реактивная мощность обобщенной нагрузки в нормальном исходном режиме ЭЭС.

В [28, 31] подробно описаны методики определения коэффициентов: K_{1P} , K_{2P} , K_{1Q} , K_{2Q} для интервалов U_N , которые учитывают свойства и специфику воспроизводимой нагрузки, а также особенности изменения U_N и характер протекающих процессов.

Если учитывать возможность управления симметрией нагрузки, в основном по нулевой последовательности, то наиболее оптимальной системой координат для формирования универсальной математической модели трехфазной обобщенной нагрузки будет уже применявшаяся ранее система α , β , o . Таким образом, учитывая ранее приведенные

аспекты моделирования обобщённой нагрузки, её универсальная математическая модель имеет вид:

$$\frac{2}{3}u_A - \frac{1}{3}u_B - \frac{1}{3}u_C = u_\alpha; \quad \frac{1}{\sqrt{3}}u_B - \frac{1}{\sqrt{3}}u_C = u_\beta; \quad \frac{1}{3}u_A + \frac{1}{3}u_B + \frac{1}{3}u_C = u_0;$$

$$L_H \frac{di_{Q\alpha}}{dt} = u_\alpha, \quad L_H \frac{di_{Q\beta}}{dt} = u_\beta, \quad L_{H0} \frac{di_{Q0}}{dt} = u_0;$$

$$R_H i_{P\alpha} = u_\alpha, \quad R_H \cdot i_{P\beta} = u_\beta, \quad R_{H0} \cdot i_{P0} = u_0;$$

$$i_{QA} = (i_{Q\alpha} + i_{Q0}) \cdot \left[1 + K_{1Q}(u_{N-1}) + K_{2Q}(u_N^2 - 1) \right];$$

$$i_{PA} = (i_{P\alpha} + i_{P0}) \cdot \left[1 + K_{1P}(u_{N-1}) + K_{2P}(u_N^2 - 1) \right];$$

$$i_{QB} = \left(i_{Q0} - \frac{1}{2}i_{Q\alpha} + \frac{\sqrt{3}}{2}i_{Q\beta} \right) \cdot \left[1 + K_{1Q}(u_{N-1}) + K_{2Q}(u_N^2 - 1) \right];$$

$$i_{PB} = \left(i_{P0} - \frac{1}{2}i_{P\alpha} + \frac{\sqrt{3}}{2}i_{P\beta} \right) \cdot \left[1 + K_{1P}(u_{N-1}) + K_{2P}(u_N^2 - 1) \right];$$

$$i_{QC} = \left(i_{Q0} - \frac{1}{2}i_{Q\alpha} + \frac{\sqrt{3}}{2}i_{Q\beta} \right) \cdot \left[1 + K_{1Q}(u_{N-1}) + K_{2Q}(u_N^2 - 1) \right];$$

$$i_{PC} = \left(i_{P0} - \frac{1}{2}i_{P\alpha} + \frac{\sqrt{3}}{2}i_{P\beta} \right) \cdot \left[1 + K_{1P}(u_{N-1}) + K_{2P}(u_N^2 - 1) \right];$$

$$i_A = i_{QA} + i_{PA}, \quad i_B = i_{QB} + i_{PB}, \quad i_C = i_{QC} + i_{PC};$$

$$u_N = \left[|u_A(t)| + |u_B(t)| + |u_C(t)| \right] \cdot \frac{R}{R(1 + T_{B\Phi P})}$$

и дополнительно уравнениями информационного назначения:

$$\frac{1}{3}i_{QA} + \frac{1}{3}i_{QB} + \frac{1}{3}i_{QC} = i_{0Q_N}, \quad \frac{1}{3}i_{PA} + \frac{1}{3}i_{PB} + \frac{1}{3}i_{PC} = i_{0P_N},$$

где L_H – индуктивность для прямой и обратной последовательностей обобщенной реактивной нагрузки узла Q_H в исходном нормальном режиме; R_H – активное сопротивление для прямой и обратной последовательностей обобщенной активной нагрузки узла в исходном режиме; L_{H0} – индуктивность для нулевой последовательности обобщенной реактивной нагрузки узла в исходном нормальном режиме; R_{H0} – активное сопротивление для нулевой последовательности обобщенной активной нагрузки узла P_H в исходном нормальном режиме; $\frac{R}{R(1 + T_{B\Phi P})}$ – пере-

даточная функция фильтра нижних частот трехфазного выпрямителя, а $T_{B\Phi}$ – постоянная времени этого фильтра; $i_{Q\alpha}$, $i_{Q\beta}$, i_{Q0} и $i_{P\alpha}$, $i_{P\beta}$, i_{P0} – мгновенные значения токов несимметричных составляющих соответственно Q_H и P_H ; $i_{Q\xi}$ и $i_{P\xi}$ – мгновенные значения фазных токов ($\xi = A, B, C$) соответственно Q_H и P_H ; i_{0Q_N} и i_{0P_N} – мгновенные значения токов нулевой последовательности, соответственно Q_H и P_H .

1.6. Математическая модель реакторов

При моделировании реакторов их следует разделять на линейные, без магнитопровода, представляющие собой обычную rL -цепь, и на нелинейные, имеющие магнитопровод и поэтому насыщающиеся. Помимо этого, в управляемых реакторах обозначенные параметры являются функционально регулируемы.

Реактор с нелинейной вольт-амперной характеристикой, определяемой $F_\mu = f(\Phi)$, описывается теми же уравнениями, что и трансформатор. В связи с этим, моделирование разнообразных реакторов может осуществляться с помощью универсальной математической модели трансформаторов, при обнулении коэффициентов неиспользуемых обмоток и задания реакторных параметров в уравнения используемых обмоток. Для моделирования сдвоенных реакторов (реакторов с автотрансформаторным отбором) максимально необходимое количество обмоток равно трем. Ориентируясь на это, в универсальной математической модели трансформаторов производятся очевидные сокращения, в результате получаем универсальную математическую модель реакторов, которая наряду с моделированием нелинейных трехфазных реакторов, позволяет, путем исключения нелинейности $F_\mu = f(\Phi)$, воспроизводить процессы, адекватные реактору с линейной вольт-амперной характеристикой. Кроме того, наличие в составе универсальной математической модели реакторов уравнения линейной трехфазной регулируемой $r_p L_p$ -цепи позволяет моделировать: упрощенные ЛЭП для периферийных и эквивалентных районов ЭЭС, а также упрощенные регулируемые rL -нагрузки, которые являются весьма распространенными и достаточно широко используемыми.

2. РАБОТА С ВСЕРЕЖИМНЫМ МОДЕЛИРУЮЩИМ КОМПЛЕКСОМ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

2.1. Общая характеристика моделирующего комплекса

Для учебных целей создана так называемая «маломашинная» версия ВМК РВ ЭЭС, в которой реализована следующая схема, представленная на рис. 2.1.

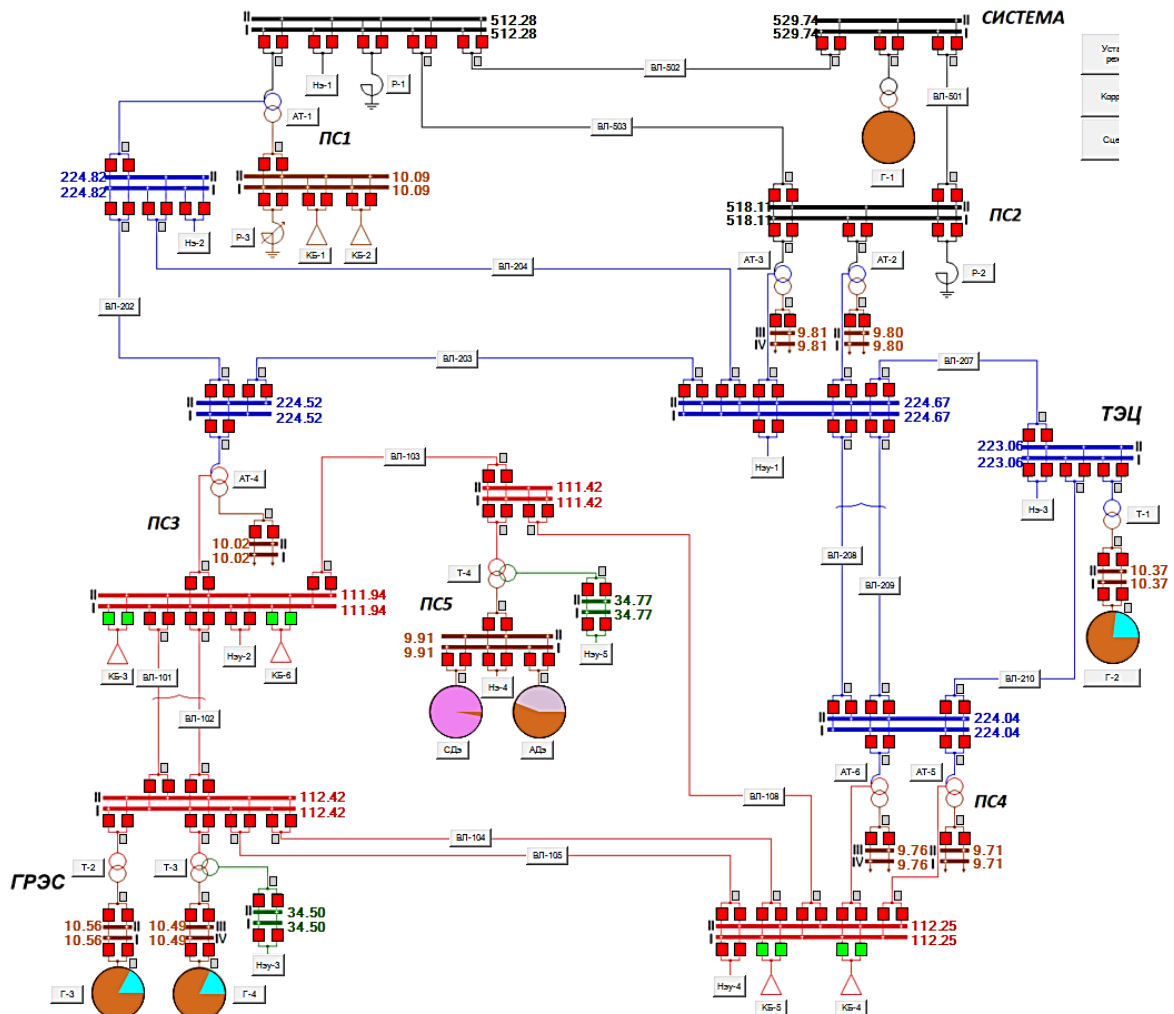


Рис. 2.1. Схема моделирования ЭЭС

Каждая фаза элементов схемы моделирования: генераторов, трансформаторов и автотрансформаторов, линий электропередачи, синхронных и асинхронных электродвигателей, реакторов, обобщенных эквивалентных нагрузок, содержит два линейных выключателя, позволяющих формировать нужную топологическую схему подстанций. Кроме того,

каждый объект содержит короткозамыкатель, который позволяет сформировать любой вид короткого замыкания (КЗ).

Все виды элементов:

- генераторы и их системы возбуждения с различными автоматическими регуляторами возбуждения (АРВ), а также первичные двигатели, которые могут содержать гидравлические или паровые турбины с системами регулирования, котлоагрегаты с системами регулирования и др. оборудование;
- синхронные двигатели с их системами возбуждения и АРВ и различными приводимыми механизмами;
- асинхронные двигатели с разнообразными приводимыми механизмами;
- различные трансформаторы и автотрансформаторы с РПН;
- линии электропередачи;
- шунтирующие реакторы, в том числе управляемые;
- обобщенные эквивалентные нагрузки моделируются полными всережимными математическими моделями, универсальными для каждого из этих видов.

Электрические машины моделируются в системе координат d, q с преобразованием $d, q \rightarrow A, B, C$ и $A, B, C \rightarrow d, q$.

Все остальные элементы моделируются непосредственно в трехфазной системе координат A, B, C .

Исчерпывающая информация о математических моделях для всех видов перечисленных элементов приведена в главе 1, в диссертации А.С. Гусева [32], а также в публикациях [33–42].

Решение систем уравнений математических моделей всех моделируемых элементов осуществляется в реальном времени, на неограниченном интервале, методически точно и с определенной инструментальной погрешностью с использованием непрерывного и неявного параллельного интегрирования дифференциальных уравнений. Входные-выходные переменные фаз A, B, C математических моделей всех элементов преобразуются в соответствующие им модельные физические токи и напряжения. Трехфазные модельные физические входы-выходы математических моделей всех моделируемых элементов оснащены трехфазными цифруправляемыми интегральными микронэлектронными продольно-поперечными коммутаторами.

Все вышеуказанные решения и преобразования реализуются с помощью специализированных гибридных процессоров (СГП) (рис. 2.2), каждый из которых содержит соответствующий математической модели цифро-аналоговый процессор, функционирующий совместно с системой микроконтроллеров, работающих под управлением центрального

микроспроцессора, связанного локальной компьютерной сетью (ЛКС) через многоканальный коммутатор с сервером ВМК РВ ЭЭС (VmkServer) (рис. 2.3). Все СГП устанавливаются в крейтах ВМК РВ ЭЭС.

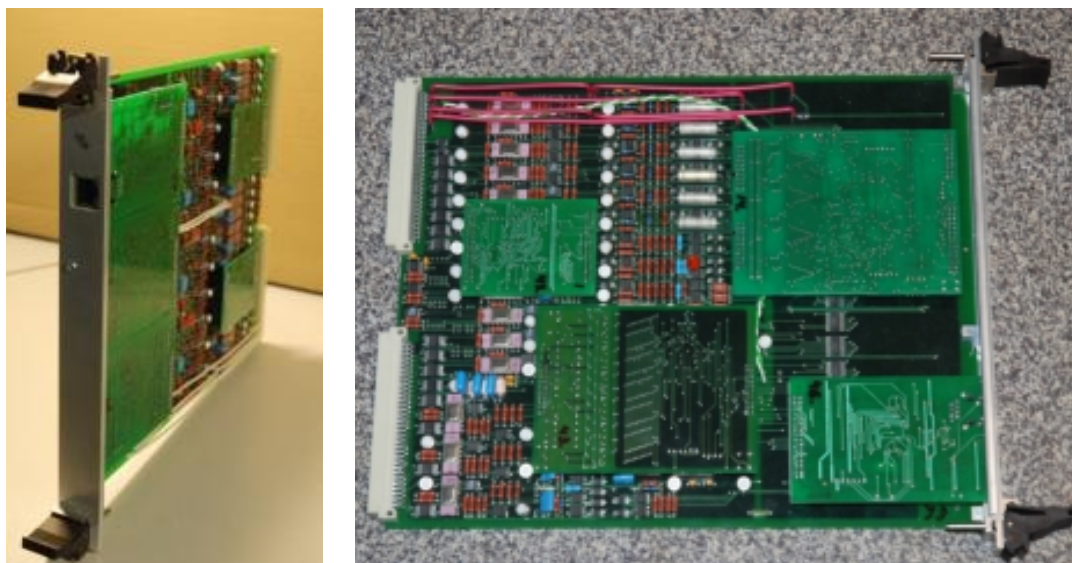


Рис. 2.2. Внешний вид одного из СГП

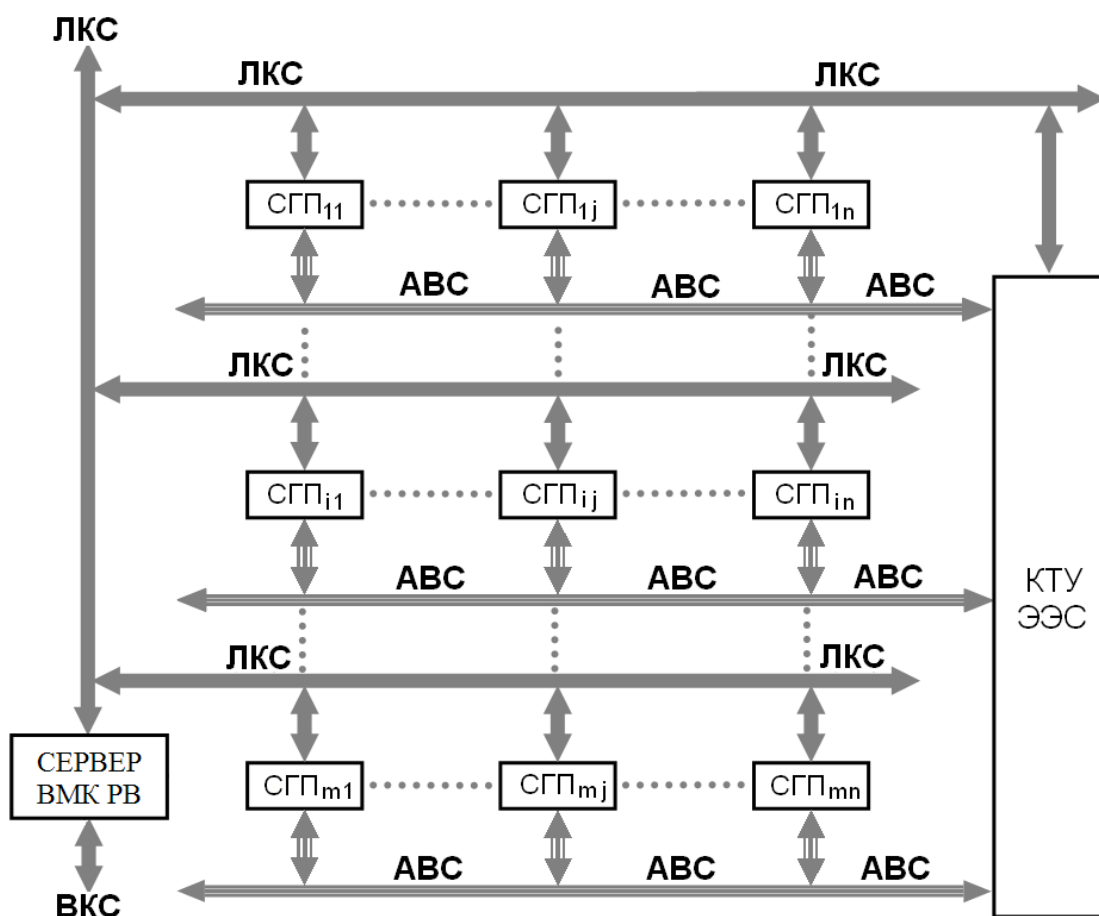


Рис. 2.3. Структурная схема ВМК РВ ЭЭС

Топология, согласно схеме всережимного моделирования ЭЭС, реализуется с помощью печатных кросс-плат коммутатора трехфазных узлов (КТУ), в которые на разъемах устанавливаются модули СГП, и с помощью их трехфазных продольно-поперечных цифруправляемых коммутаторов.

Автоматизированное и автоматическое цифровое управление параметрами математических моделей, продольно-поперечными коммутаторами и моделированием в целом, а также разнообразным цифровым представлением и отображением процессов моделирования и его результатов осуществляется с помощью специализированного программного обеспечения (СПО) сервера и соответственно клиентов (VmkClient). Клиент соединяется с сервером ВМК РВ ЭЭС через внешнюю компьютерную сеть (ВКС).

Для управления моделированием и его отображения, а также визуализации процессов моделирования и его результатов в СПО предусмотрены разнообразные программные приборы цифрового, графического, диаграммного, осциллографического типов и различные формы в виде динамических панелей управления и наблюдения, содержащих нужные схемы, программные приборы и командные кнопки.

2.2. Подключение моделирующего комплекса

Более детальная информация о «ВМК РВ ЭЭС»: описание всех его функциональных возможностей, их настроек и др., приведена в инструкции по эксплуатации «ВМК РВ ЭЭС». В данном пособии представлены лишь необходимые для выполнения лабораторных работ данные.

2.2.1. Настройка и запуск серверного СПО

Для того чтобы пользователь имел возможность подключения к ВМК РВ ЭЭС, следует перенести папку с проектом (как правило папка Vmk) на персональный компьютер (ПК). В данной папке находятся файлы VmkServer2.exe и VmkClient.exe, которые запускают соответственно сервер ВМК РВ ЭЭС и клиентское рабочее место. Сервер запускается лишь один раз для конкретной модели, при этом компьютер, на котором он запускается – серверный ПК, должен быть подключен через локальную сеть к ВМК РВ ЭЭС. Серверное СПО VmkServer2.exe запускается преподавателем. Перед запуском требуется открыть файл Vmk.config в папке проекта, который содержит следующую информацию:

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8" ?>
<data version="15-03-2012 13:14 ">
  <vmk-server>
```

```

<server-address>109.123.158.100</server-address>
<server-port>43912</server-port>
<config>Projects\Учебный ВМК 1\Учебный ВМК 1.gmkconfig</config>
<init-delay>2000</init-delay>
<filter-order>4</filter-order>
<check-hardware-errors>yes</check-hardware-errors>
<static-priority>2</static-priority>
<dynamic-priority>2000</dynamic-priority>
<static-update-interval>500</static-update-interval>
<rza-update-interval>20</rza-update-interval>
<rza-module>e-server-rza.dll</rza-module>
</vmk-server>
</data>

```

Важными здесь являются строки **<server-address>** и **<config>**. В строке **<server-address>** прописывается IP-адрес серверного ПК (рекомендуется предварительно выяснить IP-адрес данного ПК). Если адрес был прописан неверно, то появится соответствующее сообщение при попытке включения VmkServer2.exe и при попытке запуска VmkClient.exe.

В строке **<config>** прописывается путь, начиная с Projects (папка Projects содержится в папке проекта) и заканчивая названием файла конфигурации с расширением gmkconfig (в данном случае файл конфигурации проекта имеет имя Учебный ВМК 1.gmkconfig). Указать данное имя и путь очень важно, так как иначе подключение к серверу ВМК РВ ЭЭС будет невозможным.

Если все настройки сделаны правильно, то при запуске VmkServer2.exe появится следующее окно.

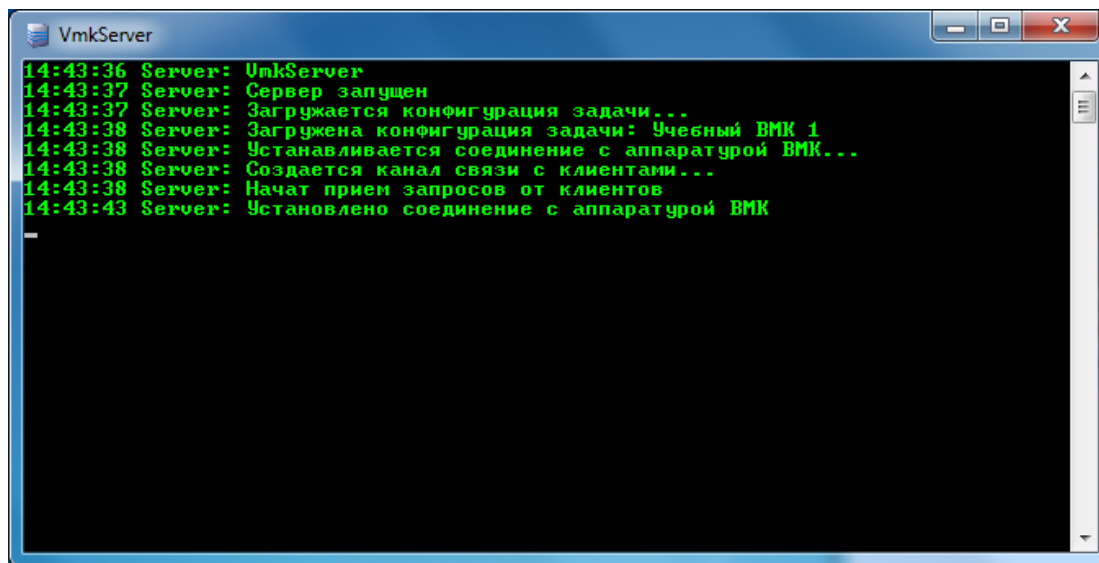


Рис. 2.4. Окно СПО сервера ВМК РВ ЭЭС

Строка Установлено соединение с аппаратурой ВМК говорит о том, что включение сервера ВМК РВ ЭЭС успешное и можно запускать клиентские СПО – VmkClient.exe. При этом внешне готовность ВМК РВ ЭЭС к работе можно определить по следующим признакам:

- на лицевых панелях всех блоков питания (расположены под крейтами с СГП) – светятся зеленые светодиоды,
- лицевых панелях всех модулей СГП – светятся зеленые светодиоды, индицирующие соединение модулей с ЛКС ВМК РВ ЭЭС;
- лицевых панелях всех модулей СГП, кроме постоянно светящихся зеленых светодиодов непрерывно светятся мигающим светом оранжевые светодиоды, индицирующие наличие обмена данными по ЛКС сервера «ВМК РВ ЭЭС» с центральными микропроцессорами модулей СГП; если по каким-либо причинам это взаимодействие с каким-нибудь из центральных микропроцессоров нарушается, то сервер «ВМК РВ ЭЭС» выдает сообщение о прекращении работы с указанием номера модуля, в котором находится данный микропроцессор.

2.2.2. Настройка и запуск клиентского СПО

Перед запуском VmkClient.exe требуется произвести настройку конфигурации в файле Vmk.config. Содержащийся в строке **<server-address>** IP-адрес должен совпадать с IP-адресом в аналогичной строке на серверном ПК. Имя конфигурации в строке **<config>** также должно быть аналогично тому, что прописано в Vmk.config на серверном ПК.

После установки/проверки обозначенных настроек каждый студент на своем ПК запускает VmkClient.exe для работы с ВМК РВ ЭЭС. При этом появляется окно идентификации.

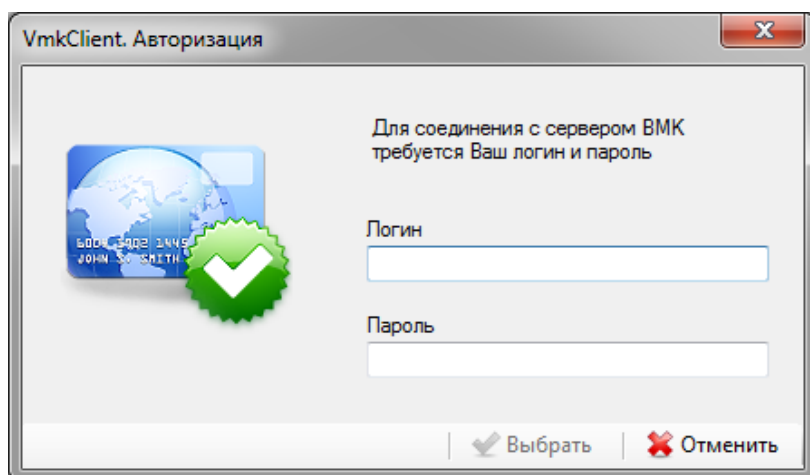


Рис. 2.5. Окно ввода персонального идентификатора СПО клиента ВМК РВ ЭЭС

В качестве логина вводится фамилия студента. В строку пароля вводятся любые символы (не менее трех). После этого требуется нажать кнопку **Выбрать** и перейти к программному окну.

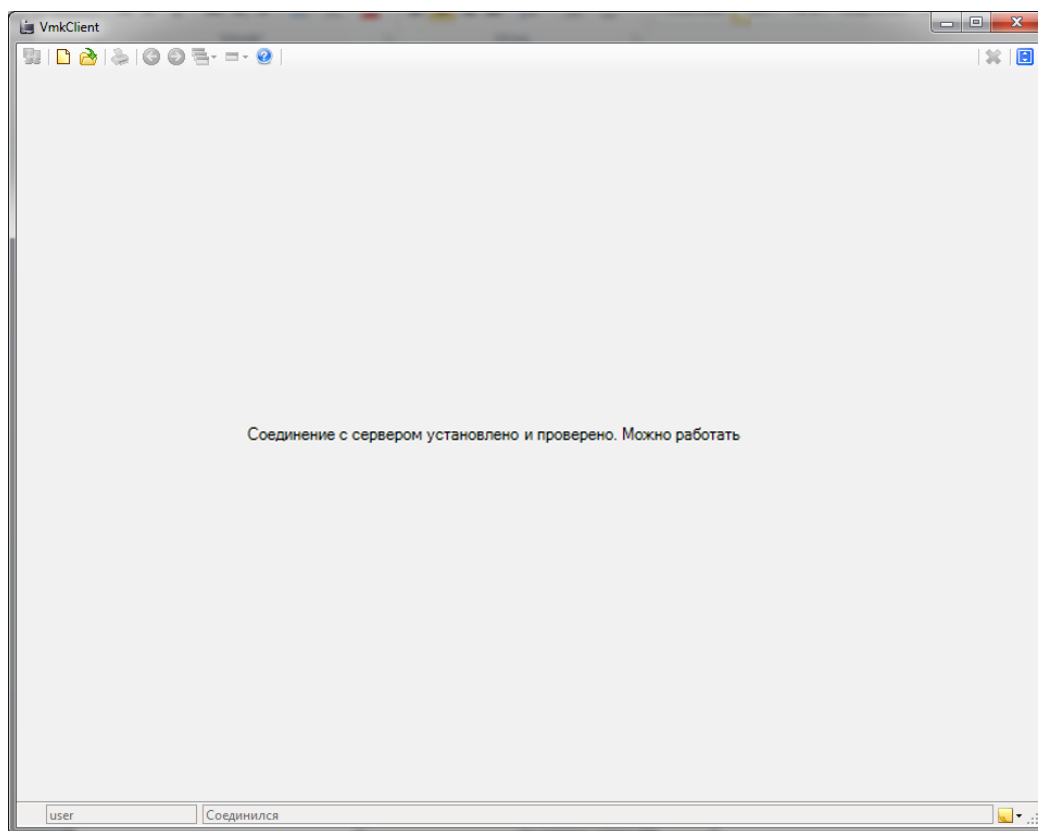












Рис. 2.6. Окно СПО клиента ВМК РВ ЭЭС

Если в данном окне появляется надпись «Соединение с сервером установлено и проверено. Можно работать», то все настройки сделаны правильно и можно работать с ВМК РВ ЭЭС.

2.3. Пользовательский интерфейс моделирующего комплекса


На верхней панели клиентского СПО VmkClient расположены следующие кнопки – команды меню:

-  – возобновление связи с сервером после возможного ее разрыва;
-  – создание нового документа-сценария. При создании требуется указать имя файла, название и комментарий к документу;
-  – открытие документа;
-  – формирование графического файла, содержащего графический образ существующих документов (аналогично функции PrintScreen). Этот файл может быть использован в отчетах о результатах моделирования и распечатан на принтере;

-  – переход назад к ранее открытому документу;
-  – переход вперед к ранее открытому документу;
-  – меню-список всех открытых документов с возможностью прямого выбора документа;
-  – меню-список, позволяющее перейти к документу активного сценария;
-  – закрытие текущего документа;
-  – раскрытие окна программы на полный экран.


Программа VmkClient.exe позволяет работать со следующими видами документов:

- формы – отображают схемно-режимное состояние элементов или ЭЭС в целом и содержат программные приборы для интерактивного управления параметрами моделируемых элементов, состоянием выключателей и короткозамыкателей, в том числе пофазным, а также для разнообразной индикации значений и состояний параметров и переменных;
- осциллографы – отображают изменение различных, выбранных пользователем переменных в виде осциллограмм и позволяют анализировать эти осциллограммы;
- сценарии режима (сценарии квазиустановившихся режимов) – устанавливают заданные пользователем значения параметров и состояния моделируемых элементов, а также нужный порядок их задания и установки;
- сценарии динамики (сценарии различных переходных режимов) – устанавливают задаваемые пользователем порядок и условия разнообразных действий, включая алгоритмы работы релейной защиты, технологической и противоаварийной автоматики, а также список осциллографируемых переменных моделируемых процессов.

Открытие этих документов осуществляется через пункт меню Открыть документ  (рис. 2.7).

Главными являются две формы: в именованных (main_Учебный ВМК1.gmkform) и в относительных единицах (main_Учебный ВМК_oe.gmkform).

Цифровые приборы, расположенные рядом с шинами того же цвета индицируют текущие значения напряжения данных шин. Угловые приборы электрических машин показывают текущие значения взаимных углов данных машин относительно ведущих машин. Кнопки перехода – позволяют переходить к формам всех моделируемых элементов.

Например, нажатие на кнопку  приведет к открытию формы эквивалентного генератора Г-3 на ГРЭС.

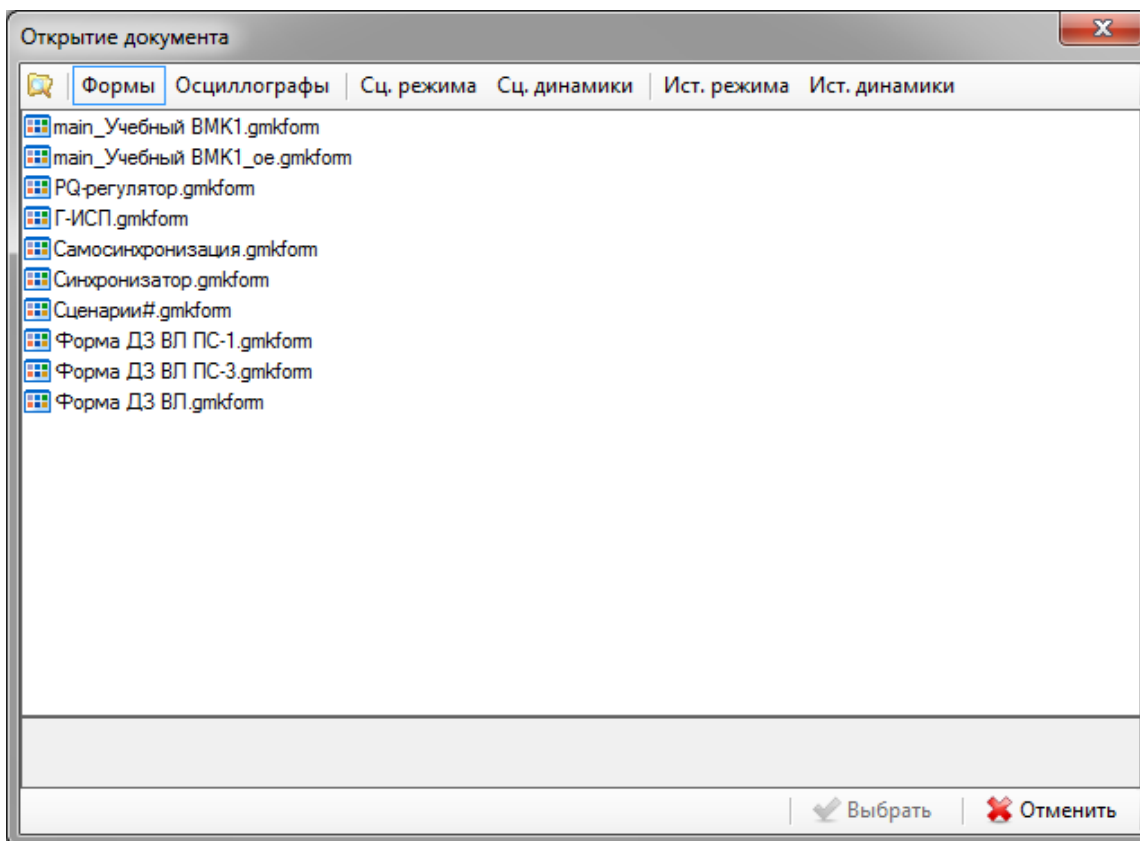


Рис. 2.7. Открытие документов в СПО клиента ВМК РВ ЭЭС


2.3.1. Формы «ВМК РВ ЭЭС»

В данном разделе приведена информация по всем формам «ВМК РВ ЭЭС», однако настройки описаны не все, а лишь те, что могут понадобиться при работе с комплексом. Подробности можно выяснить, прочитав инструкцию по эксплуатации «ВМК РВ ЭЭС».

1. Синхронный генератор

Приборы (рис. 2.8):

- Гэ ГРЭС-2 – имя элемента.
- Эквивалентный генератор – тип элемента или дополнительная информация.
- Ведущий: Имя элемента – выбор ведущей синхронной машины.
- Таблица:
 - Fшбм [oe] – принудительная установка частоты генератора. Если генератор не находится в режиме шин бесконечной мощности (ШБМ), то частота генератора в дальнейшем будет зависеть от баланса моментов M_e и M_t ;
 - ШБМ – выбор режима генератора: 1 – режим ШБМ, 0 – реальная машина;

-  – графическое представление текущего значения взаимного угла δ (для углового прибора генератора задан голубой цвет сектора).
- δ [°] – численное представление значения взаимного угла δ , фон прибора повторяет цвет сектора углового прибора генератора – бирюзовый.

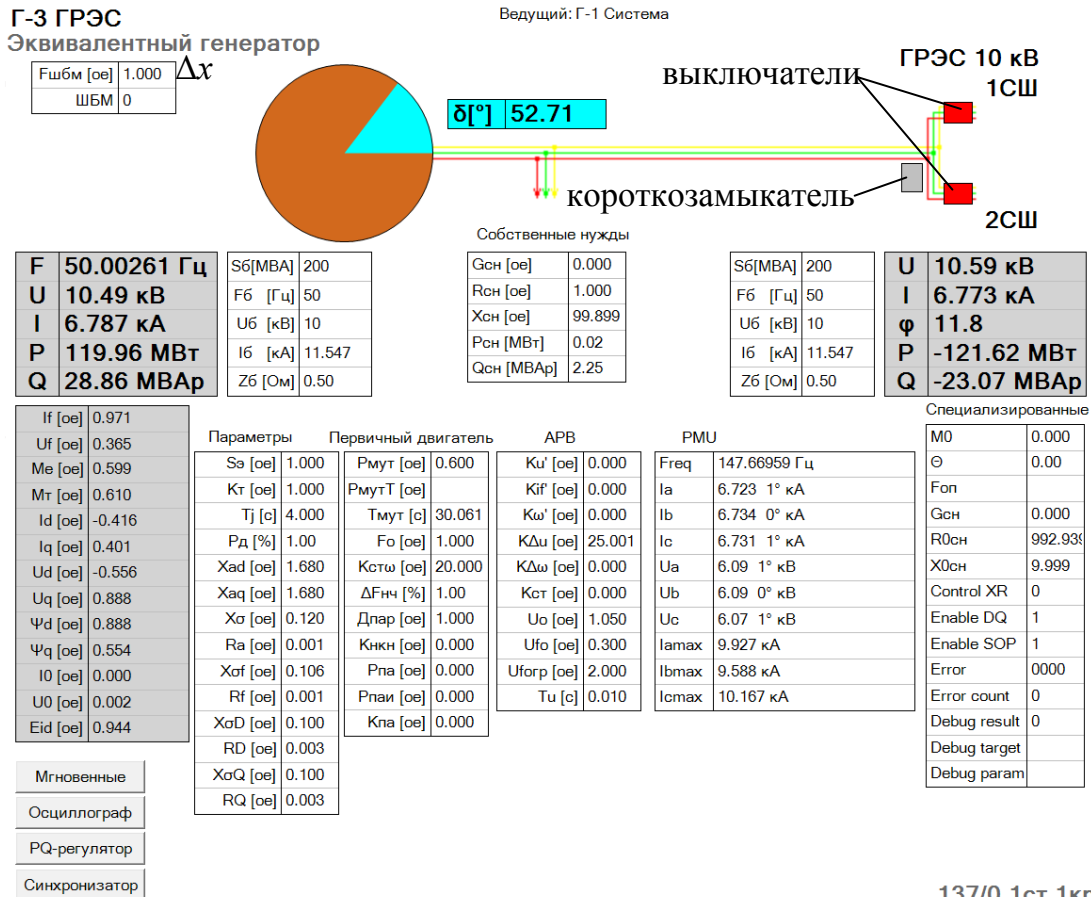


Рис. 2.8. Форма синхронного генератора

- ГРЭС-2 10 кВ – узел примыкания.
- СШ – название шины.
- Таблица текущих выходных значений генератора:
 - F [Гц] – частота;
 - U [кВ] – напряжение генератора;
 - I [кА] – полный ток генератора;
 - P [МВт] – активная мощность на выводах генератора;
 - Q [МВАр] – реактивная мощность на выводах генератора.
- Таблица текущих значений в узле примыкания:
 - U [кВ] – напряжение в узле примыкания;
 - I [кА] – полный ток в узле примыкания;
 - P [МВт] – активная мощность в узле примыкания;

- Q [МВАр] – реактивная мощность в узле замыкания;
- Таблица базиса:
 - S_b [МВА] – базисная мощность;
 - F_b [Гц] – базисная частота;
 - U_b [кВ] – базисное напряжение;
 - I_b [кА] – базисный ток;
 - Z_b [Ом] – базисный импеданс.
- Таблица «Собственные нужды»:
 - $R_{сн}$ [о. е.] – сопротивление собственных нужд, последовательно с $X_{сн}$;
 - $X_{сн}$ [о. е.] – индуктивное сопротивление собственных нужд.
- Таблица текущих значений в генераторе, системе возбуждения, первичном двигателе:
 - I_f [о. е.] – ток возбуждения;
 - U_f [о. е.] – напряжение возбуждения;
 - M_e [о. е.] – момент электромагнитный;
 - M_t [о. е.] – момент турбины;
 - I_d [о. е.] – ток по оси d ;
 - I_q [о. е.] – ток по оси q ;
 - U_d [о. е.] – напряжение по оси d ;
 - U_q [о. е.] – напряжение по оси q ;
 - Ψ_d [о. е.] – потокосцепление по оси d ;
 - Ψ_q [о. е.] – потокосцепление по оси q ;
 - I_0 [о. е.] – ток нулевой последовательности;
 - U_0 [о. е.] – напряжение нулевой последовательности;
 - E_{id} [о. е.] – внутренняя ЭДС;
- Таблица Параметры:
 - $S_{э}$ [о. е.] – эквивалентная мощность электрической машины;
 - K_t [о. е.] – коэффициент трансформации;
 - T_j [с] – постоянная инерции ротора;
 - P_d [%] – потери на трение;
 - X_{ad} [о. е.] – взаимная индуктивность по оси d ;
 - X_{aq} [о. е.] – взаимная индуктивность по оси q ;
 - X_{σ} [о. е.] – индуктивность рассеяния обмотки статора;
 - R_a [о. е.] – активное сопротивление обмотки статора;
 - $X_{\sigma f}$ [о. е.] – индуктивность рассеяния обмотки возбуждения;
 - R_f [о. е.] – активное сопротивление обмотки возбуждения;
 - $X_{\sigma D}$ [о. е.] – индуктивность рассеяния демпферного контура по оси d ;
 - R_D [о. е.] – активное сопротивление демпферного контура по оси d ;

- $X\sigma Q$ [о. е.] – индуктивность рассеяния демпферного контура по оси q ;

- RQ [о. е.] – активное сопротивление демпферного контура по оси q .

- Таблица Первичный двигатель:

- $P_{\text{мут}}$ [о. е.] – задание мощности турбины с $T_{\text{мут}} = 0$;

- $P_{\text{мут}T}$ [о. е.] – задание мощности турбины с $T_{\text{мут}}$;

- $T_{\text{мут}}$ [с] – постоянная времени механизма управления турбины;

- $F0$ [о. е.] – уставка регулятора скорости турбины;

- $K_{\text{ст}\omega}$ [о. е.] – статизм регулятора скорости турбины;

- $\Delta F_{\text{нч}}$ [%] – зона нечувствительности по $\Delta\omega$;

- $D_{\text{пар}}$ [о. е.] – давление пара перед турбиной от котлоагрегата;

- $K_{\text{нкн}}$ [о. е.] – коэффициент коррекции неравномерности;

- $K_{\text{ст}\omega}$ [о. е.] – статизм регулятора скорости турбины;

- $R_{\text{па}}$ [о. е.] – задание послеаварийной разгрузки;

- $R_{\text{паи}}$ [о. е.] – задание противоаварийной импульсной разгрузки;

- $K_{\text{па}}$ [о. е.] – усиление по каналу противоаварийной разгрузки.

- Таблица APB:

- KU' [о. е.] – усиление по каналу U' ;

- KI_f' [о. е.] – усиление по каналу I_f' ;

- $K\omega'$ [о. е.] – усиление по каналу ω' ;

- $K\Delta u$ [о. е.] – усиление по каналу отклонения U ;

- $K\Delta\omega$ [о. е.] – усиление по каналу $\Delta\omega$;

- $K_{\text{ст}}$ [о. е.] – статизм по реактивной мощности;

- U_0 [о. е.] – уставка U ;

- $U_{\text{ф}0}$ [о. е.] – ручное управление U ;

- $U_{\text{фогр}}$ [о. е.] – ограничение U_f ;

- T_u [с] – постоянная времени измерителя напряжения.

- Таблица PMU:

- F_{req} [Гц] – частота статора;

- I_a [кА] – модуль и фаза вектора тока фазы A ;

- I_b [кА] – модуль и фаза вектора тока фазы B ;

- I_c [кА] – модуль и фаза вектора тока фазы C ;

- U_a [кА] – модуль и фаза вектора напряжения фазы A ;

- U_b [кА] – модуль и фаза вектора напряжения фазы B ;

- U_c [кА] – модуль и фаза вектора напряжения фазы C ;

- $I_{a\text{max}}$ [кА] – максимальное значение (за период) тока фазы A ;

- $I_{b\text{max}}$ [кА] – максимальное значение (за период) тока фазы B ;

- $I_{c\text{max}}$ [кА] – максимальное значение (за период) тока фазы C .

- Кнопка Мгновенные – автоматически выполняет сценарий и выводит осциллограммы мгновенных значений выбранных переменных.

- Кнопка Осциллограф – автоматический переход к осциллографу выбранных медленно изменяющихся значений переменных.

Выключатели и короткозамыкатели присутствуют на формах каждого из элементов ЭЭС.

2. Синхронный двигатель

Форма синхронного двигателя содержит приборы подобного типа, что и форма генератора, с отличиями:

- в форме синхронного двигателя нет таблицы с заданием ШБМ – режима бесконечной мощности и принудительного задания частоты;
- цвет сектора углового прибора, показывающего взаимный угол и фон прибора $\delta [^\circ]$ задан фиолетовый;
- вместо таблицы Первичный двигатель в форме синхронного двигателя определена таблица Нагрузка:
 - α [о. е.] – независимый от частоты момент нагрузки;
 - β [о. е.] – зависимый от частоты момент нагрузки;
 - n – степень зависимости момента нагрузки от частоты.

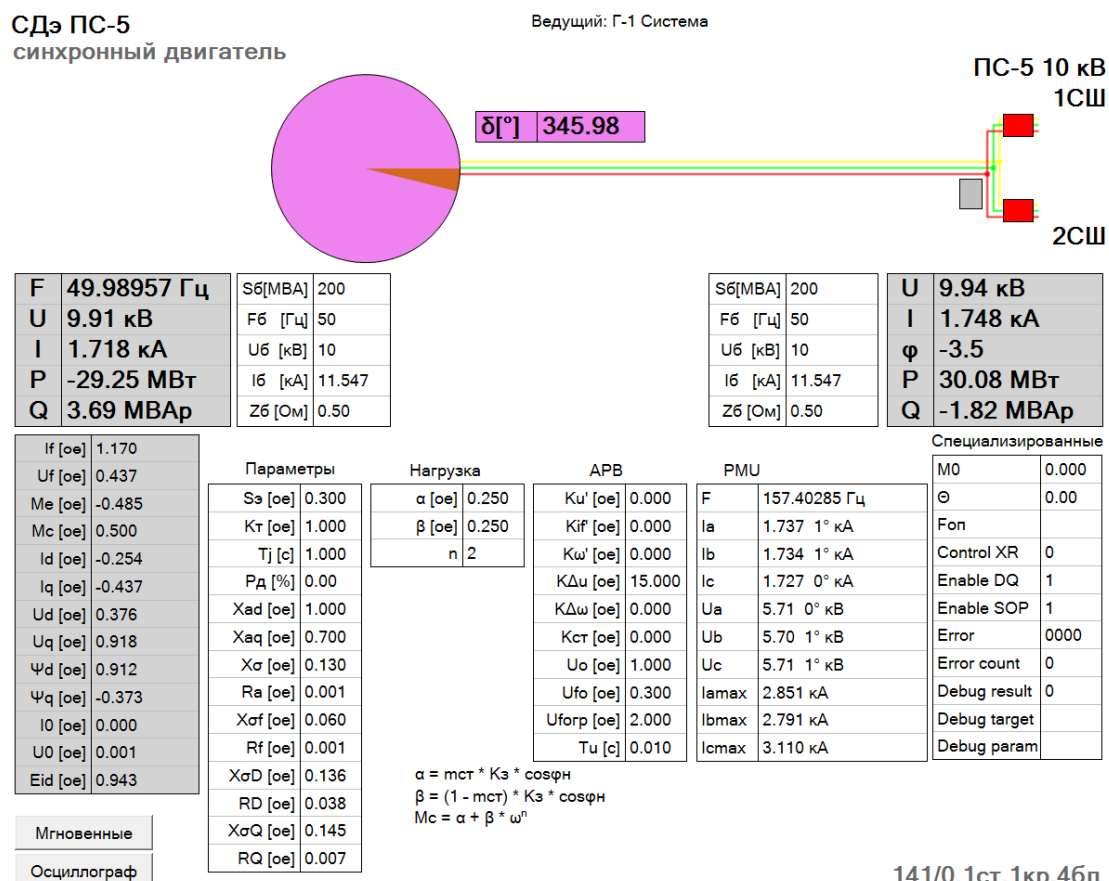


Рис. 2.9. Форма синхронного двигателя

3. Асинхронный двигатель

В форме асинхронного двигателя, в отличие от формы синхронного двигателя в таблицах нет приборов, отвечающих за задание параметров и индикации переменных режимов возбуждения.

Вместо прибора $\delta[^\circ]$ (численное значение взаимного угла) задан прибор $s[\%]$ – индикация текущего скольжения. Цвет фона прибора $s[\%]$ так же, как и цвет сектора углового прибора для асинхронных двигателей задан светло-фиолетовый.

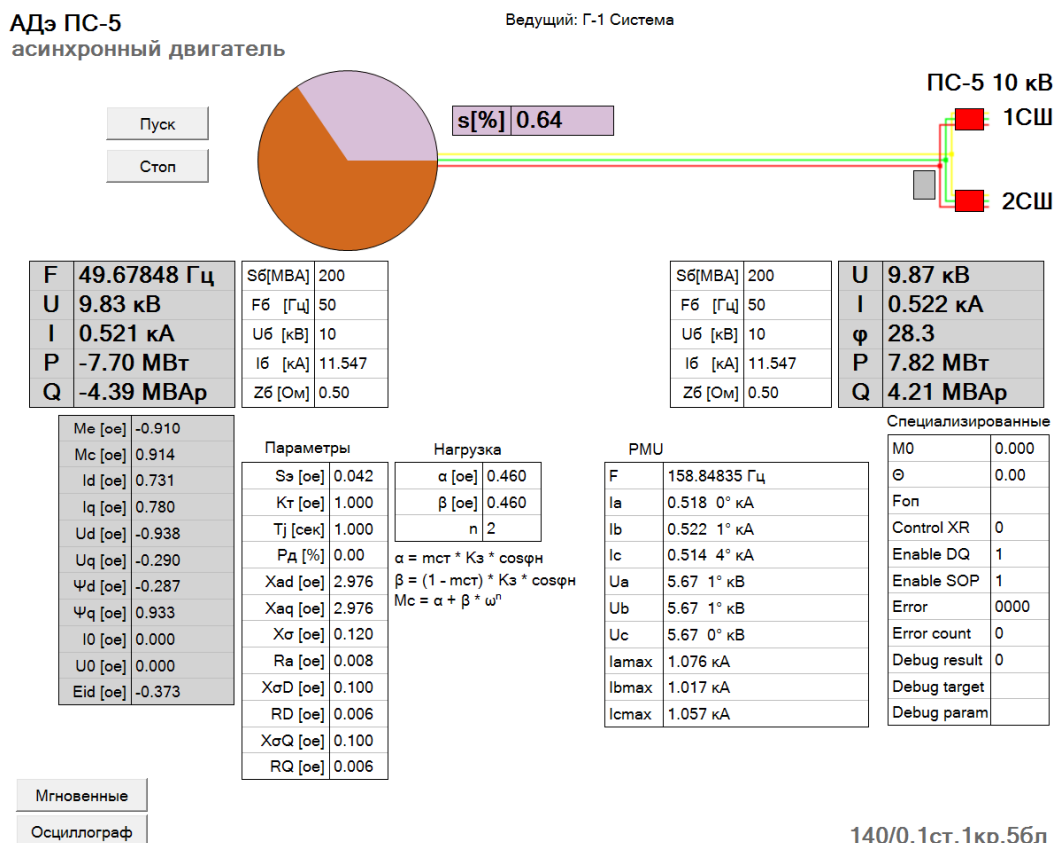


Рис. 2.10. Форма асинхронного двигателя

4. Трансформатор (автотрансформатор)

Отличительные приборы формы трансформатора (автотрансформатора):

- Таблица Параметры (рис. 2.11):
- $Rв [о. е.]$ – задание и отображение активного сопротивления обмотки ВН;
- $Xв [о. е.]$ – задание и отображение индуктивности обмотки ВН;
- $Rс [о. е.]$ – задание и отображение сопротивления обмотки СН;
- $Xс [о. е.]$ – задание и отображение индуктивности обмотки СН;

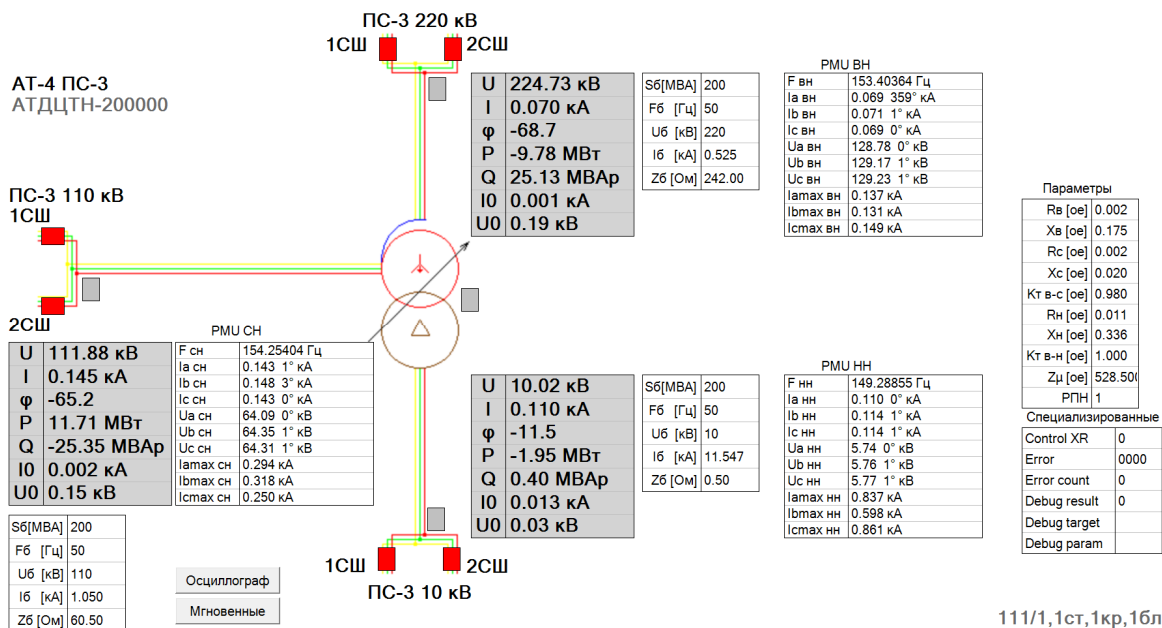


Рис. 2.11. Форма силового трансформатора (автотрансформатора)

- $K_{т\ в-с}$ [о. е.] – задание и отображение коэффициента трансформации ВН-СН;
- R_n [о. е.] – задание и отображение активного сопротивления обмотки НН;
- X_n [о. е.] – задание и отображение индуктивности обмотки НН;
- $K_{т\ в-н}$ [о. е.] – задание и отображение коэффициента трансформации ВН-НН;
- Z_μ [о. е.] – сопротивление цепи намагничивания;
- РПН – номер отпайки РПН (количество отпаек и процент изменения напряжения задаются в конфигурации (Учебный ВМК1.gmkconfig) проекта).

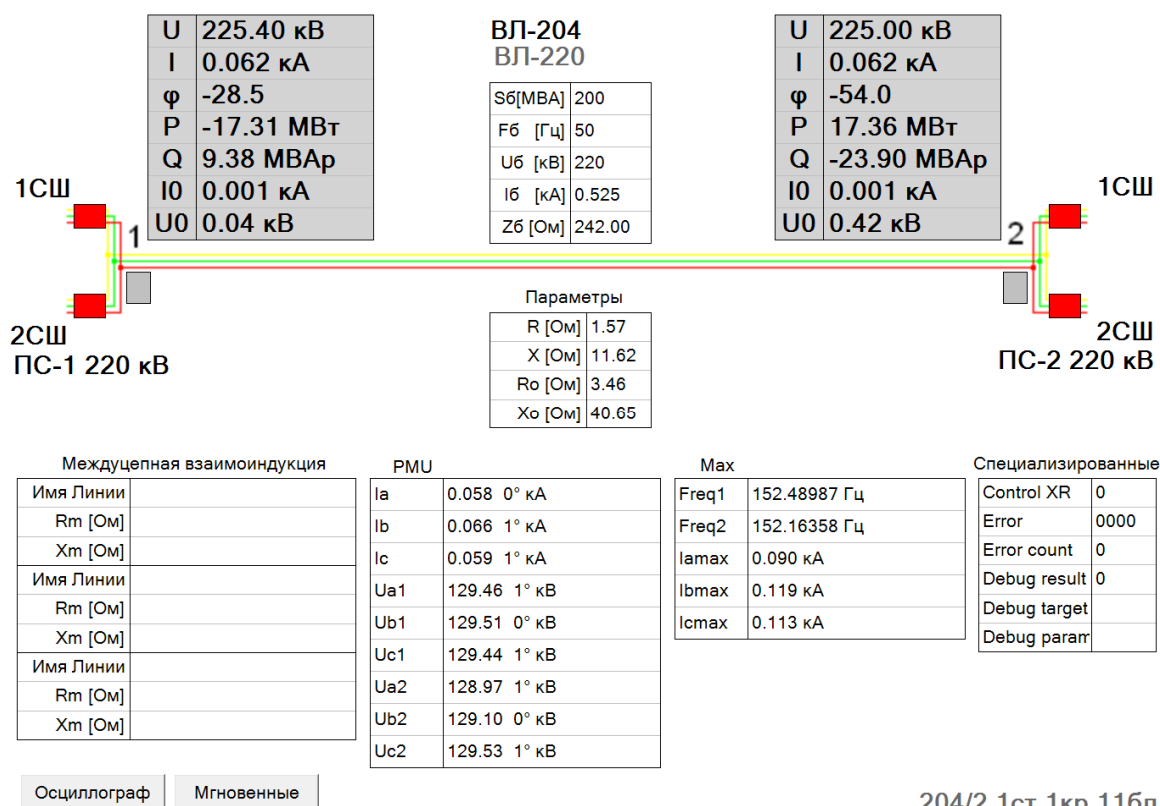
5. Линия электропередачи

В формах линий электропередачи используется фон продольной трехфазной связи. Тип линии электропередачи отражает класс напряжения данной ЛЭП.

Отличительные приборы формы линий электропередачи:

- Таблица Параметры:
 - R [о. е.] – синхронное задание и отображение активного сопротивления фаз;
 - R_a [о. е.] – индивидуальное задание и отображение активного сопротивления фазы A ;
 - R_b [о. е.] – индивидуальное задание и отображение активного сопротивления фазы B ;

- R_c [о. е.] – индивидуальное задание и отображение активного сопротивления фазы C ;
- X [о. е.] – синхронное задание и отображение индуктивности фаз;
- X_a [о. е.] – индивидуальное задание и отображение индуктивности фазы A ;
- X_b [о. е.] – индивидуальное задание и отображение индуктивности фазы B ;
- X_c [о. е.] – индивидуальное задание и отображение индуктивности фазы C ;
- R_0 [о. е.] – задание и отображение сопротивления нулевой последовательности;
- X_0 [о. е.] – задание и отображение индуктивности нулевой последовательности.
- Таблица Междупежная взаимоиндукция:
 - Имя линии – выбор взаимоиндуктирующей линии в данном модуле СГП;
 - R_m [о. е.] – задание и отображение активного сопротивления взаимоиндукции;
 - X_m [о. е.] – задание и отображение индуктивности взаимоиндукции.



204/2,1ст,1кр,116л

Рис. 2.12. Форма линии электропередачи

6. Реактор и эквивалентная нагрузка

Нэу-2 ПС-3

управляемая нагрузка

Sб [MBA]	200
Fб [Гц]	50
Uб [кВ]	110
Iб [кА]	1.050
Zб [Ом]	60.50

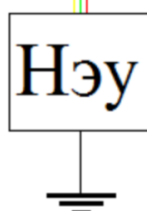
U	112.19 кВ
I	0.318 кА
φ	68.4
P	22.71 МВт
Q	57.36 МВАр
I0	0.001 кА
U0	0.14 кВ

Параметры

R [Ом]	60.50
Ra [Ом]	60.50
Rb [Ом]	60.50
Rc [Ом]	60.50
X [Ом]	200.00
Xa [Ом]	200.00
Xb [Ом]	200.00
Xc [Ом]	200.00
G [См]	0.0003
Ga [См]	0.0003
Gb [См]	0.0003
Gc [См]	0.0003

Осциллограф

Мгновенные



PMU	
Ia	0.318 1° кА
Ib	0.316 0° кА
Ic	0.314 1° кА
Ua	64.33 1° кВ
Ub	64.52 1° кВ
Uc	64.52 0° кВ

Специализированные	
Control XR	0
Error	0000

137/2,1ст,1кр,86л

Нэ-2 ПС-1

статическая нагрузка

Sб [MBA]	200
Fб [Гц]	50
Uб [кВ]	220
Iб [кА]	0.525
Zб [Ом]	242.00

I	0.157 кА
I0	0.000 кА
U	224.78 кВ
P	33.96 МВт
Q	50.60 МВАр

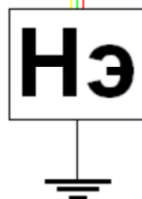
PMU	
Ia	0.157 1° кА
Ib	0.156 0° кА
Ic	0.156 1° кА

Параметры

R [Ом]	242.00
Ra [Ом]	242.00
Rb [Ом]	242.00
Rc [Ом]	242.00
X [Ом]	935.98
Xa [Ом]	935.98
Xb [Ом]	935.98
Xc [Ом]	935.98
G [См]	0.0004
Ga [См]	0.0004
Gb [См]	0.0004
Gc [См]	0.0004

Осциллограф

Мгновенные



Специализированные	
Error	0000

142/3,1ст,1кр,126л

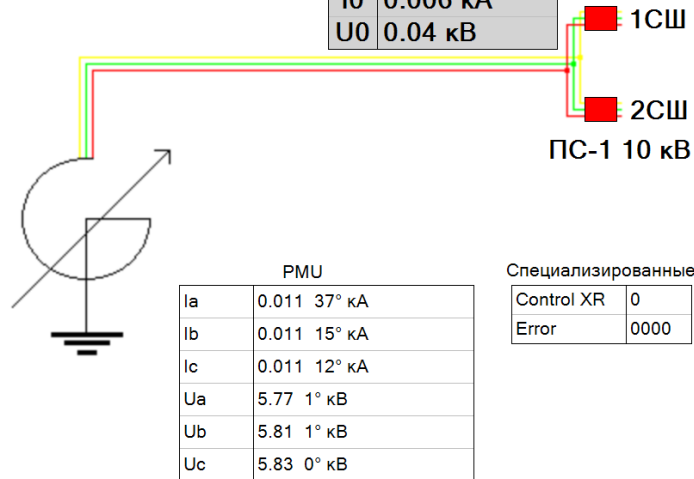
Рис. 2.13. Формы эквивалентной нагрузки

P-3 ПС-1
УШР

S6[MBA]	200
F6 [Гц]	50
U6 [кВ]	10
I6 [кА]	11.547
Z6 [Ом]	0.50

Параметры	
R [Ом]	0.50
Ra [Ом]	0.50
Rb [Ом]	0.50
Rc [Ом]	0.50
X [Ом]	496.47
Xa [Ом]	496.47
Xb [Ом]	496.47
Xc [Ом]	496.47
G [См]	0.0000
Ga [См]	0.0000
Gb [См]	0.0000
Gc [См]	0.0000

U	10.11 кВ
I	0.000 кА
φ	78.3
P	0.02 МВт
Q	0.09 МВАр
IO	0.006 кА
U0	0.04 кВ



Осциллограф Мгновенные

145/2,1ст,1кр,2бл

Рис. 2.14. Форма реактора

Отличительные приборы форм нагрузок и реакторов:

- Таблица Параметры:
 - R [о. е.] – синхронное задание и отображение активного сопротивления, последовательного с индуктивностью фаз;
 - Ra [о. е.] – индивидуальное задание и отображение активного сопротивления фазы A;
 - Rb [о. е.] – индивидуальное задание и отображение активного сопротивления фазы B;
 - Rc [о. е.] – индивидуальное задание и отображение активного сопротивления фазы C;
 - X [о. е.] – синхронное задание и отображение индуктивности фаз;
 - Xa [о. е.] – индивидуальное задание и отображение индуктивности фазы A;
 - Xb [о. е.] – индивидуальное задание и отображение индуктивности фазы B;
 - Xc [о. е.] – индивидуальное задание и отображение индуктивности фазы C;
 - G [о. е.] – синхронное задание и отображение проводимости, параллельной индуктивности и активному сопротивлению фаз;
 - Ga [о. е.] – индивидуальное задание и отображение проводимости фазы A;

- G_b [о. е.] – индивидуальное задание и отображение проводимости фазы B ;
- G_c [о. е.] – индивидуальное задание и отображение проводимости фазы C .

2.3.2. Осциллограф «ВМК РВ ЭЭС»

Осциллографы позволяют одновременно отображать множество процессов (осциллограмм), которые могут быть сгруппированы в несколько панелей. Не следует размещать в одной панели более 10 осциллограмм, так как существует весьма немного цветов, которые хорошо отличимы друг от друга на осциллограмме. Лучше увеличивать число панелей. Пользователь имеет возможность сам назначать цвета осциллограмм из списка цветов. Более подробная информация приведена в инструкции по эксплуатации «ВМК РВ ЭЭС» в разделе редакции осциллографов текущего режима и разделе редакции сценариев динамики.

Запуск осциллографа осуществляется с помощью кнопки Осциллограф, которая есть на каждой из форм (см. раздел «Формы “ВМК РВ ЭЭС”»). Нажав на кнопку Осциллограф, переходим к форме, внешний вид которой представлен на рис. 2.15.

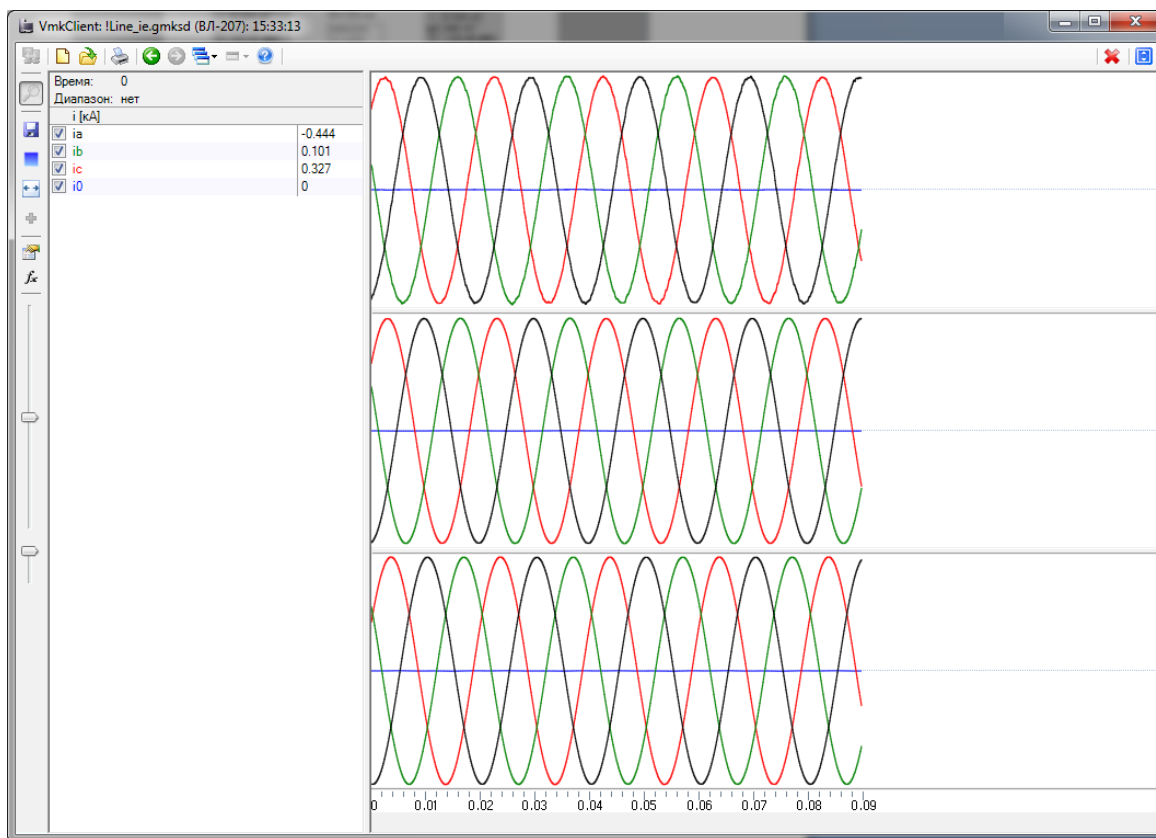


Рис. 2.15. Осциллограф «ВМК РВ ЭЭС»

ВНИМАНИЕ! Запись сигналов ведется до тех пор, пока открыто окно осциллографа. Если окно закрыть, то осциллограмма сотрется и при новом открытии окна осциллографа запись начнется заново.

Таблица 1

Описание верхней панели осциллографа


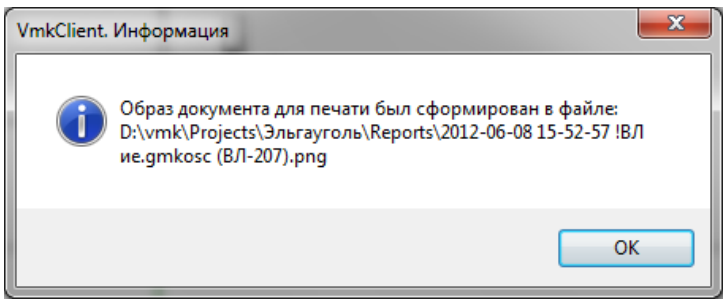




Обозначение	Название	Описание
	Создать образ документа для печати <Ctrl + P>	<p>Сделать Print Screen данного окна</p> <p>ВНИМАНИЕ! Файл сохраняется по следующему пути: Корневая папка проекта\Projects\Имя проекта\Reports\Имя файла.png. Обычно при нажатии кнопки появляется сообщение, в котором отображена данная информация, например:</p>  <p>ВНИМАНИЕ! Данный файл не может быть открыт вновь с помощью элементов ВМК РВ ЭЭС (VmkClient, KoskaXmlEditor). Открыть его можно любым «просмотрщиком» изображений.</p>

Таблица 2

Описание боковой панели осциллографа

Обозначение	Название	Описание
	Ретроспектива	Перейти в режим просмотра записанных осциллографом сигналов
	Сохранить документ	<p>При нажатии на данную кнопку появится окно, в котором можно выбрать вариант сохранения (Формат осциллографа ВМК или Comtrade), ниже показан путь и имя сохраняемого файла.</p> <p>ВНИМАНИЕ! При выборе варианта Comtrade по указанному пути можно обнаружить три файла с одинаковым именем с расширениями: hdr, dat и cfg. Эти файлы не могут быть отображены с помощью элементов ВМК РВ ЭЭС (VmkClient, KoskaXmlEditor).</p>

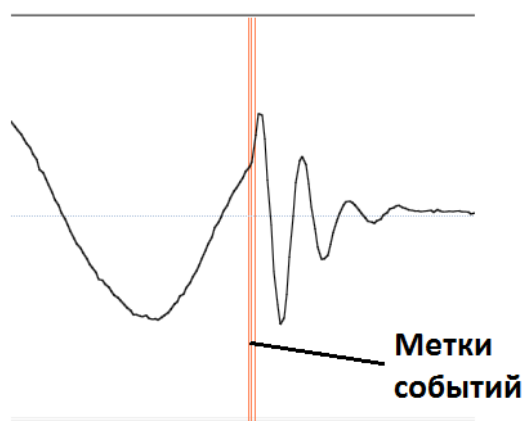
Обозначение	Название	Описание																																				
		<div data-bbox="595 360 1382 846" style="border: 1px solid gray; padding: 5px;"> <p>Выбор формата сохраняемого файла</p> <p>Форматы</p> <p><input checked="" type="radio"/> Формат осциллографа ВМК</p> <p><input type="radio"/> Формат Comtrade</p> <p> В формате ВМК сохраняются все параметры, а в формате Comtrade - только отмеченные галочками именованные параметры токов и напряжений</p> <p>Имя файла</p> <p>D:\vmk\Projects\Эльгауголь\Reports\2012-06-08 15-56-46 IВЛ.ие</p> <p><input type="button" value="Сохранить"/> <input type="button" value="Отмена"/></p> </div> <p>ВНИМАНИЕ! Если выбран Формат осциллографа ВМК, то по указанному пути можно найти файл с указанным именем с расширением <code>static-data</code> или <code>dynamic-data</code>, в зависимости от того в каком режиме снята осциллограмма: режим статики (установившийся) или динамический режим</p>																																				
	<p>Показать значения всех лучей</p>	<p>Отображать значения всех лучей, выведенных на осциллограф. Снимая/устанавливая галочки, можно убирать/отображать определенные сигналы или панели на осциллографе.</p> <table border="1" data-bbox="651 1279 1318 1760"> <tr> <td>Время:</td> <td colspan="2">-107</td> </tr> <tr> <td>Диапазон:</td> <td colspan="2">нет</td> </tr> <tr> <td><input checked="" type="checkbox"/> U [кВ]</td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td><input checked="" type="checkbox"/> U1</td> <td></td> <td>224.9</td> </tr> <tr> <td><input checked="" type="checkbox"/> U2</td> <td></td> <td>218.5</td> </tr> <tr> <td><input checked="" type="checkbox"/> I [кА]</td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td><input checked="" type="checkbox"/> I</td> <td></td> <td>0.131</td> </tr> <tr> <td><input checked="" type="checkbox"/> U0 [кВ]</td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td><input checked="" type="checkbox"/> U01</td> <td></td> <td>0.38</td> </tr> <tr> <td><input checked="" type="checkbox"/> U02</td> <td></td> <td>0.13</td> </tr> <tr> <td><input checked="" type="checkbox"/> I0 [кА]</td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td><input checked="" type="checkbox"/> I0</td> <td></td> <td>0</td> </tr> </table> <p>На этой же панели можно увидеть время, на котором установлена указательная метка, а также продолжительность выделенного на осциллограмме временного диапазона.</p>	Время:	-107		Диапазон:	нет		<input checked="" type="checkbox"/> U [кВ]			<input checked="" type="checkbox"/> U1		224.9	<input checked="" type="checkbox"/> U2		218.5	<input checked="" type="checkbox"/> I [кА]			<input checked="" type="checkbox"/> I		0.131	<input checked="" type="checkbox"/> U0 [кВ]			<input checked="" type="checkbox"/> U01		0.38	<input checked="" type="checkbox"/> U02		0.13	<input checked="" type="checkbox"/> I0 [кА]			<input checked="" type="checkbox"/> I0		0
Время:	-107																																					
Диапазон:	нет																																					
<input checked="" type="checkbox"/> U [кВ]																																						
<input checked="" type="checkbox"/> U1		224.9																																				
<input checked="" type="checkbox"/> U2		218.5																																				
<input checked="" type="checkbox"/> I [кА]																																						
<input checked="" type="checkbox"/> I		0.131																																				
<input checked="" type="checkbox"/> U0 [кВ]																																						
<input checked="" type="checkbox"/> U01		0.38																																				
<input checked="" type="checkbox"/> U02		0.13																																				
<input checked="" type="checkbox"/> I0 [кА]																																						
<input checked="" type="checkbox"/> I0		0																																				





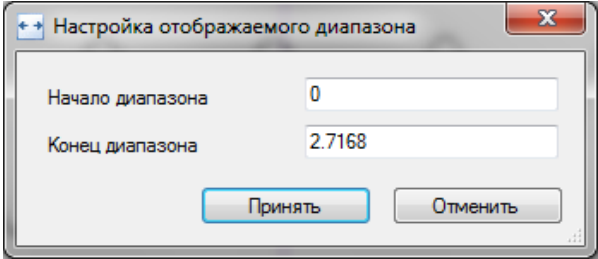




Под списком сигналов отображается список событий, произошедших за то время, пока было открыто окно осциллографа (т. е. за время записи сигналов в осциллограф), например:


События	
1.0156: Кз1@ВЛ-209	AB
1.078: Вкл1-1@ВЛ-209	0
1.0782: Вкл2-1@ВЛ-209	0
1.0782: Вкл1-2@ВЛ-209	BC
1.0784: Вкл2-2@ВЛ-209	BC
1.6874: Вкл1-2@ВЛ-209	0
1.6876: Вкл2-2@ВЛ-209	0
1.75: Вкл1-1@ВЛ-209	ABC
1.75: Кз1@ВЛ-209	0
1.7502: Вкл2-1@ВЛ-209	ABC
1.7502: Вкл1-2@ВЛ-209	ABC
1.7504: Вкл2-2@ВЛ-209	ABC

На осциллограмме данные события отображаются специальными метками:



ВНИМАНИЕ! В нижней части окна осциллографа отображается временная ось

Обозначение	Название	Описание
		 <p>При двойном щелчке левой кнопки мыши на экране осциллографа ноль на временной оси переместится на ту точку, где находится указательная метка. Все значения времени на оси до установленного нуля станут отрицательными</p>
	Фиксированный временной диапазон	 <p>В появившемся окне можно вручную задать временной диапазон, в рамках которого автоматически установятся границы осциллографа</p>
	Добавить метку <Ctrl + ПКМ>	<p>С помощью этой кнопки можно самостоятельно добавлять метки на осциллографе.</p> <p>ВНИМАНИЕ! Функция добавления меток становится доступной (зеленый цвет значка) только при условии фиксации с помощью нажатия правой кнопки мыши указательной метки на экране осциллографа. Новая метка ставится туда, где была указательная (удаление меток смотри в описании кнопки «Расширенные возможности осциллографа»)</p>
	Расширенные возможности осциллографа	Данная кнопка открывает окно с дополнительными функциями осциллографа (более подробное описание смотри ниже)
	Масштаб	Перемещая бегунок, можно изменять масштаб осциллограммы по времени
	Толщина линии	Перемещая бегунок, можно изменять толщину линий <u>всех</u> сигналов, выведенных на осциллограф

ВНИМАНИЕ! Функции Фиксированный временной диапазон, Добавить метку, Расширенное функциональное графическое представление и «Расширенные возможности осциллографа» становятся доступными только в режиме ретроспективного просмотра, переход в который осуществляется с помощью кнопки .

Расширенные возможности осциллографа

В данном пункте описываются дополнительные функции осциллографа, с помощью которых можно осуществлять различные манипуляции с сигналами и событиями (рис. 2.16).

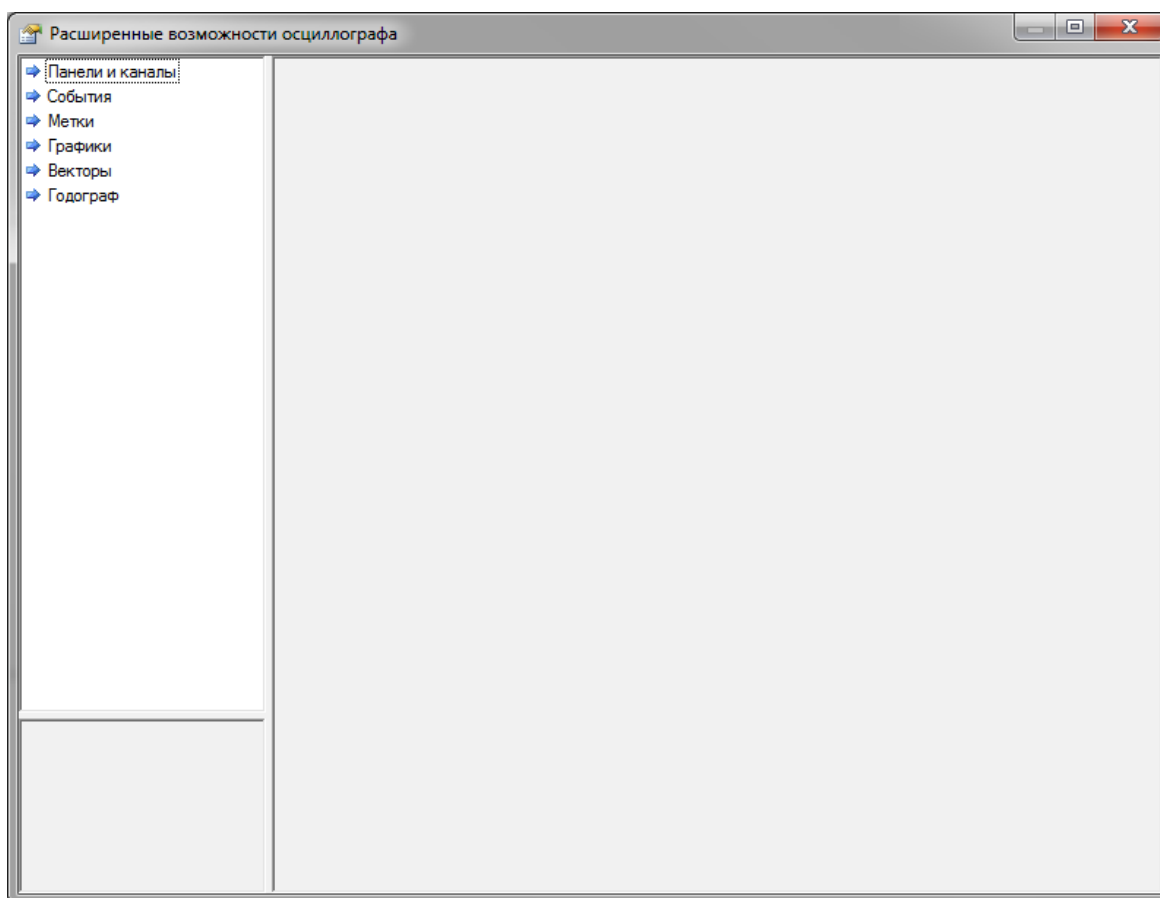


Рис. 2.16. Дополнительные возможности осциллографа

1. Панели и каналы

Ниже приведено описание дополнительных возможностей осциллографа, содержащееся в разделе Панели и каналы (рис. 2.17).

В правой части появляются два дополнительных окна: в первом (на рис. 2.17 – посередине) отображаются панели и каналы, выведенные на осциллограф; во втором (на рис. 2.17 – справа) – специальные настройки панелей и каналов.

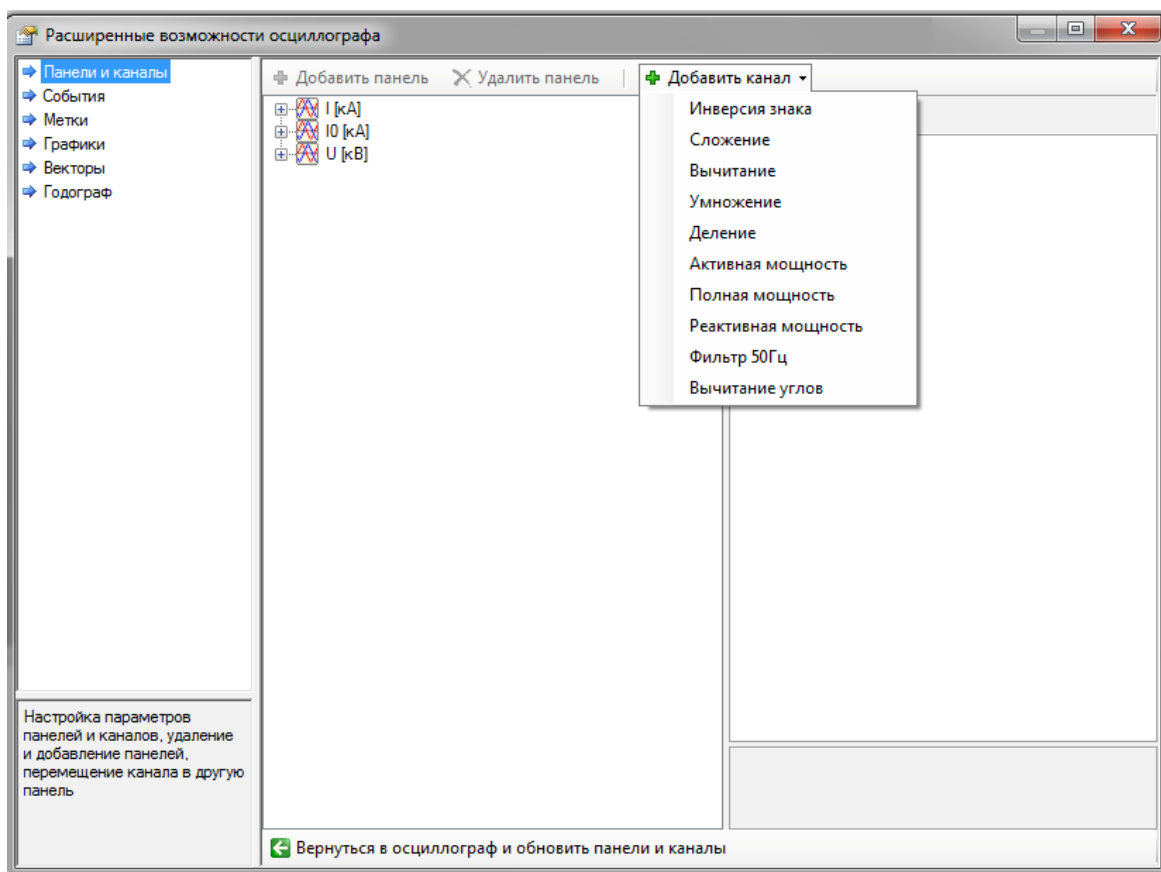


Рис. 2.17. Окно дополнительных функций осциллографа:
раздел Панели и каналы

В окне панелей и каналов можно добавлять и удалять панели и каналы. При нажатии правой кнопки мыши на выделенном канале или панели становится доступным следующее контекстное меню:

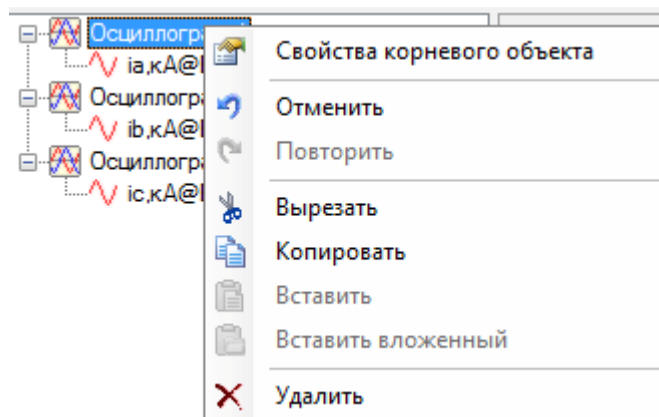


Рис. 2.18. Контекстное меню, доступное в разделе Панели и каналы

Каналы можно переносить из одной панели в другую посредством команд Копировать, Вырезать и Вставить контекстного меню, а также выделив канал и удерживая его, перенести в другую панель.

ВНИМАНИЕ! Удалить канал можно только с помощью контекстного меню (рис. 2.18).

Ниже приведены параметры, доступные в меню специальных параметров панелей и каналов (на рис. 2.19 – справа).

Панель	Канал																								
<table border="1"> <tr> <td colspan="2">Общие</td> </tr> <tr> <td>Имя</td> <td>Осциллограф 1</td> </tr> <tr> <td>Описание</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Горизонтальная ось</td> <td>по центру</td> </tr> <tr> <td>Единица измерения</td> <td>Да</td> </tr> <tr> <td>Разрешение</td> <td>Да</td> </tr> </table>	Общие		Имя	Осциллограф 1	Описание		Горизонтальная ось	по центру	Единица измерения	Да	Разрешение	Да	<table border="1"> <tr> <td colspan="2">Общие</td> </tr> <tr> <td>Параметр</td> <td>ia.kA@ВП-209</td> </tr> <tr> <td>Название</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Группа</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Цвет</td> <td>Авто</td> </tr> <tr> <td>Разрешение</td> <td>Да</td> </tr> </table>	Общие		Параметр	ia.kA@ВП-209	Название		Группа		Цвет	Авто	Разрешение	Да
Общие																									
Имя	Осциллограф 1																								
Описание																									
Горизонтальная ось	по центру																								
Единица измерения	Да																								
Разрешение	Да																								
Общие																									
Параметр	ia.kA@ВП-209																								
Название																									
Группа																									
Цвет	Авто																								
Разрешение	Да																								
<table border="1"> <tr> <td>Имя</td> </tr> <tr> <td>Название панели, может быть пустым</td> </tr> </table>	Имя	Название панели, может быть пустым	<table border="1"> <tr> <td>Параметр</td> </tr> <tr> <td>Имя параметра, значение которого отображает канал</td> </tr> </table>	Параметр	Имя параметра, значение которого отображает канал																				
Имя																									
Название панели, может быть пустым																									
Параметр																									
Имя параметра, значение которого отображает канал																									

Рис. 2.19. Меню настроек панелей и каналов осциллографа

Панель: в строке **Имя** присваивается имя панели, которое будет отображаться в основном окне осциллографа (имя может быть задано любое по выбору пользователя). В строке **Описание** пользователь может написать комментарии (если ему это требуется; **ВНИМАНИЕ!** Данная строка не является обязательной для заполнения); В строке **Горизонтальная ось** пользователь определяет положение горизонтальной оси: внизу или по центру панели; В строке **Единица измерения** определяется, отображать ли единицу измерения после значения параметров; в строке **Разрешение** определяется, отображать ли панель на осциллографе (**ВНИМАНИЕ!** Если выбрано **Нет**, то панель с осциллографа исчезнет, однако она может быть возвращена путем установки в данной строке значения **Да**, либо установки галочки на панели отображения сигналов в основном окне осциллографа (смотри таблицу описания боковой панели осциллографа в разделе «Основные функции осциллографа»).

Канал: в строке **Параметр** выбирается параметр, отображаемый в данном канале (**ВНИМАНИЕ!** В данной строке не может быть прописано произвольное имя. Необходимо задать имя, согласно конфигурации проекта ВМК РВ ЭЭС, как показано на рис. 2.19 (справа)); в строке **Название** вводится имя канала, которое будет отображаться в основном окне осциллографа (имя может быть задано любое по выбору пользова-

теля); в строке Группа задается номер, который определяет масштаб отображения сигнала (**ВНИМАНИЕ!** Номер может быть произвольным, однако, для того чтобы сигналы в рамках одной панели отображались в одном масштабе, номера группы им необходимо присвоить одинаковые); в строке Цвет определяется цвет луча сигнала; в строке Разрешение определяется, отображать ли луч сигнала на осциллографе (**ВНИМАНИЕ!** Если выбрано Нет, то сигнал с осциллографа исчезнет, однако он может быть возвращен путем установки в данной строке значения Да, либо установки галочки на панели отображения сигналов в основном окне осциллографа (смотри таблицу описания боковой панели осциллографа в разделе «Основные функции осциллографа»).

ВНИМАНИЕ! Все описанные выше настройки задаются индивидуально для каждой из панелей.

В верхней части окна (рис 2.17) расположены три дополнительные кнопки: Добавить панель, Удалить панель, Добавить канал.

Кнопка Добавить панель соответственно добавляет новую панель. Кнопка Удалить панель позволяет удалить панель (удалить панель можно также посредством контекстного меню, описанного выше) **ВНИМАНИЕ!** Удалить можно только пустую панель, т. е. в ней не должно быть каналов (лучей сигналов).

Кнопка Добавить канал позволяет добавить новый канал, который будет отображать результат одного выбранного из списка доступных действий:

1. Инверсия знака: инвертирует выбранные сигналы, отображаемые в каналах осциллографа.
2. Сложение: реализует сложение нескольких выбранных сигналов.
3. Вычитание: реализует вычитание из сигнала одного или нескольких других сигналов.
4. Умножение: реализует перемножение нескольких выбранных сигналов.
5. Деление: реализует деление сигнала на один или несколько других сигналов.
6. Фильтр 50 Гц: реализует функцию фильтра низких частот (ФНЧ), т. е. отфильтровывает частоту 50 Гц, подавляя частоты выше данной.

Работа описанных выше функций становится возможной при условии соблюдения следующей последовательности действий:

1. Сигналы, над которыми планируется совершить действия, описанные выше, необходимо собрать в одну панель. Для этого можно либо создать новую панель и перенести туда нужные сигналы, либо перенести их в одну из существующих панелей. **ВНИМАНИЕ!** Все вышеприведенные операции (за исключением инверсии знака и фильтра 50 Гц, ко-

которые совершают действие только над выбранным сигналом) задействуют *все* находящиеся в рамках *выбранной* панели сигналы (для того чтобы выбрать панель, над сигналами которой планируется совершить действие, можно либо выбрать саму панель, либо один из сигналов, находящихся внутри этой панели). Например, если в панели находятся три сигнала, то при выборе функции сложения все три сигнала просуммируются. Аналогичное условие и для остальных функций. **ВНИМАНИЕ!** Необходимо проявить осторожность при выполнении функций вычитания и деления сигналов: из верхнего в панели сигнала будут вычитаться все нижерасположенные; аналогично и с делением – верхний сигнал в панели будет делиться на все остальные, расположенные ниже.


2. Когда все нужные сигналы собраны в рамках одной панели (это условие необязательно для функций инверсии знака и фильтра 50 Гц), необходимо выбрать действие из списка.

В этой же панели, где собраны нужные сигналы, появится новый канал, являющийся результатом выбранного действия (рис. 2.20).

ВНИМАНИЕ! Добавленные каналы, будут также учитываться при выполнении новых операций. Для пояснения рассмотрим следующий пример: в панели находятся два сигнала; эти сигналы были просуммированы и появился третий сигнал (канал) в этой же панели (суммарный сигнал); если сразу же выполнить другое действие, например вычитание, то из первого в панели сигнала будет вычитаться не только второй сигнал, но и появившийся суммарный сигнал. Чтобы этого избежать, необходимо предварительно перенести результирующий сигнал в другую панель, прежде чем совершать новые операции.

ВНИМАНИЕ! Добавленные каналы и панели будут иметь те же опции, что и существующие (смотри настройка панелей и каналов в разделе Панели каналы, рис. 2.18).

После того, как новые каналы (лучи) появились, необходимо перенести их на основную форму осциллографа, нажав кнопку

 Вернуться в осциллограф и обновить панели и каналы

в нижней части окна. В основном окне осциллографа появятся добавленные панели и каналы.

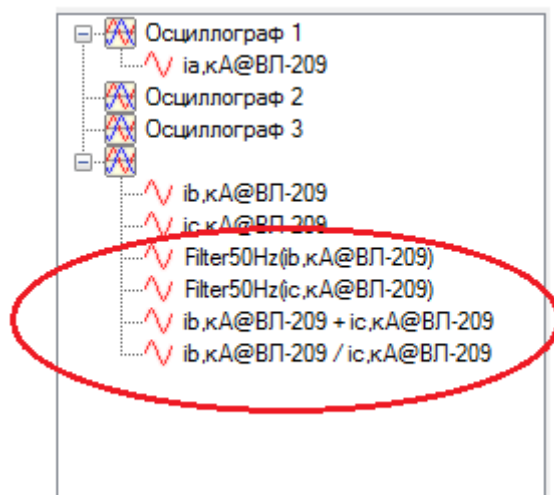


Рис. 2.20. Каналы (лучи), отображающие результаты определенных действий

2. События

Ниже приведено описание дополнительных возможностей осциллографа, содержащееся в разделе События (рис. 2.21).

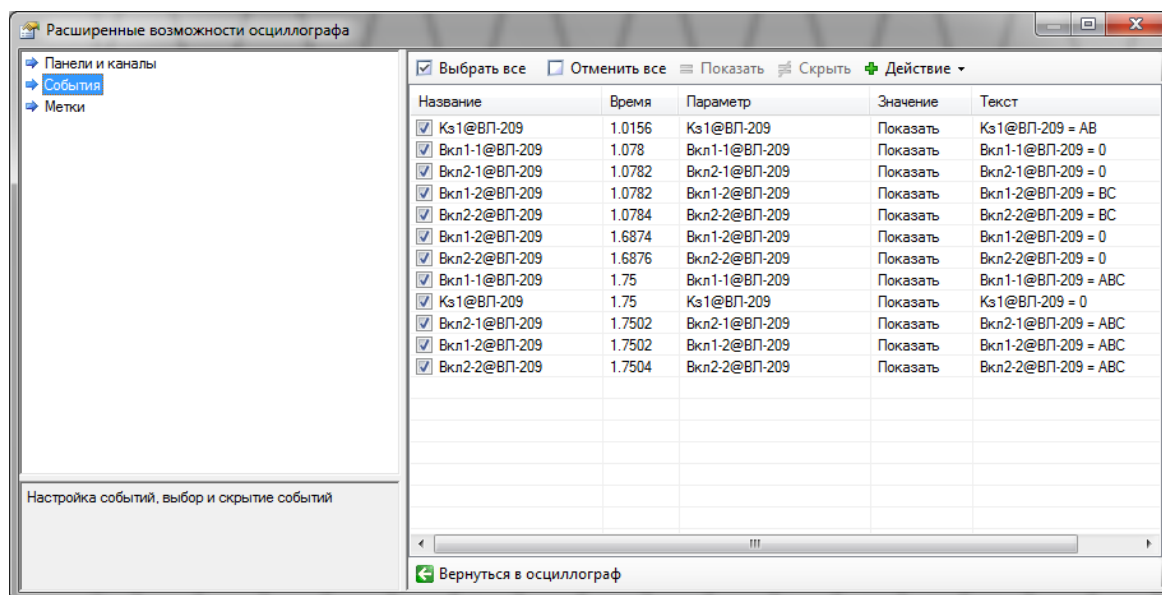
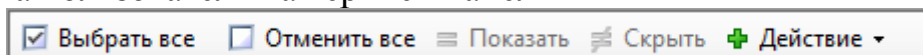


Рис. 2.21. Окно дополнительных функций осциллографа: раздел События

В данном окне отображаются все события, записанные на осциллограмме. Галочками отмечаются события, которые будут отображаться метками на осциллограмме в основном окне осциллографа (если галочку убрать, событие отображаться меткой на осциллограмме не будет) (смотри описание кнопки Показать значения всех лучей в пункте описания боковой панели в разделе «Основные функции осциллографа»). Для удобства пользователя на верхней панели



расположены кнопки Выбрать все и Отменить все, которые позволяют соответственно выбрать или снять выбор со всех событий в списке. Кроме того на этой же панели расположены кнопки Показать и Скрыть, которые касаются значений, соответствующих событиям (рис. 2.22) (текущее состояние отображается в столбце Значение (рис. 2.21)).

Последней имеющейся кнопкой на верхней панели окна дополнительных возможностей осциллографа является кнопка Действие, в которой доступна операция Преобразование в сигнал (рис. 2.23):

1.6874: Вкл1-2@ВП-209	0
1.6876: Вкл2-2@ВП-209	0
1.75: Вкл1-1@ВП-209	ABC
1.75: Кс1@ВП-209	0
1.7502: Вкл2-1@ВП-209	ABC
1.7502: Вкл1-2@ВП-209	ABC
1.7504: Вкл2-2@ВП-209	ABC

Рис. 2.22. Панель отображения событий и их значений в основном окне осциллографа

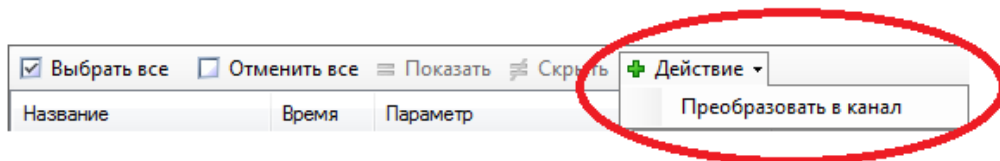


Рис. 2.23. Верхняя панель, доступная в разделе «События»

Данная функция преобразовывает **выделенные события в дискретный сигнал**. Такая функция наиболее удобная для преобразования действий коммутационной работы в дискретный сигнал (рис. 2.24).

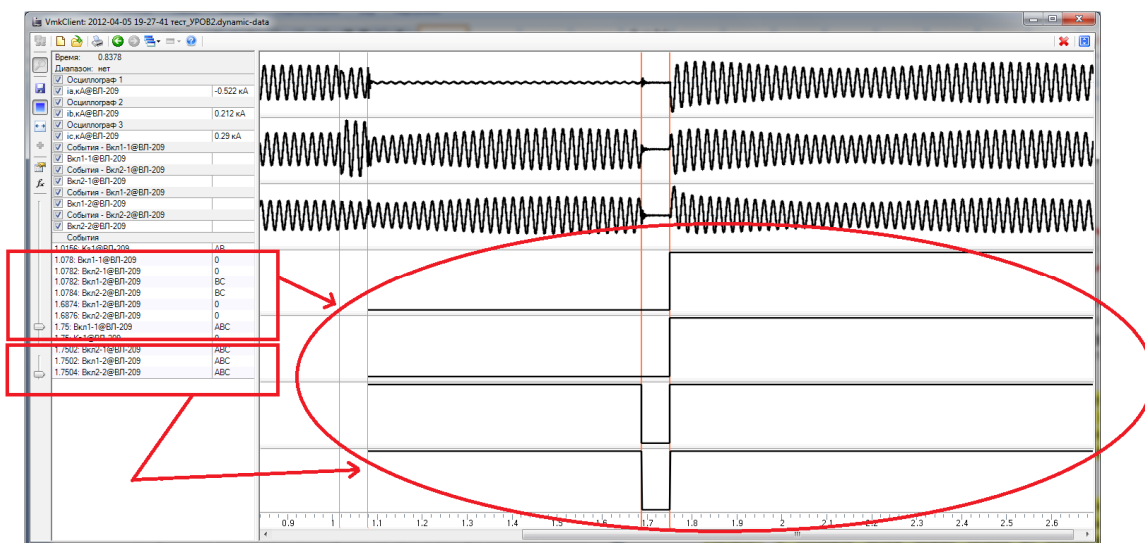


Рис. 2.24. Основное окно осциллографа, на котором выделены преобразованные в дискретные сигналы события

ВНИМАНИЕ! Для преобразования события в сигнал требуется выделить нужное событие, щелкнув по событию левой кнопкой мыши, или группу событий, выделив их, удерживая клавишу <Ctrl> или с помощью клавиши <Shift> (рис. 2.25).

<input checked="" type="checkbox"/>	Кз1@ВП-209	1.0156	Кз1@ВП-209	Показать	Кз1@ВП-209 = АВ
<input checked="" type="checkbox"/>	Вкл1-1@ВП-209	1.078	Вкл1-1@ВП-209	Показать	Вкл1-1@ВП-209 = 0
<input checked="" type="checkbox"/>	Вкл2-1@ВП-209	1.0782	Вкл2-1@ВП-209	Показать	Вкл2-1@ВП-209 = 0
<input checked="" type="checkbox"/>	Вкл1-2@ВП-209	1.0782	Вкл1-2@ВП-209	Показать	Вкл1-2@ВП-209 = ВС
<input checked="" type="checkbox"/>	Вкл2-2@ВП-209	1.0784	Вкл2-2@ВП-209	Показать	Вкл2-2@ВП-209 = ВС
<input checked="" type="checkbox"/>	Вкл1-2@ВП-209	1.6874	Вкл1-2@ВП-209	Показать	Вкл1-2@ВП-209 = 0
<input checked="" type="checkbox"/>	Вкл2-2@ВП-209	1.6876	Вкл2-2@ВП-209	Показать	Вкл2-2@ВП-209 = 0

Рис. 2.25. Выделение нужных для преобразования событий

Когда выбор событий и все необходимые преобразования в окне раздела События сделаны, нужно нажать на кнопку Вернуться в осциллограф. Таким образом все совершенные действия вступят в силу.

3. Метки

Ниже приведено описание дополнительных возможностей осциллографа, содержащееся в разделе Метки (рис. 2.26).

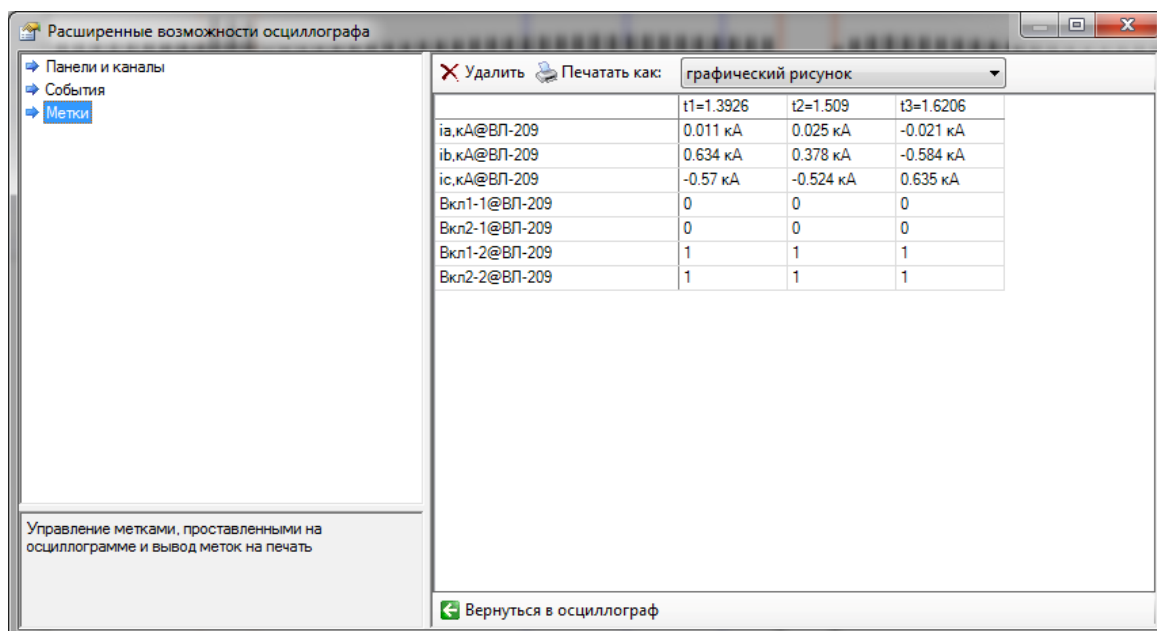


Рис. 2.26. Окно дополнительных функций осциллографа: раздел Метки

В данном разделе в табличном виде, как показано на рис. 2.26, будут отображаться значения **всех** сигналов, выведенных на осциллограф. **ВНИМАНИЕ!** Значения сигналов, отображение которых на осциллографе было запрещено (см. раздел Панели и каналы), будут равны нулю.

ВНИМАНИЕ! Метки, установленные на осциллографе, могут быть удалены только с помощью кнопки Удалить в данном разделе (рис. 2.26). Установка меток в этом разделе недоступна (описание этой возможности было приведено выше: описание кнопок боковой панели в главе «Основные функции осциллографа»). При нажатии кнопки Удалить удалятся **все метки**, в том числе и с осциллограммы.

Последняя кнопка, доступная в данном разделе, это кнопка Печатать как, которая позволяет сохранить полученные результаты в виде рисунка в формате .png или таблицы в формате .txt (рис. 2.27).

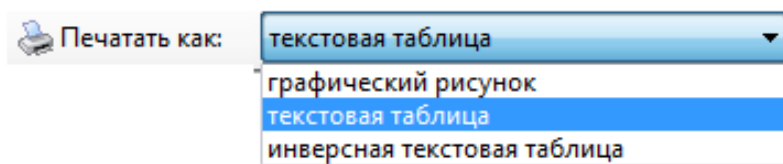


Рис. 2.27. Варианты сохранения полученных результатов

Текстовая таблица отличается от Инверсной текстовой таблицы способом отображения столбцов и строк таблицы (рис. 2.28).

а

	1.3126	1.454		
іа, кА@ВЛ-209	0.006 кА		-0.011 кА	
Вкл1-1@ВЛ-209	0	0		
Вкл2-1@ВЛ-209	0	0		
Вкл1-2@ВЛ-209	1	1		
Вкл2-2@ВЛ-209	1	1		

б

	іа, кА@ВЛ-209	Вкл1-1@ВЛ-209	Вкл2-1@ВЛ-209	Вкл1-2@ВЛ-209	Вкл2-2@ВЛ-209
1.3126	0.006 кА	0	0	1	1
1.454	-0.011 кА	0	0	1	1

*Рис. 2.28. Сохранение данных в виде таблицы:
а – текстовая таблица; б – инверсная текстовая таблица*

При выборе варианта сохранения и нажатии кнопки Печатать как появится сообщение, в котором будет отображен путь к сохраненному файлу (рис. 2.29):

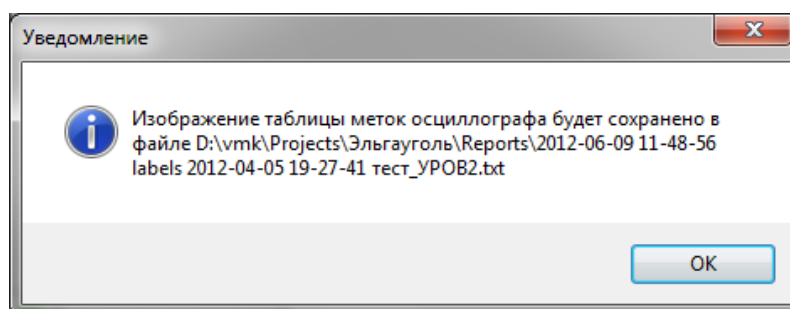


Рис. 2.29. Пример информационного сообщения, появляющегося при нажатии кнопки Печатать как

4. Графики

При переходе в данный раздел на экране сохраняется фрагмент осциллограммы в пределах заданного в основном окне осциллографа временного диапазона.

Данный раздел предназначен для оформления осциллограмм (рис. 2.30) в виде, удобном для представления в отчеты, доклады и т. д. С помощью функций, расположенных на верхней панели,



можно сохранить осциллограммы в виде рисунка, нанести прямоугольники, овалы, линии, текст, метки или удалить эти элементы. С помощью панели $F[\text{Гц}]$ Arial 8 pt Нормальный от-редактировать название сигнала, параметры линии и текста.

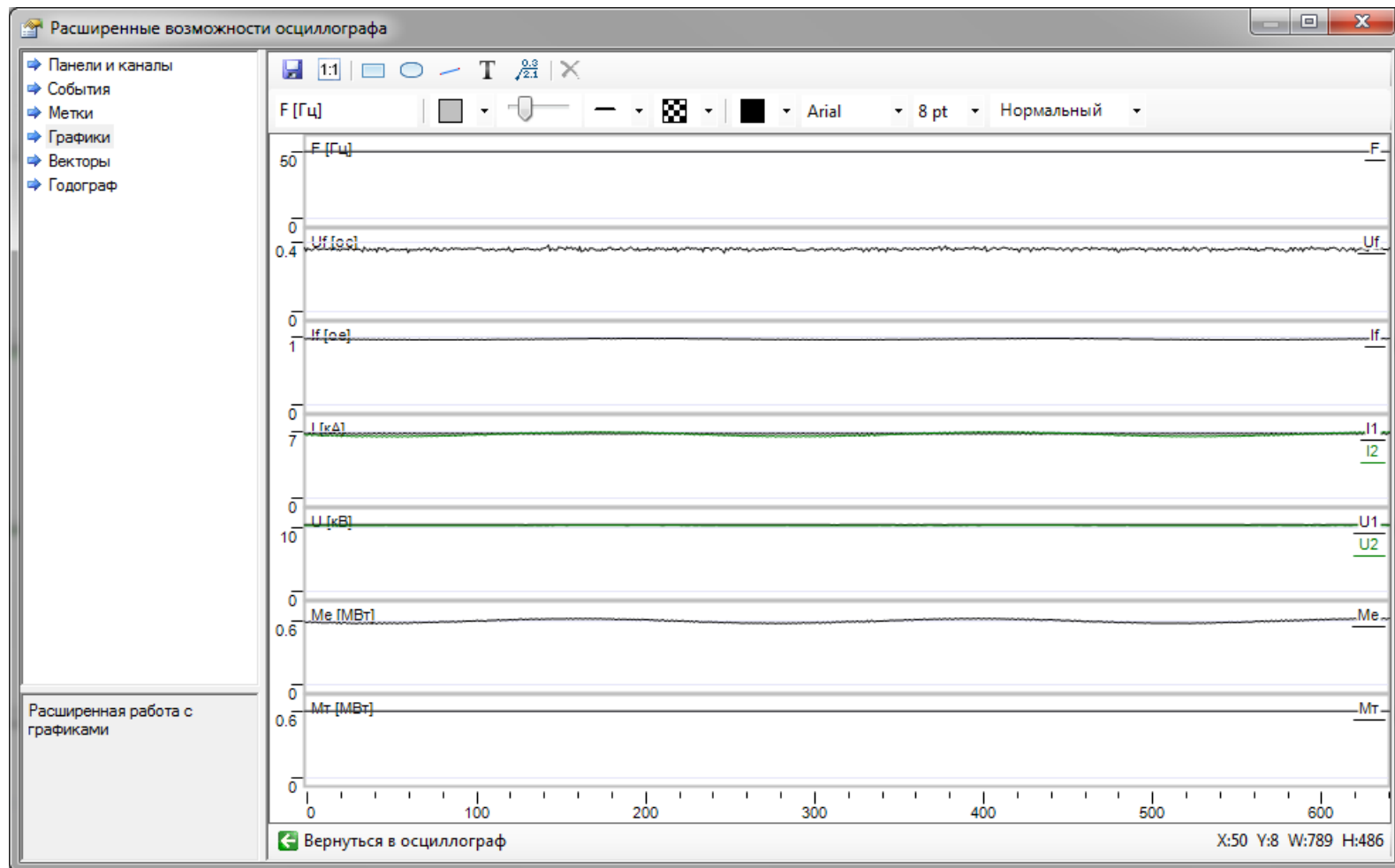



Рис. 2.30. Окно дополнительных функций осциллографа: раздел Графики

Использование остальных функций в рамках данного курса не предусмотрено.

Кнопка  **Вернуться в осциллограф** в данном разделе возвращает основное окно осциллографа.

2.3.3. Сценарии режимов

В СПО «ВМК РВ ЭЭС» предусмотрено два типа режимов (см. п. 2.4.2): режим статики (сц. режима) и режим динамики (сц. динамики).

1. Сценарий режима

Сценарий режима статики обычно задает нужное квазиустановившееся схемно-режимное состояние моделируемой системы, определенное состоянием выключателей, короткозамыкателей и значениями параметров элементов моделируемой системы, а также последовательностью установления и задания значений и состояний.

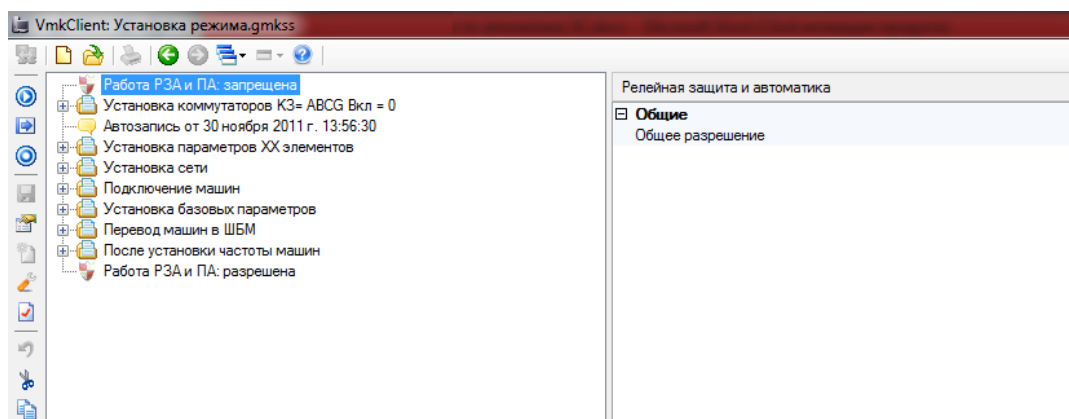


Рис. 2.31. Форма документа сценария режима (режим статики)

2. Сценарий динамики

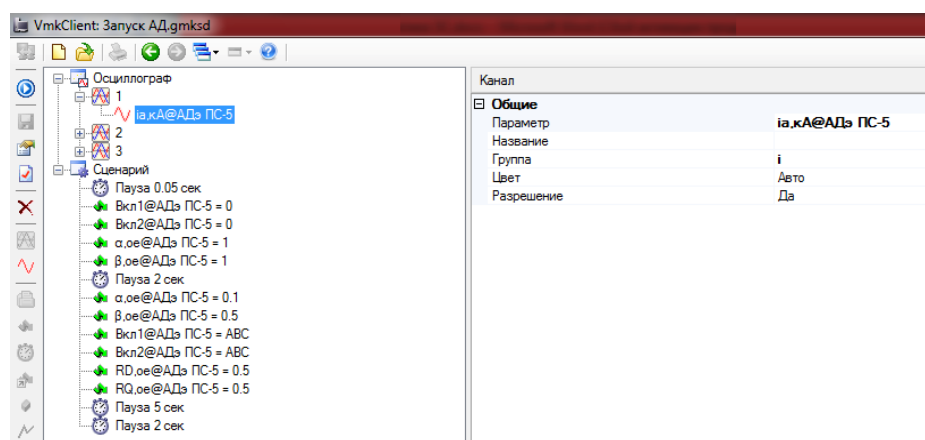


Рис. 2.32. Форма документа сценария динамики (режим динамики)

Документ сценария динамики аналогичен документу сценария режима, но имеется ряд отличий:

- во-первых, сценарий динамики разрешает использование только операторов задания значения параметра, паузы и комментария. Операторы группирования, ожидания и общей синхронизации недопустимы;
- во-вторых, сценарий динамики определяет набор переменных для осциллографирования, а точнее, структуру осциллографа динамики, то есть, осциллограммы и панели.

ВНИМАНИЕ! Если число параметров будет слишком большим, то осциллограммы будут иметь разрывы (пустые области), означающие, что сервер не успел вовремя собрать и обработать все данные и часть данных оказалась потерянной. Обычно разрывы невелики и не мешают анализу осциллограмм, но если число переменных очень большое, то перерывы могут быть значительными – в этом случае нужно уменьшить число осциллографируемых переменных, сведя разрывы к приемлемому минимуму.


Каждая осциллографируемая переменная имеет атрибуты:

- Имя параметра, Название, Группа, Цвет.
- Имя параметра (переменной режима) выбирается из базы данных.
- Наименование – сокращенное представление Имени параметра.


Необязательный атрибут. Если наименование не задается, то используется имя параметра.


ВНИМАНИЕ! Назначение группы необязательно, но желательно. Если значение группы не будет задано, то в этом случае осциллограмма будет масштабироваться по своему собственному максимуму. Если же по нескольким панелям разнесены несколько взаимно сопоставимых переменных (например токи или напряжения трех фаз), то их следует отнести к одной группе. В частности, если отображаются три тока и три напряжения фаз, то осциллограммы токов можно приписать к группе I, а осциллограммы напряжений к группе U. Объединение переменных в группу означает, что их осциллограммы будут автомасштабироваться по общему максимуму для всей группы, который определяется наибольшим значением переменной в данной группе.


Основные кнопки, которые здесь требуется знать при работе со сценариями режимов:

 – выполнить сценарий. Эта команда отображает диалог, позволяющий выбрать весь сценарий от начала, либо его часть от текущего оператора. В результате выбора создается запрос к серверу и сформированный сценарий передается ему на выполнение. Сервер периодически уведомляет клиента о том, какой оператор выполняется в данный мо-

мент времени, и это изменяет текущий оператор сценария. Во время длительного сценария можно открывать нужные формы и наблюдать за процессом установки режима.


 – выполнить шаг сценария. Выполняется одиночная команда задания значения параметра или выполняется вся группа, если текущая строка сценария – группа. После выполнения шага текущая строка перемещается вниз.


 – сохранение готового сценария. Сценарий также автоматически сохраняется после выполнения или при закрытии программы VmkClient.


 – проверка сценария на корректность. Целесообразно выполнять эту команду после внесения большого числа изменений в сценарий, чтобы убедиться в правильности задания всех операторов.

 – удалить ненужный оператор.

Операторы сценария:

 – группа операторов. Если сценарий сложный, то можно его структурировать, объединяя и вводя группы операторов – это делает сценарий более понятным и более удобным для редактирования.

 – оператор задания параметра. Имеет атрибуты – имя параметра и значение. Если создавать или редактировать оператор вручную, то в инспекторе следует выбрать имя параметра и задать его значение. Только этот оператор неявно добавляется в сценарий при автозаписи. Все остальные операторы нужно добавлять явно.

 – оператор паузы. Может потребоваться для ожидания завершения какого-либо процесса, вызвавшего изменение предыдущих параметров. Время паузы задается в секундах.

2.3.4. Редактор KoskaXmlEditor2010

Основной программой, отвечающей за редакцию форм, осциллографов, сценариев режима и сценариев динамики, является программа KoskaXmlEditor2010, хотя частично функции редактирования сценариев режима и сценариев динамики выполняет СПО клиента «VmkClient». Редактор запускается (рис. 2.33) с помощью одноименного exe-файла, находящегося в папке проекта Vmk.

В области Типы файлов выбирается тип файла, который планируется открыть или создать. При этом в области справа Последние файлы отображаются файлы выбранного типа, открытые ранее в редакторе.

Интерфейс программы состоит из меню, панели кнопок и двух разделов – дерево объектов (рис. 2.34, слева) и инспектор объектов (рис. 2.34, справа).

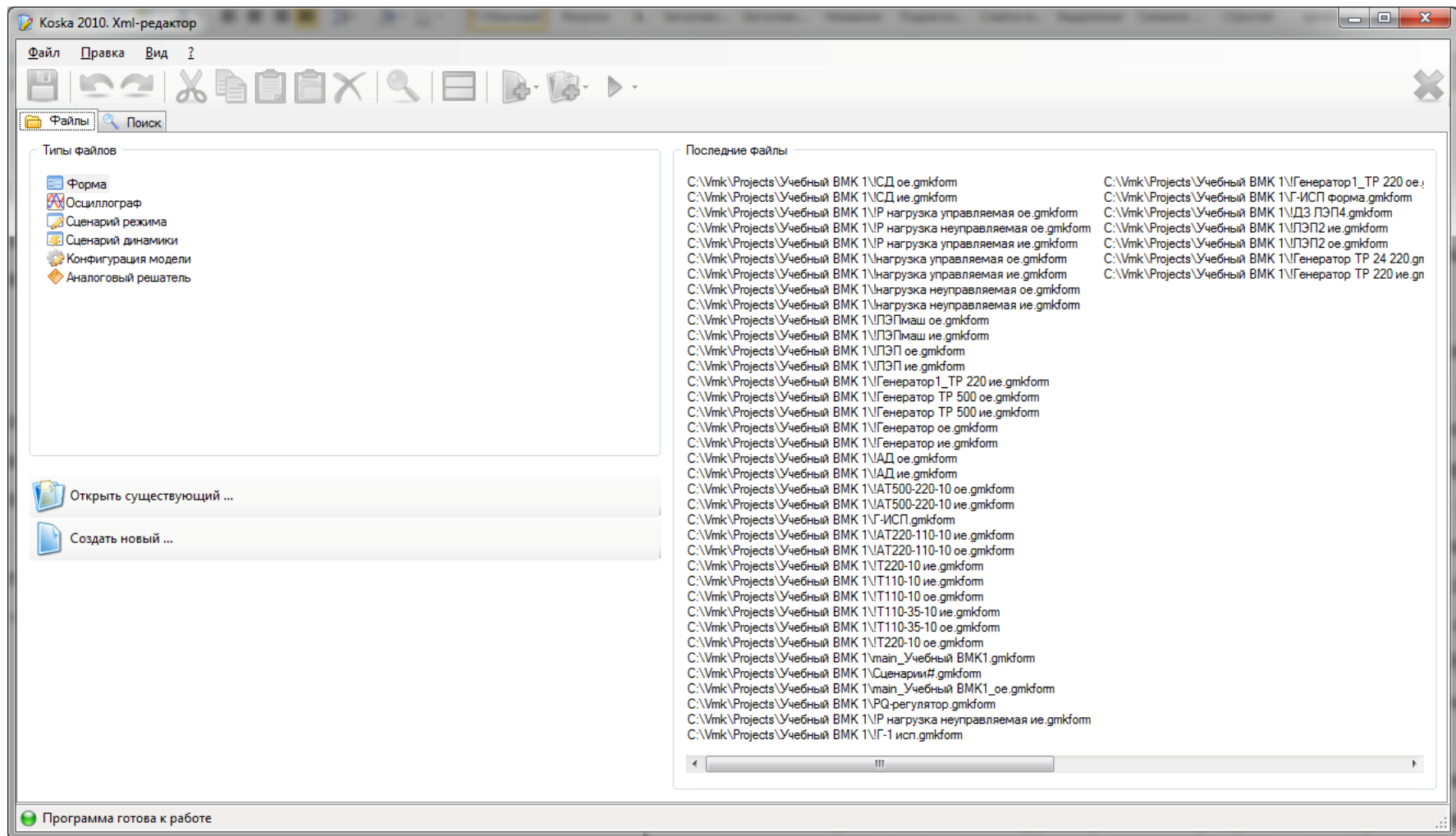


Рис. 2.33. Окно редактора KoskaXmlEditor2010

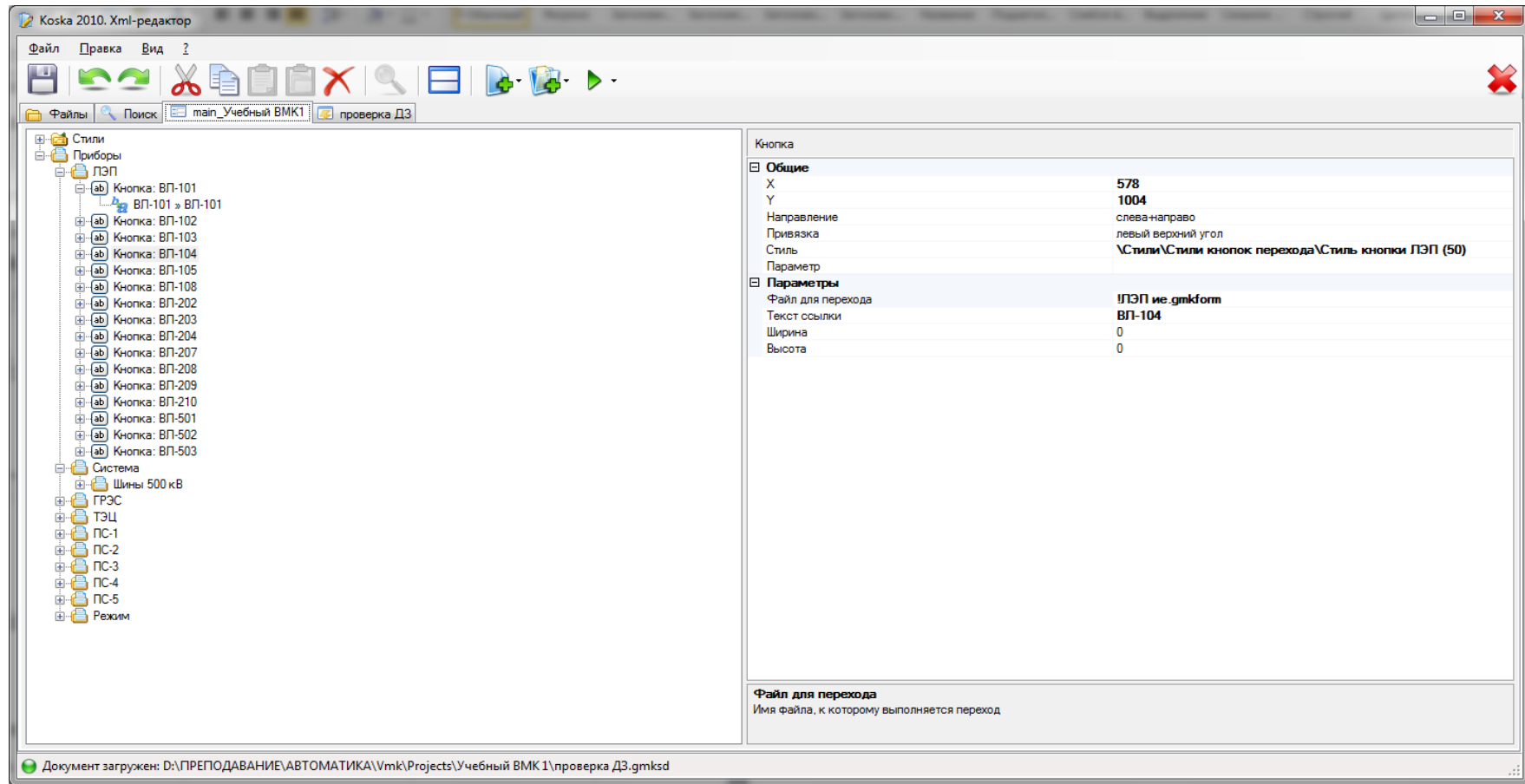




Рис. 2.34. Интерфейс редактора KoskaXmlEditor2010 (пример для формы)




Рис. 2.35. Верхняя панель редактора KoskaXmlEditor2010

В верхней панели редактора (рис. 2.35) располагается ряд кнопок, среди которых есть общепонятные: Сохранить, Отменить, Повторить, Вырезать, Копировать, Вставить, Вставить вложенный (вложить скопированный элемент в уже имеющуюся вкладку или папку в дереве объектов), Удалить, Поиск и Предварительный просмотр; и специализированные:

 **Добавить.** Добавляет новый объект после текущего. Список доступных в данной точке документа объектов отображается в выпадающем меню.

 **Добавить вложенный.** Подобна предыдущей, но добавляет новый объект в конец списка дочерних (вложенных) объектов для текущего объекта.

 **Запрос.** Команда выполняет запрос к структуре объектов документа. Список запросов отображается в выпадающем меню и специфичен для каждого конкретного типа документа.

Среди всех типов для выполнения лабораторных работ потребуются лишь три: осциллографы, сценарии статики и сценарий динамики. Описание редактирования остальных типов файлов можно найти в инструкции по эксплуатации «ВМК РВ ЭЭС».

Создание и редактирование осциллографов

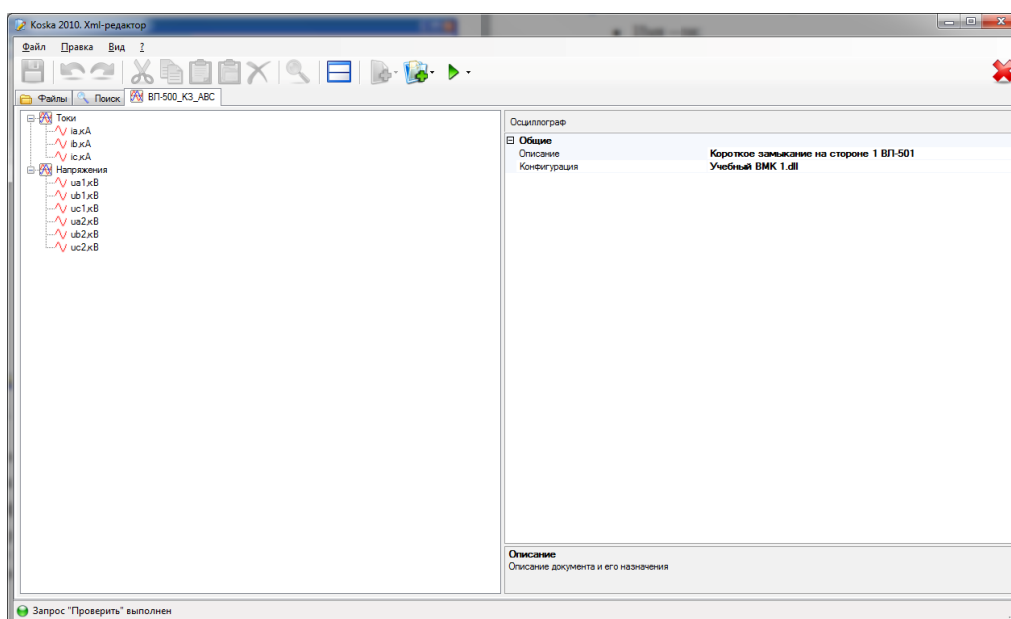


Рис. 2.36. Редактирование осциллографа в KoskaXmlEditor2010

Свойства осциллографа (рис. 2.36):

- Описание – более подробный комментарий к названию;
- Конфигурация – имя файла конфигурации (Учебный ВМК 1.dll).

Для размещения осциллограмм в окне осциллографа можно задать несколько панелей – окон и в каждую панель выбрать несколько желаемых осциллограмм.

Каждая панель (рис. 2.37) характеризуется:

- Имя – Имя панели;
- Описание – краткая характеристика;
- Горизонтальная ось – может принимать два значения: внизу и по центру;
- Единица измерения: Нет, Да – определяет выводить ли единицы измерения после значения;
- Разрешение: Нет, Да – отображать ли данную панель на осциллографе.

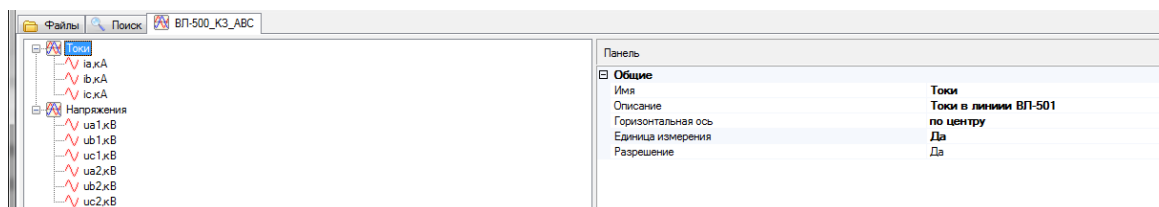


Рис. 2.37. Панель осциллографа

Канал (рис. 2.38) характеризуется:

- Параметр – выбор параметра или переменной процессов элемента;
- Название – имя, которое будет отражаться на форме;
- Группа – значения величин в одноименной группе будут автоматически масштабироваться по максимальному значению из группы;
- Цвет – выбор цвета осциллограммы (по умолчанию Авто);
- Разрешение: Нет, Да – отображать ли данную панель на осциллографе.

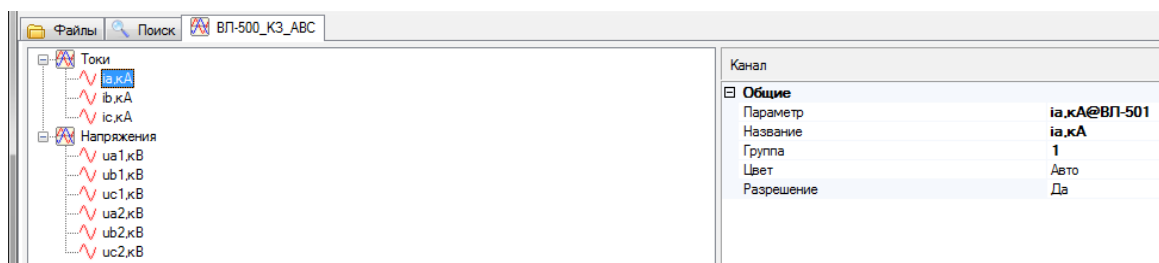


Рис. 2.38. Канал в панели осциллографа

Команда Запрос используется для проверки правильности задания значений.

Сценарии режимов

Свойства сценария (рис. 2.39):

- Описание – более подробный комментарий к названию;
- Конфигурация – имя файла конфигурации (Учебный ВМК 1.dll).

Сценарий режима задает и автоматически устанавливает некоторое исходное или нужное квазиустановившееся схемно-режимное состояние моделируемой энергосистемы. Задание схемно-режимного состояния заключается, в основном, в задании значений параметров элементов и состояний их выключателей и короткозамыкателей, а также в последовательности их выполнения.

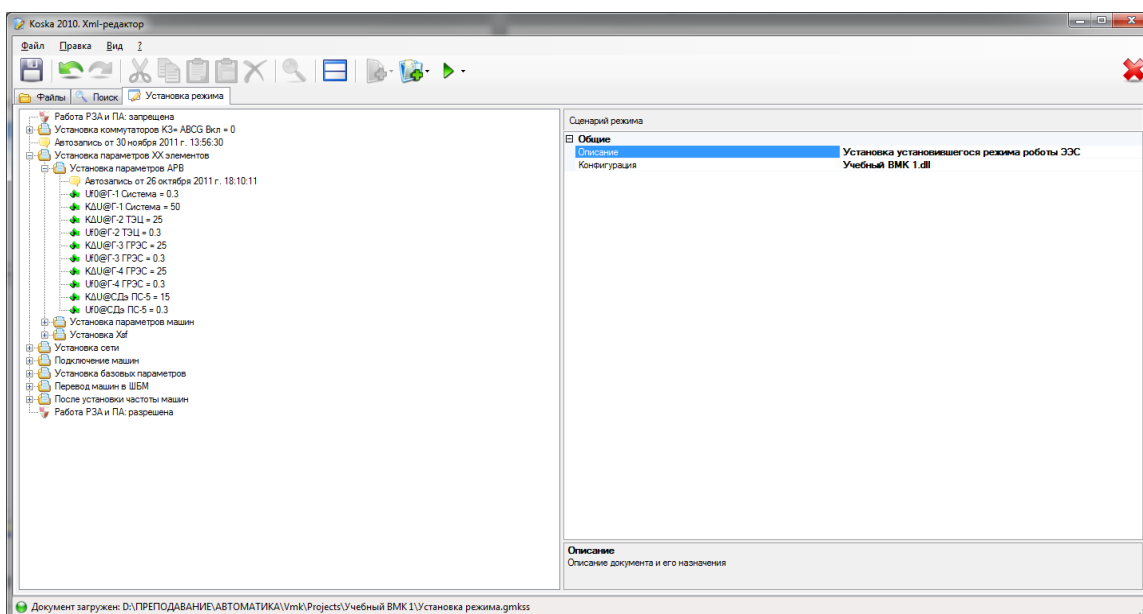



Рис. 2.39. Редактирование сценария режима в KoskaXmlEditor2010

Операторы сценария:

 – группа операторов (рис. 2.40). Если сценарий сложный, то можно его структурировать, введя группы операторов – это сделает сценарий более понятным и более удобным для редактирования.

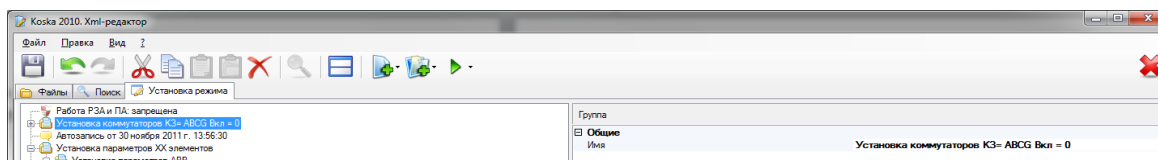



Рис. 2.40. Редактирование сценария режима в KoskaXmlEditor2010

 – оператор задания параметра (рис. 2.41). Имеет атрибуты – имя параметра и значение. Если создавать или редактировать оператор вручную, то в инспекторе следует выбрать имя параметра и задать его

значение. Только этот оператор неявно добавляется в сценарий при автозаписи. Все остальные операторы нужно добавлять явно.

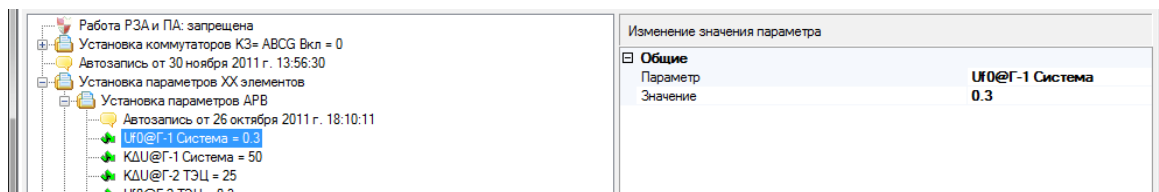



Рис. 2.41. Редактирование сценария режима в KoskaXmlEditor2010

 – оператор паузы (рис. 2.42). Может потребоваться для ожидания завершения какого-либо процесса, вызванного изменением предыдущих параметров. Время паузы задается в секундах.

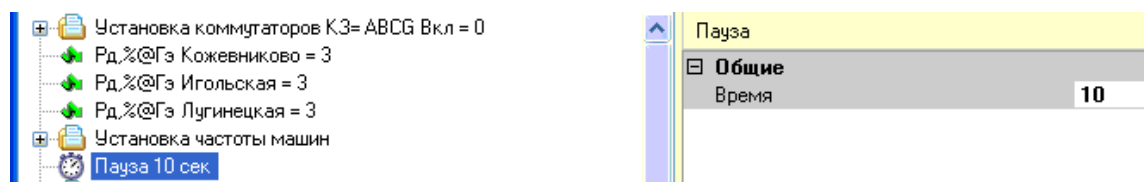



Рис. 2.42. Редактирование сценария режима в KoskaXmlEditor2010

 – оператор ожидания значения параметра (рис. 2.43). Как и оператор паузы используется для ожидания завершения каких-либо процессов, но в отличие от паузы ожидает момент, при котором нужный параметр установится в требуемое значение. Оператор имеет несколько атрибутов, из которых основные – имя параметра и ожидаемое значение. Атрибут Погрешность определяет предельную разность между ожидаемым значением и допустимым отклонением от него. Точнее можно назвать этот атрибут Максимальное допустимое отклонение от ожидаемого значения. Атрибут Временная зона определяет интервал времени, в течение которого значение не должно выходить за пределы допустимого отклонения. Атрибут используется в том случае, если требуется ожидание того факта, что значение параметра во время какого-либо процесса будет соответствовать допустимому отклонению во всем указанном интервале времени. Если Временная зона равна 0, то оператор ожидания будет завершаться при первом вхождении значения в область допустимых отклонений. Атрибут Таймаут определяет максимальное время ожидания. Если за это время параметр не достигнет заданного значения, то сценарий завершается с соответствующим сообщением.

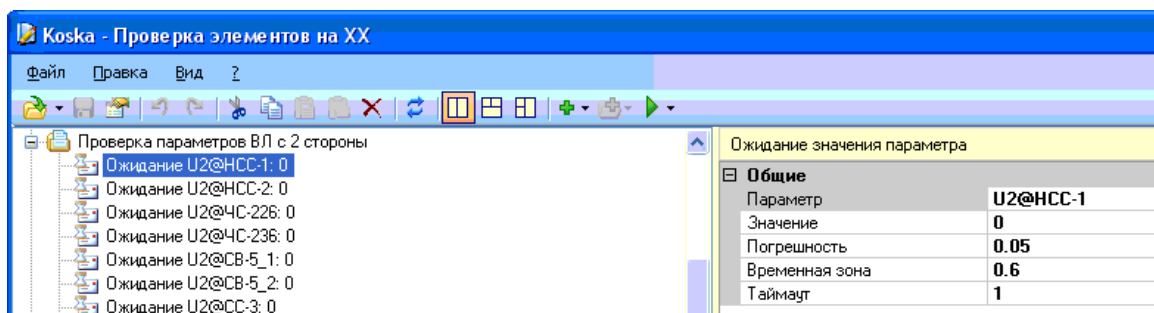


Рис. 2.43. Редактирование сценария режима в KoskaXmlEditor2010



– оператор ожидания значения выражения (рис. 2.44 и 2.45). Атрибут **Значение** определяет условие (записывается в круглых скобках, имя параметра пишется в квадратных скобках), при выполнении которого цикл, записанный внутри оператора ожидания, завершается. Пока этого не произошло, параметры, записанные внутри оператора, будут изменяться по определённому пользователем закону, записанному в строке **Значение**. Атрибуты **Временная зона** и **Таймаут** аналогичны оператору ожидания значения параметра. Атрибут **Интервал** определяет интервал в миллисекундах, через который будут выполняться вложенные операторы.

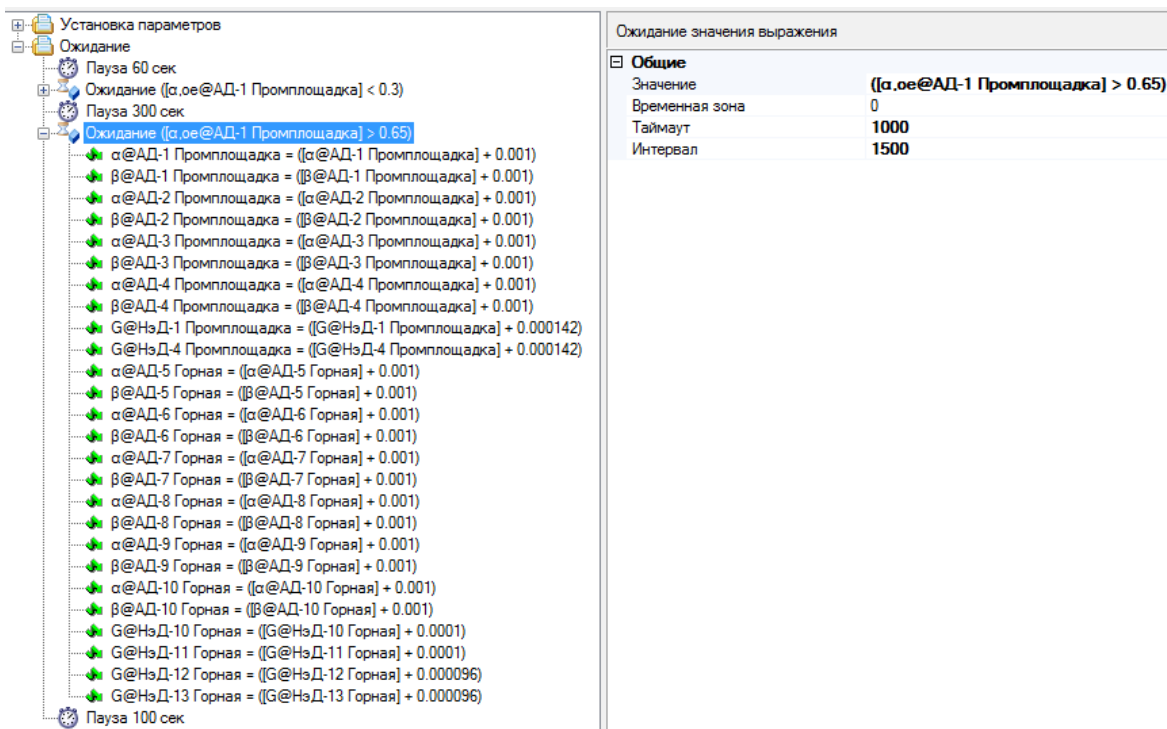


Рис. 2.44. Редактирование сценария режима в KoskaXmlEditor2010

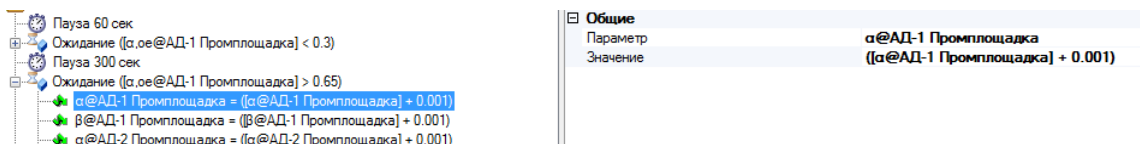



Рис. 2.45. Редактирование сценария режима в KoskaXmlEditor2010

 – общая синхронизация (рис. 2.46). Этот оператор запускает соответствующие алгоритмы микроконтроллеров СГП всех электрических машин. Применяется после задания начального угла роторов электрических машин.

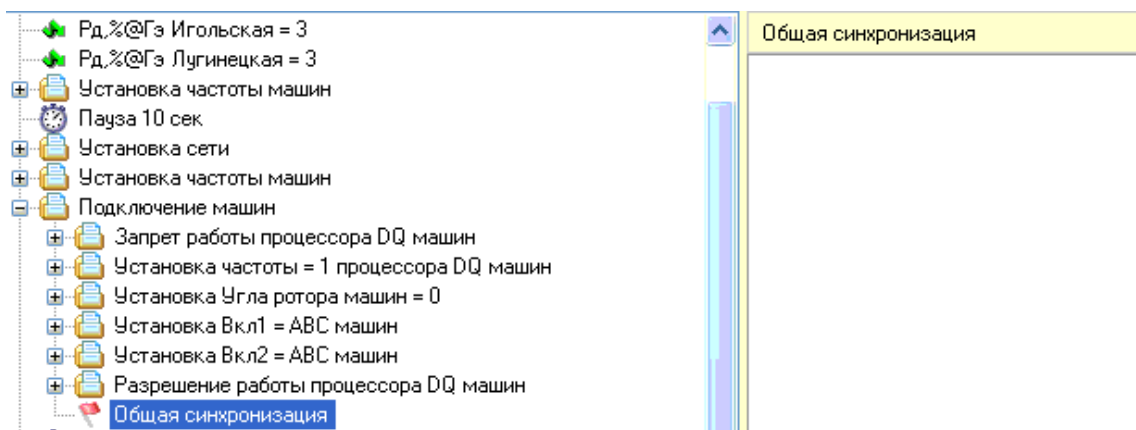



Рис. 2.46. Редактирование сценария режима в KoskaXmlEditor2010

 – комментарий (рис. 2.47). Используется для документирования сценария и не оказывает влияния на ход моделирования.

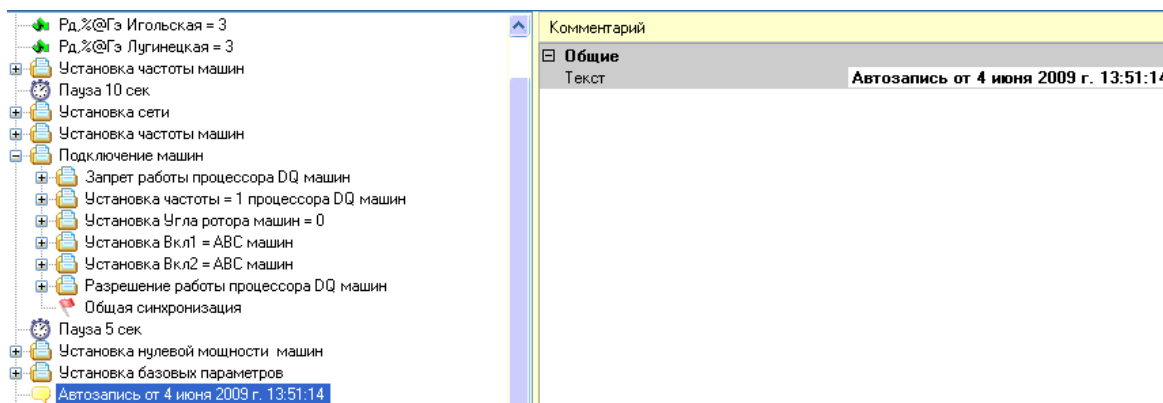


Рис. 2.47. Редактирование сценария режима в KoskaXmlEditor2010

Сценарии динамики

Свойства Сценария:

- Автостарт Да, Нет – автоматический старт сценария динамики применяется в формах для вывода осциллограмм мгновенных значений.

При этом выполнение сценария происходит без запросов выполнения и информации о завершении сценария;

- Описание – более подробный комментарий к названию;
- Конфигурация – имя конфигурации dll.

Документ сценария динамики напоминает документ сценария режимов, но имеется ряд отличий. Во-первых, сценарий динамики разрешает использование только операторов задания значения параметра, паузы и комментария. Операторы группирования, ожидания и общей синхронизации недопустимы. Во-вторых, сценарий динамики определяет набор выбранных для осциллографирования переменных, а точнее, структуру осциллографа динамики, то есть, осциллограммы и панели. Сценарий динамики передается на сервер и выполняется на нем. После завершения сценария сервер возвращает клиенту массив переменных, параметров и событий, которые произошли во время моделирования динамики.

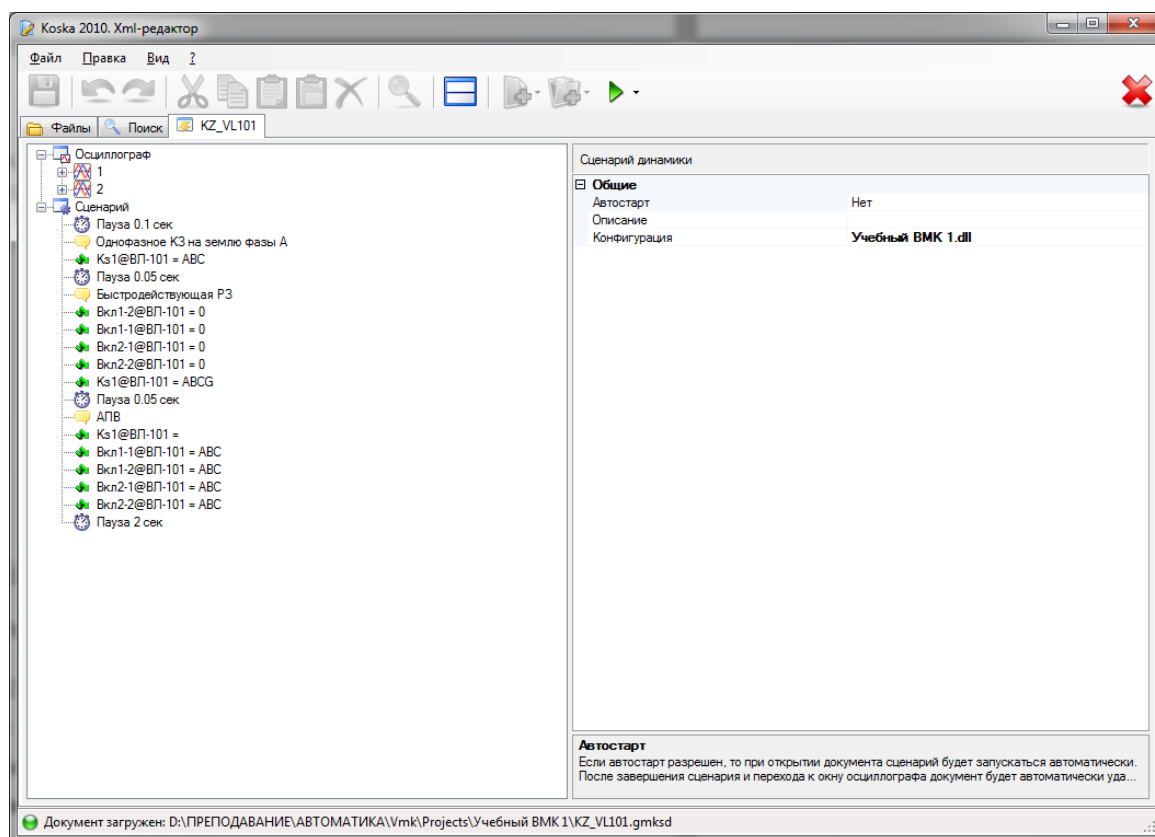


Рис. 2.48. Редактирование сценария динамики в KoskaXmlEditor2010

Отметим, что есть два ограничения по числу одновременно осциллографируемых переменных. Первое ограничение жесткое и касается числа осциллограмм, которые можно получить от одного СГП ВМК РВ ЭЭС. Если это ограничение нарушается, то сценарий завершается с со-

общением об ошибке. В этом случае нужно уменьшить список осциллограмм. Число осциллограмм СГП ВМК РВ ЭЭС ограничено 20. Следует иметь в виду, что значения мощностей и моментов имеют разрядность в два раза больше, чем остальные каналы, следовательно, их количество должно быть в два раза меньше.

Второе ограничение мягкое и зависит от мощности и размера оперативной памяти сервера. Если число осциллографируемых переменных будет слишком большим, то осциллограммы будут иметь разрывы (пустые области), означающие, что сервер не успел вовремя собрать и обработать все данные, и часть данных оказалась потерянной. Обычно разрывы невелики и не мешают анализу осциллограмм, но если число переменных чрезвычайно большое, то разрывы могут быть значительными – в этом случае нужно уменьшить число осциллографируемых переменных, сведя разрывы к минимуму.

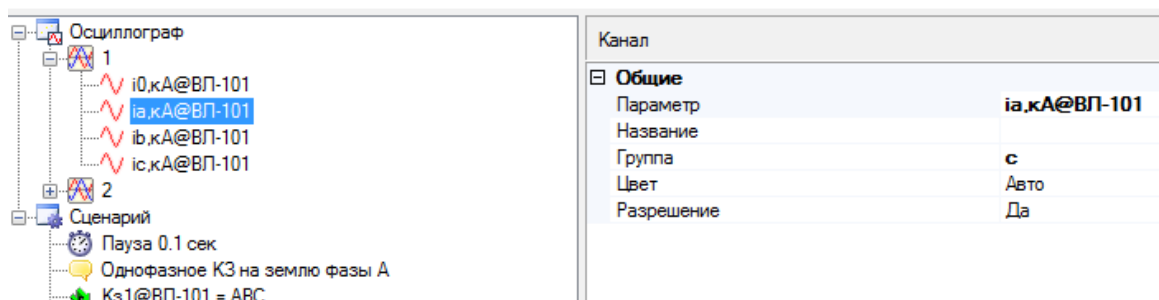


Рис. 2.49. Редактирование сценария динамики в KoskaXmlEditor2010

Осциллографируемые значения имеют атрибуты имени параметра, или переменной режима, группы и цвета. Назначение группы необязательно – в этом случае осциллограмма будет масштабироваться по своему собственному максимуму. Если же по нескольким панелям разнесены несколько взаимно сопоставимых переменных (например, токи или напряжения трех фаз), то их следует отнести к одной группе. В частности, если отображаются три тока и три напряжения, то осциллограммы токов можно приписать к группе I, а осциллограммы напряжений к группе U. Объединение переменных в группу означает, что их осциллограммы будут автомасштабироваться по общему максимуму для всей группы, который определяется наибольшим значением переменной в данной группе. Объединение лучей в группу означает, что эти лучи будут масштабироваться по общему максимуму для всей группы.

3. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

3.1. Лабораторная работа № 1.

Исследование автоматических регуляторов возбуждения

В математических моделях синхронных машин (СМ) в ВМК РВ ЭЭС, реализован регулятор АРВ СДП-1, который содержит каналы управления: по отклонению напряжения, по отклонению частоты, по производной напряжения, по производной тока возбуждения, по производной частоты и соответственно может работать как автоматический регулятор возбуждения пропорционального действия (АРВ ПД) и сильного действия (АРВ СД). Упрощенная блок-схема АРВ, реализованного в ВМК РВ ЭЭС, приведена на рис. 3.1. В данной работе будем использовать только три канала управления: по отклонению напряжения, по производной тока возбуждения, по производной напряжения.

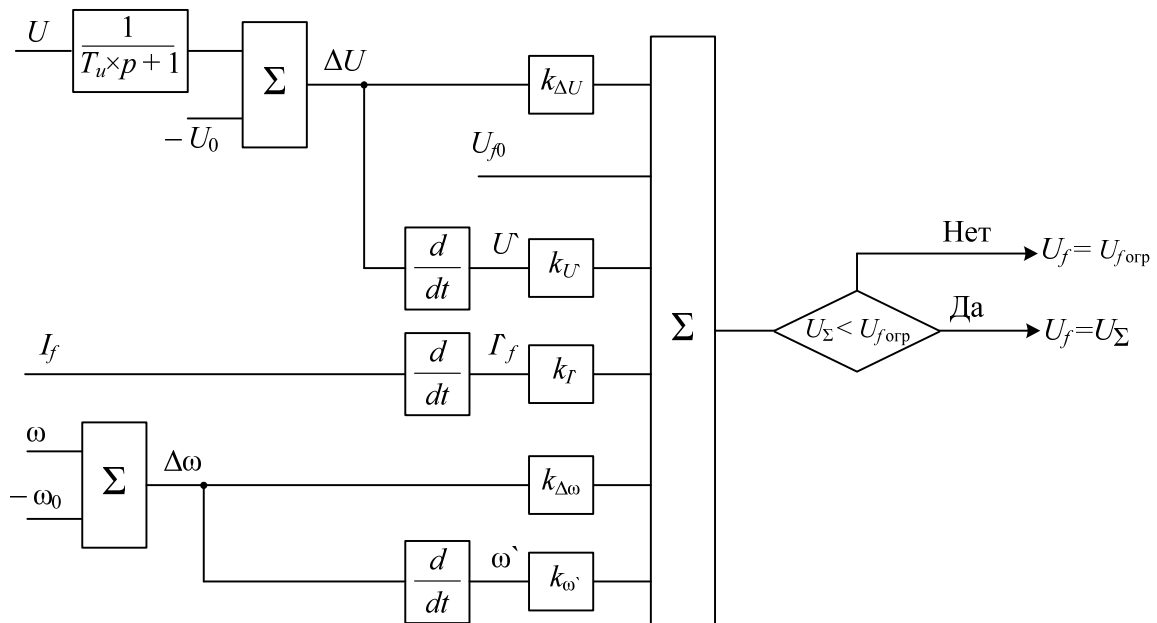


Рис. 3.1. Блок-схема регулятора АРВ СДП-1

3.1.1. Исследование автоматического регулятора возбуждения в квазиустановившемся режиме

Программа работы

1. В исследуемой схеме ЭЭС работают три эквивалентных генератора (ЭГ): Г-2, Г-3, Г-4. Генератор Г-1 является балансирующим узлом или шинами бесконечной мощности (ШБМ). По согласованию с преподавателем

давателем выберите ЭГ, регулятором которого будет осуществляться управление.

2. Создайте сценарий динамики (см. п. 2.3.4). Состав отображаемых сигналов определяется самостоятельно.

3. Начинаться сценарий динамики должен с небольшой паузы (рекомендуется установить не менее 3 с), затем задается коэффициент усиления $k_{\Delta U}$. Остальные коэффициенты: $k_{\Delta \omega}$, $k_{U'}$, $k_{I'}$, $k_{\omega'}$ должны быть установлены равными нулю.

4. Сценарий должен содержать несколько манипуляций с уставкой АРВ ПД (U_0). Отклонения не должны быть большими, рекомендуемый шаг U_0 составляет 0,02...0,03 относительные единицы (о.е.). Очень важно разделять изменения уставки паузами 10...12 с, для того чтобы дать возможность автоматике отработать изменения, а также для наглядности исследования. Заканчиваться сценарий должен также паузой (рекомендуется установить не менее 10...15 с), но перед этим уставки возвращаются в начальное положение: для Г-3 и Г-4 $U_0 = 1,050$; Г-2 – $U_0 = 1,030$. Следует провести несколько подобных экспериментов с различными коэффициентами усиления ($k_{\Delta U} = 30, 40, 50$).

5. Аналогичные эксперименты повторить для каналов по производной напряжения и тока возбуждения (коэффициенты неиспользуемых каналов, кроме канала по отклонению напряжения, обнуляются в начале сценария).

6. После завершения индивидуальных исследований необходимо провести исследования совместной работы всех трех каналов. При этом рекомендуется не завышать коэффициенты усиления и установить их равными $k_{\Delta U} = 50$; $k_{U'} = 3,6$; $k_{\Delta \omega} = 2,6$; $k_{\omega'} = 2,5$; $k_{I'} = 0,4$.

7. Запуск сценариев осуществляется поочередно по согласованию и **с разрешения преподавателя**. При запуске сценария на одном из компьютеров остальные клиентские СПО (VmkClient) блокируются на время выполнения сценария.

8. Получаемые осциллограммы требуется сохранять и рекомендуется их копировать на внешний носитель по окончании занятия для исключения их утраты. После того как осциллограммы скопированы рекомендуется очистить папку Reports в папке Projects, которая в свою очередь расположена в корневой папке проекта.

3.1.2. Исследование автоматического регулятора возбуждения при переходных процессах

Программа работы

1. Генераторы, управление АРВ которых осуществляется, остаются те же, что и в предыдущем задании.

2. Создаются несколько сценариев динамики (см. п. 2.3.4). Состав отображаемых сигналов определяется самостоятельно, однако рекомендуется оставить тот же состав, что и в предыдущем эксперименте.

3. Создается сценарий динамики, имеющий следующую структуру: начальная пауза (рекомендуется установить не менее 0,3 с.), задание коэффициентов усиления (задается коэффициент усиления $k_{\Delta U}$, а остальные коэффициенты: $k_{\Delta \omega}$, $k_{\omega'}$, $k_{U'}$, $k_{I'}$ устанавливаются равными нулю), моделируется внешнее трехфазное короткое замыкание (КЗ), пауза 0,1 с (имитация действия релейной защиты), отключение КЗ, пауза 0,3 с.

4. Делается установка нормального (установившегося) режима работы ЭЭС с помощью кнопки «Установка режима» на главной форме (см. также п. 2.3.3).

5. Эксперимент внешнего КЗ повторяется для двухфазного и однофазного КЗ.

6. Эксперимент внешнего КЗ повторяется для других каналов: по производной напряжения и по производной тока возбуждения. Остальные каналы из работы выводятся. После каждого запуска сценария динамики требуется запуск установившегося режима.

7. После завершения индивидуальных исследований необходимо провести исследования совместной работы всех трех каналов. При этом рекомендуется не завышать коэффициенты усиления и установить их равными $k_{\Delta U} = 50$; $k_{U'} = 3,6$; $k_{\Delta \omega} = 2,6$; $k_{\omega'} = 2,5$; $k_{I'} = 0,4$.

8. Проведенные эксперименты необходимо повторить для внутренних КЗ на выводах генератора.

9. Запуск сценариев осуществляется поочередно по согласованию и **с разрешения преподавателя**. При запуске сценария на одном из компьютеров остальные клиентские СПО (VmkClient) блокируются на время выполнения сценария.

10. Получаемые осциллограммы требуется сохранять и рекомендуется их копировать на внешний носитель по окончании занятия для исключения их утраты. После того как осциллограммы скопированы рекомендуется очистить папку Reports в папке Projects, которая в свою очередь расположена в корневой папке проекта.

Требования к отчету по работе

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Этапы выполнения работы.
4. Результаты исследований с пояснениями.
5. Выводы по работе, в которых должен содержаться детальный анализ полученных результатов и их интерпретация.

Контрольные вопросы

1. Что такое АРВ? Какие типы АРВ существуют и в чем основные различия между ними?
2. Что такое устойчивость электроэнергетической системы?
3. Как АРВ влияет на статическую и динамическую устойчивость?
4. Как взаимосвязаны реактивная мощность и напряжение сети?

3.2. Лабораторная работа № 2.

Исследование механизма управления турбиной

В исследуемой схеме ЭЭС все работающие ЭГ являются турбогенераторами, первичными двигателями которых является соответственно паровая турбина. Скорость вращения турбины регулируется специальной автоматикой – механизмом управления турбиной (МУТ).

Программа работы

1. По согласованию с преподавателем выбирается ЭГ, механизмом первичного двигателя которого будет осуществляться управление.
2. Создайте сценарий динамики (см. п. 2.3.4). Состав отображаемых сигналов определяется самостоятельно.
3. Начинаться сценарий динамики должен с небольшой паузы (рекомендуется установить не менее 3 с).
4. Сценарий должен содержать несколько манипуляций мощностью турбины ($P_{МУТ}$). Отклонения не должны быть большими, рекомендуемый шаг $P_{МУТ}$ составляет 0,05. Очень важно разделять изменения уставки паузами 10...12 с. Заканчиваться сценарий должен также паузой (рекомендуется установить не менее 10...15 с), но перед этим уставки возвращаются в начальное положение: для Г-3 $P_{МУТ} = 0,6$; Г-4 – $P_{МУТ} = 0,72$; Г-2 – $P_{МУТ} = 0,7$.
5. Запуск сценариев осуществляется поочередно по согласованию и *с разрешения преподавателя*. При запуске сценария на одном из компьютеров остальные клиентские СПО (VmkClient) блокируются на время выполнения сценария.

6. Получаемые осциллограммы требуется сохранять и рекомендуется их копировать на внешний носитель по окончании занятия для исключения их утраты. После того как осциллограммы скопированы рекомендуется очистить папку Reports в папке Projects, которая в свою очередь расположена в корневой папке проекта.

Требования к отчету по работе

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Этапы выполнения работы.
4. Результаты исследований с пояснениями.
5. Выводы по работе, в которых должен содержаться детальный анализ полученных результатов и их интерпретация.

Контрольные вопросы

1. Что такое МУТ и каково его основное назначение?
2. Как взаимосвязаны активная мощность и частота сети?
3. Каким образом устроен простейший маятниковый МУТ?

3.3. Лабораторная работа № 3.

Исследование автоматической частотной разгрузки

Основным инструментом для регулирования активной мощности и частоты в ЭЭС является генератор. В аварийных ситуациях при значительном падении частоты (лавина частоты) используется автоматическая частотная разгрузка (АЧР).

Программа работы

1. Создайте сценарий динамики (см. п. 2.3.4).
2. Студентами самостоятельно определяется нагрузка, регулирование которой будет осуществляться. Не следует, однако, выбирать маломощную нагрузку.
3. В осциллограф необходимо включить активные мощности и частоты генераторов, а также мощность регулируемой нагрузки. Возможно добавление других параметров по личной инициативе студента.
4. Основная часть сценария начинается с небольшой паузы (рекомендуется установить не менее 3 с). Затем осуществляется снижение $P_{МУТ}$ на нескольких генераторах. Желательно разгружать машины равномерно. Цель этой разгрузки снизить частоту в ЭЭС.
5. Далее по сценарию после паузы 0,5 с необходимо осуществить сброс части выбранной нагрузки для восстановления частоты. Сброс

делается импульсно (для изменения активной мощности нагрузки требуется изменить проводимость G : повышение данного параметра приведет к увеличению мощности нагрузки, снижение – к сбросу мощности нагрузки).

6. Завершается сценарий динамики паузой 5...7 с.

7. Запуск сценариев осуществляется поочередно по согласованию и с *разрешения преподавателя*. При запуске сценария на одном из компьютеров остальные клиентские СПО (VmkClient) блокируются на время выполнения сценария. Перед этим преподавателем запускается сценарий, в котором ШБМ выведен из работы (параметр ШБМ установлен равным 0 на генераторе «Системы»), а мощность, генерируемая/поглощаемая ШБМ распределена соответствующим образом между генераторами Г-2, Г-3, Г-4. Описанное можно сделать и вручную, однако, это займет больше времени.

8. После выполнения сценария динамики делается установка нормального (установившегося) режима работы ЭЭС с помощью кнопки «Установка режима» на главной форме (см. также п. 2.3.3).

9. Получаемые осциллограммы требуется сохранять и рекомендуется их копировать на внешний носитель по окончании занятия для исключения их утраты. После того как осциллограммы скопированы рекомендуется очистить папку Reports в папке Projects, которая в свою очередь расположена в корневой папке проекта.

Требования к отчету по работе

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Этапы выполнения работы.
4. Результаты исследований с пояснениями.
5. Выводы по работе, в которых должен содержаться детальный анализ полученных результатов и их интерпретация.

Контрольные вопросы

1. Как связаны между собой активная мощность и частота ЭЭС?
2. Что такое АЧР и как она работает?
3. Может ли АЧР использоваться для снижения частоты? Почему?
4. Почему в данном эксперименте для регулирования частоты возникла необходимость отключения ШБМ?

3.4. Лабораторная работа № 4.

Моделирование функционирования релейной защиты и автоматики

В ходе выполнения данной работы планируется исследовать функционирование устройств релейной защиты и автоматики (РЗА): дифференциальная защита (ДЗ), максимальная токовая защита с блокировкой по напряжению (МТЗ БН), автоматика повторного включения (АПВ), автоматика ввода резерва (АВР).

Программа работы

1. По согласованию с преподавателем выбирается защищаемый объект.

2. Создайте два сценария динамики (см. п. 2.3.4). Состав отображаемых сигналов определяется самостоятельно. Состав сигналов должен быть достаточным для того, чтобы понять, что защита сработала правильно. Что касается основной части сценариев, то в ней должно быть смоделировано функционирование ДЗ (первый сценарий) и МТЗ БН (второй сценарий). В каждом из сценариев, помимо действия защит, должна быть смоделирована работа АПВ, причем для одного из сценариев (по выбору) моделируется успешное и неуспешное АПВ.

3. Создайте сценарий динамики (см. п. 2.3.4), в котором моделируется действие АВР. Состав отображаемых сигналов определяется самостоятельно. Для реализации основной части сценария выбирается два объекта (два трансформатора на одной подстанции или две линии питающих одну подстанцию). В сценарии первоначально осуществляется отключение одного из объектов, т. е. вывод его в резерв. Затем моделируется повреждение на другом объекте и отключение его релейной защитой. После этого вводится в работу резервный объект. Данный сценарий является рекомендуемым, однако, возможны и другие варианты, реализация которых также разрешается.

4. Следует помнить при написании сценариев о необходимости ввода временных пауз там где, это нужно. Кроме того, необходимо вводить небольшие паузы (0,3...0,5 с) в начале и в конце сценариев.

5. Запуск сценариев осуществляется поочередно по согласованию и с разрешения преподавателя. При запуске сценария на одном из компьютеров, остальные клиентские СПО (VmkClient) блокируются на время выполнения сценария.

6. Получаемые осциллограммы требуется сохранять и рекомендуется их копировать на внешний носитель по окончании занятия для исключения их утраты. После того как осциллограммы скопированы

рекомендуется очистить папку Reports в папке Projects, которая в свою очередь расположена в корневой папке проекта.

Требования к отчету по работе

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Этапы выполнения работы.
4. Результаты исследований с пояснениями.
5. Выводы по работе, в которых должен содержаться детальный анализ полученных результатов и их интерпретация.

Контрольные вопросы

1. Назовите основные требования к устройствам релейной защиты.
2. На какие два класса по селективности разделяются все устройства релейной защиты?
3. В чем особенность дифференциального принципа функционирования защиты?
4. Для чего требуется АПВ?
5. Для чего требуется АВР?

3.5. Лабораторная работа № 5.

Моделирование процесса самосинхронизации генераторов

Существуют два способа синхронизации генератора: точная и самосинхронизация. Ввиду сложности первого метода, в данной работе осуществляется моделирование второго. Процесс самосинхронизации осуществляется следующим образом: ротор генератора раскручивается турбиной до частоты вращения, близкой к синхронной, а затем без возбуждения включается в сеть, после чего на ротор подается возбуждение.

Программа работы

1. По согласованию с преподавателем выбирается ЭГ, который будет синхронизироваться с ЭЭС.
2. Создайте сценарий динамики (см. п. 2.3.4).
3. На осциллограф необходимо вывести ток и напряжение возбуждения синхронизируемого генератора, его активную и реактивную мощность, частоту, а также аналогичные параметры для других генераторов ЭЭС. Возможен вывод других сигналов на осциллограф по личной инициативе студента.
4. Сценарий начинается с небольшой паузы (рекомендуется установить не менее 3 с). Затем отключается выбранный ЭГ, снимается возбуждение, обнуляется $P_{\text{МУТ}}$ (генератор останавливается).

5. После паузы 5...7 с в сценарии реализуется выполнение самосинхронизации ЭГ. Раскручивание ротора (изменение $P_{\text{МУТ}}$) рекомендуется делать пошагово с интервалом 0.05 о.е. и через время 0.05 с.

6. Заканчиваться сценарий должен паузой 7...10 с.

7. Запуск сценариев осуществляется поочередно по согласованию и с *разрешения преподавателя*. При запуске сценария на одном из компьютеров остальные клиентские СПО (VmkClient) блокируются на время выполнения сценария.

8. Получаемые осциллограммы требуется сохранять и рекомендуется их копировать на внешний носитель по окончании занятия для исключения их утраты. После того как осциллограммы скопированы рекомендуется очистить папку Reports в папке Projects, которая в свою очередь расположена в корневой папке проекта.

Требования к отчету по работе

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Этапы выполнения работы.
4. Результаты исследований с пояснениями.
5. Выводы по работе, в которых должен содержаться детальный анализ полученных результатов и их интерпретация.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение понятию «синхронизация».
2. Назовите условия самосинхронизации. В чем преимущества и недостатки такого метода?
3. Назовите условия точной синхронизации. В чем преимущества и недостатки такого метода?

3.6. Лабораторная работа № 6.

Регулирование реактивной мощности и напряжения в сети

Одним из ключевых объектов регулирования реактивной мощности и напряжения в сети является АРВ генераторов. Кроме того, в этом процессе могут участвовать АРВ синхронных двигателей, а также сетевое оборудование: шунтирующие реакторы, конденсаторные батареи, трансформаторы и автотрансформаторы.

Программа работы

1. С помощью редактора KoskaXmlEditor создается осциллограф (см. п. 2.3.4). На осциллограф выводятся напряжения на шинах всех под-

станций ЭЭС, реактивная мощность генераторов и двигателей, реактивная мощность и ток шунтирующих реакторов, напряжение и реактивная мощность конденсаторных батарей. Лучше всего расположить эти сигналы в разных панелях. Возможно создание нескольких осциллографов.

2. Преподавателем запускается сценарий режима, в котором напряжение в ЭЭС является сниженным или завышенным (можно сделать эти изменения вручную, однако, этот вариант займет больше времени).

3. Преподавателем назначается среди студентов «старший диспетчер» и «начальники электростанций». Остальные студенты по назначению «старшего диспетчера» осуществляют управление сетевым оборудованием ЭЭС. Основная цель – отрегулировать напряжение в сети в пределах $\pm 5\%$ от номинального, используя при этом все доступные средства.

4. Если режим ЭЭС нарушается, то преподаватель вправе заменить «старшего диспетчера» и «начальников электростанций». Затем установившийся режим в ЭЭС переустанавливается и упражнение повторяется снова.

5. Главная задача данной лабораторной работы – это научиться слаженно в команде решать энергетические задачи.

6. Получаемые осциллограммы требуется сохранять и рекомендуется их копировать на внешний носитель по окончании занятия для исключения их утраты. После того как осциллограммы скопированы рекомендуется очистить папку Reports в папке Projects, которая в свою очередь расположена в корневой папке проекта.

Требования к отчету по работе

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Этапы выполнения работы.
4. Результаты исследований с пояснениями.
5. Выводы по работе, в которых должен содержаться детальный анализ полученных результатов и их интерпретация.

Контрольные вопросы:

1. Что такое реактивная мощность?
2. Как связаны между собой реактивная мощность и напряжение?
3. Как влияет на уровень напряжения в сети шунтирующие реакторы, конденсаторные батареи?
4. Как в процессе регулирования реактивной мощности и напряжения могут участвовать силовые трансформаторы (автотрансформаторы)?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном учебном пособии представлена только основная информация, касающаяся описания математических моделей оборудования ЭЭС, а также описание порядка работы с ВМК РВ ЭЭС. Информация о компонентной базе, структуре и реализации данного комплекса подробно представлена в инструкции по эксплуатации.

Уникальные свойства и возможности ВМК РВ ЭЭС обеспечивают возможность его практического использования для решения задач в реальной электроэнергетике, в том числе связанных с развитием и совершенствованием ЭЭС, и для углубленного изучения процессов и свойств ЭЭС в учебной и научно-исследовательской деятельности студентов, аспирантов и докторантов. Особенно актуальным использование ВМК РВ ЭЭС стало в связи появлением задач исследования, проектирования и эксплуатации интеллектуальных энергосистем с активно-адаптивными электрическими сетями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беркович М.А. Основы автоматики энергосистем / М.А. Беркович, В.А. Семенов. – Москва : Энергия, 1968. – 432 с.
2. Беркович М.А. Автоматика энергосистем : учебник для техникумов / М.А. Беркович, В.А. Гладышев, В.А. Семенов. – Москва : Энергия, 1980. – 224 с., ил.
3. Барзам А.Б. Системная автоматика / А.Б. Барзам. – 3-е изд. – Москва : Энергия, 1973. – 392 с.
4. Федосеев А.М. Релейная защита электроэнергетических систем / А.М. Федосеев. – Ленинград : изд-во Ленинградского университета, 1976. – 464 с.
5. Портной М.Г. Управление энергосистемами для обеспечения устойчивости / М.Г. Портной, Р.С. Рабинович. – Москва : Энергия, 1978. – 352 с.
6. Автоматизация энергетических систем / А.Д. Дроздов, А.С. Засыпкин, А.А. Аллилуев и др. – Москва : Энергия, 1977. – 440 с.
7. Казанский В.Е. Автоматизация энергетических систем / В.Е. Казанский, А.П. Кузнецов. – 2-е изд. – Москва : Высшая школа, 1973. – 170 с.
8. Гусев А.С. Исследование и решение проблемы надежности и достоверности средств моделирования электроэнергетических систем / А.С. Гусев, А.А. Суворов, А.О. Сулайманов // Труды VII международной молодежной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи», 19–23 сентября 2016, Казань. – В 3 т. Т. 2. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2016. – С. 182–185.
9. Гуревич Ю.Е. Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах / Ю.Е. Гуревич, Л.Е. Либова, А.А. Окин. – Москва : Энергоатомиздат, 1990. – 390с.
10. Лоханин Е.К. Математическая модель энергосистем для расчета и анализа переходных процессов и устойчивости / Е.К. Лоханин, Г.В. Васильева, Ю.И. Галактионов // Тр. ВНИИЭ. – Москва : Энергия, 1976. – Вып. 51. – С. 3–28.
11. Смоловик С.В. Оценка демпферных свойств математических моделей синхронных машин, используемых при расчетах электромеханических переходных процессов : сб. науч. тр. ЛПИ. / С.В. Смоловик, В.В. Шевяков. – Ленинград : Изд. ЛПИ, 1988. – №427. – С. 45–51.

12. Лоханин Е.К. Упрощение уравнений синхронной машины для расчета и анализа электромеханических переходных процессов и устойчивости сложной энергосистемы / Е.К. Лоханин // *Электричество*. – 2000. – № 4. – С. 18–29.
13. Якутов В.М. Операторные сопротивления ротора турбогенератора и их использование для определения электромагнитных параметров / В.М. Якутов // *Электричество*. – 1992. – № 2. – С. 23–30.
14. Воронин В.К. Экспериментальное исследование высокочастотной системы возбуждения турбогенератора типа ТВВ-165-2 / В.К. Воронин, В.М. Голов, А.В. Пташкин // *Тр. СИБНИИЭ: Переходные процессы и режимы работы электроэнергетических систем*. – Москва : Энергия, 1973. – Вып. 24. – С. 71–78.
15. Гамм Б.З. Влияние точности схемы замещения регулятора возбуждения сильного действия на электромеханические переходные процессы синхронных машин / Б.З. Гамм // *Тр. СИБНИИЭ: Переходные процессы и режимы работы энергетических систем*. – Москва : Энергия, 1973. – Вып. 24. – С. 79–84.
16. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей / И.А. Сыромятников. – Москва : Госэнергоиздат, 1963. – 527 с.
17. Глебов И.А. Системы возбуждения и регулирования синхронных двигателей / И.А. Глебов, С.И. Логинов. – Ленинград : Энергия, 1972. – 113 с.
18. Михневич Г.В. Синтез структуры системы автоматического регулирования возбуждения синхронных машин / Г.В. Михневич. – Москва : Наука, 1964. – 232 с.
19. Плетнев Г.П. Исследования систем автоматического регулирования мощности парогенератора и турбины в режиме регулирования частоты [Текст] / Г.П. Плетнев, В.А. Штробель, В.С. Мухин // *Теплоэнергетика*. – 1972. – № 11. – С. 55–57.
20. Системы регулирования конденсационных турбин большой мощности [Текст] / М.С. Фрагин [и др.] // *Теплоэнергетика*. – 1972. – № 11. – С. 19–25.
21. Белинский С.Я. Энергетические установки электростанций [Текст] / С.Я. Белинский, Ю.М. Липов. – Москва : Энергия, 1974. – 304 с.
22. Стернинсон, Л.Д. Переходные процессы при регулировании частоты и мощности в энергосистемах [Текст] / Л.Д. Стернинсон. – Москва : Энергия, 1975. – 216 с.
23. Иванов, В.А. Регулирование энергоблоков [Текст] / В.А. Иванов. – Ленинград : Машиностроение, 1982. – 311 с.

24. Рабинович Р.С. Модели тепловых электростанций для расчета длительных электромеханических переходных процессов в энергосистемах [Текст] / Р.С. Рабинович, М.А. Полонская // Электричество. – 1983. – № 3. – С. 11–19.
25. Лейтес Л.В. Схемы замещения многообмоточных трансформаторов / Л.В. Лейтес, А.М. Пинцов. – Москва : Энергия, 1974. – 192 с.
26. Постников И.М. Обобщенная теория и переходные процессы электрических машин / И.М. Постников. – Москва : Высш. шк., 1975. – 319 с.
27. Караев Р.И. Переходные процессы в линиях большой протяженности / Р.И. Караев. – Москва : Энергия, 1978. – 191 с.
28. Гуревич Ю.Е. Устойчивость нагрузки электрических систем / Ю.Е. Гуревич, Л.Е. Либова, Э.А. Хачатрян. – Москва : Энергоиздат, 1981. – 208 с.
29. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей / И.А. Сыромятников. – Москва : Госэнергоиздат, 1963. – 527 с.
30. Глебов И.А. Системы возбуждения и регулирования синхронных двигателей / И.А. Глебов, С.И. Логинов. – Ленинград : Энергия, 1972. – 113 с.
31. Маркович И.М. Режимы энергетических систем / И.М. Маркович. – Москва : Энергия, 1969. – 362 с.
32. Гусев А.С. Концепция и средства всережимного моделирования в реальном времени электроэнергетических систем : дис. ... д-р техн. наук : 05.14.02 [Место защиты: Том. политехн. ун-т] / А.С. Гусев. – Томск, 2008. – 315 с.: ил. РГБ ОД, 71 09-5/415.
33. Гусев А.С. Концепция и средства всережимного моделирования в реальном времени электроэнергетических систем / А.С. Гусев // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2008. – № 9-10/1. – С. 164–170.
34. Гусев А.С. Универсальная математическая модель трехфазных линий электропередач / А.С. Гусев, С.В. Свечкарев, И.Л. Плодистый // Вестник алматинского института энергетики и связи. – 2008. – № 2. – С. 23–30.
35. Гусев А.С. Универсальная математическая модель силовых трехфазных трансформаторов и автотрансформаторов / А.С. Гусев, С.В. Свечкарев, И.Л. Плодистый // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 311. – № 4. – С. 77–81.

36. Гусев А.С. Основные аспекты проблемы моделирования электроэнергетических систем, перспективы и средства их решения / А.С. Гусев, С.В. Свечкарев, И.П. Плодистый // Известия вузов. Электромеханика. – 2006. – № 3. – С. 92–95.
37. Гусев А.С. Всережимные математические модели линий электропередачи / А.С. Гусев, С.В. Свечкарев, И.Л. Плодистый // Известия Томского политехнического университета. – Томск : Изд. ТПУ, 2005. – Т. 308. – № 7. – С. 206–211.
38. Гусев А.С. Адаптируемая математическая модель систем возбуждения синхронных машин / А.С. Гусев, С.В. Свечкарев, И.Л. Плодистый // Известия Томского политехнического университета. – Томск : Изд. ТПУ, 2005. – Т. 308. – № 7. – С. 211–216.
39. Гусев А.С. Математическая модель первичных двигателей синхронных генераторов / А.С. Гусев, С.В. Свечкарев, И.Л. Плодистый // Известия Томского политехнического университета. – Томск : Изд-во ТПУ, 2005. – Т. 308. – № 7. – С. 216–222.
40. Гусев А.С. Всережимная математическая модель синхронных машин / А.С. Гусев, С.В. Свечкарев, И.Л. Плодистый // Электрические станции, 2009.
41. Всережимный моделирующий комплекс реального времени электроэнергетических систем / А.С. Гусев, Ю.В. Хрущев, С.В. Гурин и др. // Электричество. – 2009. – №12. – С. 7–9.
42. Модели синхронных и асинхронных электрических машин для все-режимного моделирования электроэнергетических систем / А.С. Гусев, Ю.В. Хрущев, С.В. Гурин и др. // Известия вузов. Электромеханика. – 2009. – № 6. – С. 14–22.
43. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования / под ред. Б.Н. Неклепаева. – Москва : Изд-во НИЦ ЭНАС, 2002. – 152 с.
44. Руководящие указания по релейной защите. Вып.11. Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110–750 кВ. – Москва : Энергия, 1979. – 152 с.
45. Справочник по проектированию электроэнергетических систем / В.В. Ершевич, А.Н. Зейлигер, Г.А. Илларионов и др. ; под ред. С.С. Рокотяна и И.М. Шапиро. – 3-е из., перераб. и доп. – Москва : Энергоатомиздат, 1985. – 352 с.

ПОДГОТОВКА ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ВСЕРЕЖИМНОГО МОДЕЛИРУЮЩЕГО КОМПЛЕКСА РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В данном разделе приведены данные оборудования моделируемой энергосистемы, перечень которых определяется всережимными моделями, а также характером решаемых задач.

Перечень вводимых в модели данных больше, чем перечень имеющихся паспортных данных по оборудованию. Некоторые модельные параметры отсутствуют среди паспортных. В связи с этим необходим расчет недостающих данных.

Параметры, вводимые в модель, являются коэффициентами дифференциальных уравнений, описывающих процессы в основном оборудовании энергосистемы. По этой причине результаты расчета из именованных единиц переводятся в относительные через принятые базовые величины. В некоторых случаях результатами вычислений являются относительные номинальные единицы. В таком случае также осуществляется их пересчет через принятые базовые величины.

А.1. Определение и обоснование данных для электрических машин

Параметры синхронных генераторов (СГ), вводимые в модель, сведены в табл. А.1.1.

Таблица А.1.1

Название	Обозначение
Эквивалентная мощность электрической машины, [о. е.]	S_{Σ}
Коэффициент трансформации блочного трансформатора, [о. е.]	k_T
Постоянная инерции ротора, [с]	T_j
Потери на трение, [%]	P_D
Реактивное сопротивление реакции якоря по оси d , [о. е.]	X_{ad}
Реактивное сопротивление реакции якоря по оси q , [о. е.]	X_{aq}
Реактивное сопротивление рассеяния обмотки статора, [о. е.]	X_{σ}
Активное сопротивление обмотки статора, [о. е.]	R_a
Реактивное сопротивление рассеяния обмотки возбуждения, [о. е.]	$X_{\sigma f}$
Активное сопротивление обмотки возбуждения, [о. е.]	R_f
Реактивное сопротивление рассеяния демпферного контура по оси d , [о. е.]	$X_{\sigma D}$
Активное сопротивление демпферного контура по оси d , [о. е.]	R_D

Окончание табл. А.1.1

Название	Обозначение
Реактивное сопротивление рассеяния демпферного контура по оси q , [о. е.]	$X_{\sigma Q}$
Активное сопротивление демпферного контура по оси q , [о. е.]	R_Q
Параметры собственных нужд:	
• активное сопротивление собственных нужд, [о. е.];	R_{CH}
• реактивное сопротивление собственных нужд, [о. е.]	X_{CH}
Настроечные параметры АРВ:	
• коэффициент усиления по каналу производной напряжения, [о. е.]	$K_{U'}$
Коэффициент усиления по каналу производной тока возбуждения, [о. е.]	$K_{i'}$
Коэффициент усиления по каналу производной угловой скорости, [о. е.]	$K_{\omega'}$
Коэффициент усиления по каналу отклонения напряжения, [о. е.]	$K_{\Delta U}$
Коэффициент усиления по каналу отклонения угловой скорости, [о. е.]	$K_{\Delta \omega}$
Коэффициент статизма по реактивной мощности, [о. е.]	K_{CT}
Уставка по величине напряжения на выводах генератора, [о. е.]	U_0
Ручное управление напряжением, [о. е.]	U_{f0}

В табл. А.1.2 приведены параметры первичного двигателя ГРЭС и ТЭЦ, вводимые в модель.

Таблица А.1.2

Название	Обозначение
Задание мощности турбины с $T_{МУТ} = 0$, [о. е.]	$P_{МУТ}$
Задание мощности турбины с $T_{МУТ}$, [о. е.]	$P_{МУТ} T$
Постоянная времени механизма управления, [с]	$T_{МУТ}$
Уставка регулятора скорости турбины, [о. е.]	F_0
Зона нечувствительности по отклонению угловой скорости, [%]	$\Delta \omega_{НЧ}$
Давление пара перед турбиной, [о. е.]	$D_{ПАР}$
Коэффициент начальной коррекции неравномерности, [о. е.]	$K_{НКН}$
Коэффициент статизма регулятора скорости турбины, [о. е.]	$K_{СТ\omega}$
Задание послеаварийной разгрузки, [о. е.]	$P_{ПА}$
Задание противоаварийной импульсной разгрузки, [о. е.]	$P_{ПАИ}$
Коэффициент усиления по каналу противоаварийной разгрузки, [о. е.]	$K_{ПА}$

В табл. А.1.3 приведены параметры первичного двигателя ГЭС, вводимые в модель:

Таблица А.1.3

Название	Обозначение
Зависимость открытия направляющего аппарата от хода сервомотора, [о. е.]	$a = f(\mu)$
Ограничения на открытие и закрытие окон золотника сервопривода, [о. е.]	$a_{\text{пред}}$
Постоянная времени сервомотора, [с]	T_c
Постоянная времени изодрома, [с]	T_i
Коэффициент гибкой обратной связи, [о. е.]	η
Коэффициент жесткой обратной связи, [о. е.]	ε
Длина водовода для гидротурбины, [м]	L
Напор потока воды в водоводе, [о. е.]	H
Зависимость скорости потока воды в водоводе от напора	$V = f(H)$
Ударная характеристика водовода	ψ

Расчетные выражения для определения указанных параметров принимаются в соответствии с [43]:

$$X_{ad} = X_d - X_{\sigma}, \quad (\text{A.1.1})$$

где X_d , [о. е.] – реактивное синхронное сопротивление статора по оси d .

$$R_f = \frac{1}{T'_d} \cdot \frac{X'_d}{X_d} \cdot \frac{X_{ad}^2}{(X_d - X'_d)}, \quad (\text{A.1.2})$$

где X'_d , [о. е.] – переходное реактивное сопротивление статора по оси d ; T'_d , [с] – переходная постоянная времени.

$$X_{\sigma f} = \frac{(X'_d - X_{\sigma}) \cdot X_{ad}}{(X_d - X'_d)}, \quad (\text{A.1.3})$$

$$X_{\sigma D} = \frac{(X''_d - X_{\sigma})}{(X'_d - X''_d)} \cdot (X'_d - X_{\sigma}), \quad (\text{A.1.4})$$

где X''_d , [о. е.] – сверхпереходное реактивное сопротивление статора по оси d .

$$R_D = \frac{1}{\omega_0 \cdot T''_d} \cdot \frac{X''_d}{X'_d} \cdot \frac{(X'_d - X_{\sigma})^2}{X'_d - X''_d}, \quad (\text{A.1.5})$$

где T''_d , [с] – сверхпереходная постоянная времени.

$$R_{Q1} = \frac{1}{\omega_0 \cdot T'_q} \cdot \frac{X'_q}{X_q} \cdot \frac{X_{aq}^2}{X_q - X'_q}, \quad (\text{A.1.6})$$

где R_{Q1} , [о. е] – активное сопротивление контура замещающего массивный ротор по оси q ; ω_0 – номинальная синхронная частота вращения, $\omega_0 = 314$ рад/с; X_q , [о. е] – реактивное сопротивление статора по оси q ; X'_q , [о. е] – переходное реактивное сопротивление статора по оси q ; X_{aq} , [о. е] – реактивное сопротивление реакции якоря по оси q ; T'_q , [с] – переходная постоянная времени.

$$R_{Q2} = \frac{1}{\omega_0 T''_q} \cdot \frac{X''_q}{X'_q} \cdot \frac{(X'_q - X_\sigma)^2}{X'_q - X''_q}, \quad (\text{A.1.7})$$

где R_{Q2} , [о. е] – активное сопротивление контура замещающего массивный ротор либо массивных полюсников по оси q .

$$X_{Q1} = \frac{(X''_q - X_\sigma)}{(X_q - X''_q)} \cdot X_{aq}, \quad (\text{A.1.8})$$

где X_{Q1} , [о. е] – реактивное сопротивление рассеяния контура, замещающего массивный ротор по оси q ; X''_q , [о. е] – сверхпереходное реактивное сопротивление статора по оси q .

$$X_{Q2} = \frac{(X''_q - X_\sigma)}{(X'_q - X''_q)} \cdot (X'_q - X_\sigma), \quad (\text{A.1.9})$$

где X_{Q2} , [о. е] – реактивное сопротивление рассеяния демпферного контура либо массивных полюсников по оси q .

$$T_{JГ} = \frac{J \cdot \omega_0^2}{S_{НОМ}} = 2,74 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{GD^2 \cdot n_c^2}{S_{НОМ}}, \quad (\text{A.1.10})$$

где $T_{JГ}$, [с] – постоянная времени инерции ротора генератора; J [т · м²] – момент инерции ротора генератора; GD^2 , [кгс · м] – маховый момент; n_c , [об/мин] – частота вращения.

$$T_{JАД} = \frac{J_1 \cdot \omega_1^2 + J_2 \cdot \omega_2^2}{S_{НОМ}} = 2,74 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{GD^2 \cdot n_{c1}^2 + GD^2 \cdot n_{c2}^2}{S_{НОМ}}, \quad (\text{A.1.11})$$

где $T_{JАД}$, [с] – постоянная времени инерции ротора двигателя; J_1, J_2 , [кг · м²] – моменты инерции двигателя и механизма; ω_1, ω_2 , [рад/с] – значения синхронных частот вращения двигателя и механизма; n_{c1}, n_{c2} , [об/мин] – синхронные частоты вращения двигателя и механизма.

Расчет параметров эквивалентных СГ выполняют с учетом их дальнейшего приведения к стороне высокого напряжения (220 кВ), что также предполагает учет параметров блочных трансформаторов (БТ) и автотрансформаторов связи (АТ), через которые осуществляется связь СГ с шинами 220 кВ.

Расчет параметров БТ и АТ осуществляется по следующим формулам [43]:

$$R_T = \frac{\Delta P \cdot 10^{-3}}{S_H}, \quad (\text{A.1.12})$$

где R_T , [о. е.] – активное суммарное сопротивление обмоток трансформатора; ΔP , [кВт] – потери короткого замыкания; S_H , [МВА] – номинальная мощность трансформатора.

$$X_T = \frac{U_{к.з}}{100}, \quad (\text{A.1.13})$$

где X_T , [о. е.] – реактивное суммарное сопротивление обмоток трансформатора; $U_{к.з}$, [%] – напряжение короткого замыкания.

Учет параметров эквивалентных БТ и АТ осуществляется добавлением их параметров к параметрам соответствующего генератора.

Собственные нужды задаются в соответствии с характеристиками станции и определены следующим образом: $P_{CH} = 0,02 \cdot P_H$ и $\cos \varphi_{CH} = 0,75$.

По мощностям считаются сопротивления:

$$R_{CH} = \frac{P_{CH}}{I_{CH, \max}^2}, \quad (\text{A.1.14})$$

$$X_{CH} = \frac{U_{CH}^2}{Q_{CH}}. \quad (\text{A.1.15})$$

В математических моделях асинхронных двигателей (АД) задаются параметры, представленные в табл. А.1.4.

Таблица А.1.4

Название	Обозначение
Эквивалентная мощность электрической машины, [о. е.]	S_{Σ}
Коэффициент, учитывающий различие напряжения АД и напряжения шин подключения, [о. е.]	k_T
Постоянная инерции ротора, [с]	T_j
Потери на трение, [%]	P_D
Реактивное сопротивление реакции якоря по оси d , [о. е.]	X_{ad}
Реактивное сопротивление реакции якоря по оси q , [о. е.]	X_{aq}
Реактивное сопротивление рассеяния обмотки статора, [о. е.]	X_{σ}
Активное сопротивление обмотки статора, [о. е.]	R_a
Реактивное сопротивление рассеяния обмотки возбуждения, [о. е.]	$X_{\sigma f}$
Активное сопротивление обмотки возбуждения, [о. е.]	R_f
Реактивное сопротивление рассеяния демпферного контура по оси d , [о. е.]	$X_{\sigma D}$

Название	Обозначение
Активное сопротивление демпферного контура по оси d , [о. е.]	R_D
Реактивное сопротивление рассеяния демпферного контура по оси q , [о. е.]	$X_{\sigma Q}$
Активное сопротивление демпферного контура по оси q , [о. е.]	R_Q
Параметры собственных нужд:	
• активное сопротивление собственных нужд, [о. е.]	R_{CH}
• реактивное сопротивление собственных нужд, [о. е.]	X_{CH}
Параметры нагрузки	
• независимый от частоты момент нагрузки, [о. е.]	α
• зависимый от частоты момент нагрузки, [о. е.]	β
Степень зависимости момента нагрузки от частоты	n

Момент сопротивления нагрузки АД определяется по формуле:

$$M_c = \alpha + \beta \cdot \omega^n, \quad (\text{A.1.16})$$

$$\alpha = m_{ct} \cdot K_3 \cdot \cos \varphi, \quad (\text{A.1.17})$$

где m_{ct} , [о. е.] – статический момент нагрузки; K_3 , [о. е.] – коэффициент загрузки двигателя.

$$\beta = (1 - m_{ct}) \cdot K_3 \cdot \cos \varphi. \quad (\text{A.1.18})$$

Расчет параметров АД, в виду отсутствия данных, производится для наиболее распространенных типов АД. Параметры нагрузки $\alpha = \beta = 0,5$, $n = 2$ в виду отсутствия точных данных принимаются для наиболее распространенных случаев.

Расчет остальных параметров, при отсутствии паспортных данных согласно [43] в относительных номинальных единицах выполняется по формулам:

$$R_a = \frac{s_{НОМ}}{100}, \quad (\text{A.1.19})$$

где $s_{НОМ}$, [%] – номинальное скольжение электродвигателя.

$$C_I = \sqrt{\frac{(1 - s_{НОМ}) \cdot I_{II}}{2 \cdot b_{НОМ} \cdot \cos \varphi_{НОМ}}}, \quad (\text{A.1.20})$$

где C_I , [о. е.] – промежуточный коэффициент; I_{II} , [о. е.] – пусковой ток электродвигателя; $b_{НОМ}$, [о. е.] – кратность максимального момента по отношению к номинальному моменту электродвигателя.

$$X_{ad} = X_{aq} = \frac{1}{C_I \left(\sin \varphi_{НОМ} - \frac{\cos \varphi_{НОМ}}{b_{НОМ} + \sqrt{b_{НОМ}^2 - 1}} \right)}, \quad (\text{A.1.21})$$

$$X_{\sigma} = (C_I - 1) \cdot X_{ad}, \quad (\text{A.1.22})$$

$$T_J = \frac{J \cdot \omega_0^2 + Jm \cdot \omega_m^2}{S_{\text{НОМ}}}, \quad (\text{A.1.23})$$

где Jm , [кг · м²] – момент инерции механизма нагрузки; ω_m , [рад/с] – частота вращения механизма нагрузки.

Остальные параметры рассчитывают по формулам, приведенным ранее для СГ.

В случае представления СГ или АД эквивалентной машиной все параметры приводят к одному базису.

Данные необходимые для расчета параметров модели СГ сведены в табл. А.1.5.

Таблица А.1.5

Название	Обозначение
Номинальная полная мощность, [МВА]	$S_{\text{НОМ}}$
Номинальная активная мощность, [МВт]	$P_{\text{НОМ}}$
Коэффициент мощности, [о. е.]	$\cos \varphi$
Номинальный ток, [кА]	$I_{\text{НОМ}}$
Номинальное напряжение, [кВ]	$U_{\text{НОМ}}$
Полное номинальное сопротивление, [Ом]	$Z_{\text{НОМ}}$
Реактивное сопротивление статора по оси d , [о. е.]	X_d
Переходное реактивное сопротивление статора по оси d , [о. е.]	X'_d
Сверхпереходное реактивное сопротивление статора по оси d , [о. е.]	X''_d
Реактивное сопротивление статора по оси q , [о. е.]	X_q
Переходное реактивное сопротивление статора по оси q , [о. е.]	X'_q
Сверхпереходное реактивное сопротивление статора по оси q , [о. е.]	X''_q
Сопротивление рассеяния демпферного контура, [о. е.]	X_σ
Переходная постоянная времени, [с]	T'_d
Сверхпереходная постоянная времени, [с]	T''_d
Момент инерции ротора генератора, [т · м ²]	J
Постоянная времени инерции ротора, [с]	T_J
Номинальная синхронная частота вращения, [рад/с]	ω_0
Ток возбуждения при холостом ходе, [кА]	$I_{f \text{ х. х}}$
Номинальный ток возбуждения, [кА]	I_f
Номинальное напряжение возбуждения, [кВ]	U_f

Данные, необходимые для расчета параметров модели АД, сведены в табл. А.1.6.

Таблица А.1.6

Название	Обозначение
Номинальная полная мощность, [МВА]	$S_{НОМ}$
Номинальная активная мощность, [МВт]	$P_{НОМ}$
Коэффициент мощности, [о. е.]	$\cos \varphi$
Номинальное напряжение, [кВ]	$U_{НОМ}$
Скольжение, [%]	s
КПД, [%]	η
Частота вращения, [об/мин]	n
Реактивное сопротивление реакции якоря по оси d , [о. е.]	X_{ad}
Реактивное сопротивление статора по оси d , [о. е.]	X_d
Переходное реактивное сопротивление статора по оси d , [о. е.]	X'_d
Реактивное сопротивление реакции якоря по оси q , [о. е.]	X_{aq}
Реактивное сопротивление статора по оси q , [о. е.]	X_q
Переходное реактивное сопротивление статора по оси q , [о. е.]	X'_q
Сопротивление рассеяния демпферного контура, [о. е.]	X_{σ}
Переходная постоянная времени, [с]	T'_d
Момент инерции ротора генератора, [т · м ²]	J
Постоянная времени инерции ротора, [с]	T_J
Номинальная синхронная частота вращения, [рад/с]	ω_0
Ток возбуждения при холостом ходе, [кА]	$I_{f.x.x}$
Номинальный ток возбуждения, [кА]	I_f
Номинальное напряжение возбуждения, [кВ]	U_f

А.2. Определение и обоснование данных для трансформаторов

В соответствии с математической моделью многообмоточного трехфазного трансформатора вводимыми в данную модель являются: активные и реактивные сопротивления сторон высокого ($R_{ВН}$, $X_{ВН}$), среднего ($R_{СН}$, $X_{СН}$) и низкого ($R_{НН}$, $X_{НН}$) напряжений, а также сопротивление цепи намагничивания (Z_{μ}).

Расчетные выражения для определения указанных параметров принимаются в соответствии с руководящими указаниями [43].

Реактивные сопротивления обмоток трансформатора:

$$X_{ВН*} = 0,005 \cdot (U_{кВ-Н} + U_{кВ-С} - U_{кС-Н}), \text{ [о. е.];} \quad (\text{A.2.1})$$

$$X_{СН*} = 0,005 \cdot (U_{кВ-С} + U_{кС-Н} - U_{кВ-Н}), \text{ [о. е.];} \quad (\text{A.2.2})$$

$$X_{НН*} = 0,005 \cdot (U_{кВ-Н} + U_{кС-Н} - U_{кВ-С}), \text{ [о. е.],} \quad (\text{A.2.3})$$

где $U_{кВ-Н}$, $U_{кС-Н}$, $U_{кВ-С}$ – напряжения короткого замыкания соответствующих пар обмоток, [%].

Активные сопротивления обмоток трансформатора:

$$R_{ВН*} = \frac{0,5 \cdot 10^{-3}}{S_{НОМ}} \cdot (\Delta P_{кВ-Н} + \Delta P_{кВ-С} - \Delta P_{кС-Н}), \text{ [о. е.]}; \quad (\text{A.2.4})$$

$$R_{СН*} = \frac{0,5 \cdot 10^{-3}}{S_{НОМ}} \cdot (\Delta P_{кВ-С} + \Delta P_{кС-Н} - \Delta P_{кВ-Н}), \text{ [о. е.]}; \quad (\text{A.2.5})$$

$$R_{НН*} = \frac{0,5 \cdot 10^{-3}}{S_{НОМ}} \cdot (\Delta P_{кВ-Н} + \Delta P_{кС-Н} - \Delta P_{кВ-С}), \text{ [о. е.]}, \quad (\text{A.2.6})$$

где $\Delta P_{кВ-Н}$, $\Delta P_{кС-Н}$, $\Delta P_{кВ-С}$ – потери короткого замыкания соответствующих пар обмоток, [кВт]; $S_{НОМ}$ – номинальная мощность трансформатора, [МВА].

Если для трехобмоточного трансформатора или автотрансформатора, имеющего обмотку низшего напряжения, известно только значение ΔP_k для какой-либо одной пары обмоток, то допустимо по формуле (A.2.7) определить суммарное активное сопротивление соответствующей пары обмоток, найти отношение X/R этих обмоток и принять для всех обмоток отношение X/R одинаковым:

$$R_* = \frac{\Delta P_k \cdot 10^{-3}}{S_{НОМ}}, \text{ [о. е.]}. \quad (\text{A.2.7})$$

Сопротивление цепи намагничивания согласно [44]:

$$Z_\mu \approx Z_{x.x} = \frac{U_{x.x}}{I_{x.x}}. \quad (\text{A.2.8})$$

С учетом стандартного перечня доступных данных имеем:

$$Z_\mu = \frac{\Delta S_{x.x} / I_{x.x}}{I_{x.x}} = \frac{\sqrt{\Delta P_{x.x}^2 + \Delta Q_{x.x}^2}}{I_{x.x}^2} = \frac{\sqrt{\Delta P_{x.x}^2 + \Delta Q_{x.x}^2}}{\left(i_{x.x, \%} \cdot I_H / 100 \right)} = \frac{\sqrt{\Delta P_{x.x}^2 + \Delta Q_{x.x}^2}}{\left(\frac{i_{x.x, \%}}{100} \cdot \frac{S_{НОМ}}{U_{НОМ}} \right)^2}, \quad (\text{A.2.9})$$

где $\Delta P_{x.x}$, [кВт] – активные потери холостого хода; $\Delta Q_{x.x}$, [кВАр] – реактивные потери холостого хода; $i_{x.x, \%}$ [%] – ток холостого хода; I_H , [А] – номинальный ток обмотки высшего напряжения трансформатора; $U_{НОМ}$, [кВ] – номинальное напряжение обмотки трансформатора.

Данные, необходимые для расчета параметров силовых трансформаторов (СТ), сведены в табл. А.2.1.

Таблица А.2.1

Название	Обозначение
Номинальная мощность, [МВА]	$S_{НОМ}$
Номинальные напряжения, [кВ]	$U_{НОМ ВН}, U_{НОМ СН}, U_{НОМ НН}$
Коэффициенты трансформации пар обмоток, [о. е.]	$K_{Т В-Н}, K_{Т В-С}, K_{Т С-Н}$

Окончание табл. А.2.1

Название	Обозначение
Напряжения короткого замыкания, [%]	$U_{кВ-Н}, U_{кС-Н}, U_{кВ-С}$
Потери короткого замыкания, [кВт]	$\Delta P_{кВ-Н}, \Delta P_{кС-Н}, \Delta P_{кВ-С}$
Ток холостого хода, [%]	$I_{х.х}$
Активные потери холостого хода, [кВт]	$\Delta P_{х.х}$
Реактивные потери холостого хода, [кВАр]	$\Delta Q_{х.х}$

Параметры, вводимые в модель СТ, сведены в табл. А.2.2.

Таблица А.2.2

Название	Обозначение
Реактивные сопротивления обмоток, [о. е.]	$X_{ВН*}, X_{СН*}, X_{НН*}$
Активные сопротивления обмоток, [о. е.]	$R_{ВН*}, R_{СН*}, R_{НН*}$
Коэффициент трансформации, [о. е.]	K_T
Полное сопротивление цепи намагничивания, [о. е.]	Z_μ

Для учета кривой намагничивания трансформатора в модели предусмотрена возможность задания в СГП ее с помощью функции или табличного описания в виде зависимости сопротивления магнитной цепи Z_μ от тока намагничивания I_μ .

А.3. Определение и обоснование данных для линий электропередачи

В соответствии с математической моделью линии электропередачи вводимыми в данную модель являются параметры: активное и реактивное сопротивления линии (R_1 и X_1), активное и реактивное сопротивления нулевой последовательности (R_0 и X_0). Емкостная проводимость B является фиксированной величиной, задаваемой для данных марки провода и длины линии.

Для тех линий, для которых согласно топологии моделируемой сети это целесообразно, вводятся параметры взаимной индукции (R_m, X_m).

Расчет указанных параметров осуществляется в соответствии с [45].

Активное сопротивление трехфазной линии:

$$R_1 = r_0 \cdot L, \text{ [Ом]}, \quad (\text{А.3.1})$$

где r_0 , [Ом/км] – погонное активное сопротивление линии; L , [км] – длина линии.

Реактивное сопротивление трехфазной линии:

$$X_1 = x_0 \cdot L, \text{ [Ом]}, \quad (\text{А.3.2})$$

где x_0 , [Ом/км] – погонное реактивное сопротивление линии.

Активное сопротивление нулевой последовательности для трехфазной линии с грозозащитным тросом [45]:

$$R_0 = \left((r_0 + r_3) - \frac{r_3^2}{(K_{ТР} \cdot r_T + r_3)} \right) \cdot L, \text{ [Ом]}, \quad (\text{А.3.3})$$

где r_T , [Ом/км] – погонное активное сопротивление грозозащитного троса; r_3 , [Ом/км] – погонное активное сопротивление земли; $K_{тр}$ – коэффициент, учитывающий количество тросов, может быть равен 3 для линии с одним тросом, либо 1,5 – для линии с двумя тросами.

Реактивное сопротивление нулевой последовательности для трехфазной линии [45]:

$$X_0 = X_1 \cdot \left(\frac{X_0}{X} \right), \text{ [Ом]}, \quad (\text{A.3.4})$$

где $\left(\frac{X_0}{X} \right)$ – среднее соотношение между реактивными сопротивлениями нулевой и прямой последовательностей.

Емкостная проводимость трехфазной линии [45]:

$$B = b_0 \cdot L, \text{ [См]}, \quad (\text{A.3.5})$$

где b_0 , [См] – погонная емкостная проводимость линии.

Активная проводимость линии на данном этапе работы принята 1,5 % от активного сопротивления прямой последовательности линии. При необходимости и наличии соответствующих исходных данных величина G может быть уточнена по формуле из [45]:

$$G = g_0 \cdot L = \frac{\Delta P_{\text{КОР}}}{U_{\text{НОМ}}^2}, \text{ [См]}, \quad (\text{A.3.6})$$

где $\Delta P_{\text{КОР}}$, [кВт/км] – потери на корону, зависящие от погоды и принимаемые максимальными или среднегодовыми; $U_{\text{НОМ}}$, [кВ] – номинальное напряжение линии.

Из емкостной проводимости определяется емкость прямой последовательности [44]:

$$C_1 = \frac{B}{2 \cdot \pi \cdot f}, \text{ [Ф]}, \quad (\text{A.3.7})$$

Линии на участках с взаимной индукцией расположены на двухцепных опорах с одним или двумя тросами. Соответственно обобщенная формула для расчета полного сопротивления взаимной индукции согласно [44] имеет следующий вид:

$$Z_{01-2}^{(T)} = \left(Z_{01-2} - \frac{Z_{01T} \cdot Z_{02T}}{Z_{0TT}} \right) \cdot L, \text{ [Ом]}, \quad (\text{A.3.8})$$

где $Z_{01-2}^{(T)}$, [Ом/км] – взаимное сопротивление линий 1 и 2; Z_{01-2} , [Ом/км] – сопротивление взаимной индукции между линиями 1 и 2 в схеме нулевой последовательности; Z_{01T} , [Ом/км] – сопротивление взаимной индукции нулевой последовательности между линией 1 и тросом 1; Z_{02T} , [Ом/км] – сопротивление взаимной индукции нулевой последовательности между линией 2 и тросом 2; Z_{0TT} , [Ом/км] – эквивалентное сопротивление системы из двух тросов.

$$Z_{0\ 1T} = r_3 + j0,435 \cdot \lg\left(\frac{D_3}{D_{\text{ПТЭ}}}\right), \text{ [Ом/км]}, \quad (\text{A.3.9})$$

где D_3 , [м] – эквивалентная глубина расположения обратного провода;
 $D_{\text{ПТЭ}}$, [м] – среднее геометрическое расстояние между тросом 1 и проводами линии 1.

$$Z_{0\ 2T} = r_3 + j0,435 \cdot \lg\left(\frac{D_3}{D'_{\text{ПТЭ}}}\right), \text{ [Ом/км]}, \quad (\text{A.3.10})$$

где $D'_{\text{ПТЭ}}$, [м] – среднее геометрическое расстояние между тросом 2 и проводами линии 2.

$$Z_{0\ \text{ТТ}} = K_{\text{ТР}} \cdot r_{\text{T}} + r_3 + j0,435 \cdot \lg\left(\frac{D_3}{\sqrt{\rho_{\text{ЭТ}} \cdot D_{\text{T}}}}\right), \text{ [Ом/км]}, \quad (\text{A.3.11})$$

где $\rho_{\text{ЭТ}}$, [м] – эквивалентный радиус троса; D_{T} , [м] – среднее геометрическое расстояние между тросами 1 и 2.

$$Z_{0\ 1-2} = r_3 + j0,435 \cdot \lg\left(\frac{D_3}{D_{1-2}}\right), \text{ [Ом/км]}, \quad (\text{A.3.12})$$

где D_{1-2} – среднее геометрическое расстояние между фазами линий 1 и 2.

Ввиду отсутствия детальной информации согласно [44] принято $D_3 = 1000$ м. Расчетные выражения для других параметров имеют следующий вид:

$$D_{\text{ПТЭ}} = \sqrt[6]{D_{A\text{T}} \cdot D_{B\text{T}} \cdot D_{C\text{T}} \cdot D_{A\text{T}'} \cdot D_{B\text{T}'} \cdot D_{C\text{T}'}} \text{, [м]}, \quad (\text{A.3.13})$$

где $D_{A\text{T}}$, [м] – среднее геометрическое расстояние между фазой *A* линии 1 и тросом 1; $D_{B\text{T}}$, [м] – среднее геометрическое расстояние между фазой *B* линии 1 и тросом 1; $D_{C\text{T}}$, [м] – среднее геометрическое расстояние между фазой *C* линии 1 и тросом 1; $D_{A\text{T}'}$, [м] – среднее геометрическое расстояние между фазой *A* линии 1 и тросом 2; $D_{B\text{T}'}$, [м] – среднее геометрическое расстояние между фазой *B* линии 1 и тросом 2; $D_{C\text{T}'}$, [м] – среднее геометрическое расстояние между фазой *C* линии 1 и тросом 2.

$$D'_{\text{ПТЭ}} = \sqrt[6]{D_{a\text{T}} \cdot D_{b\text{T}} \cdot D_{c\text{T}} \cdot D_{a\text{T}'} \cdot D_{b\text{T}'} \cdot D_{c\text{T}'}} \text{, [м]}, \quad (\text{A.3.14})$$

где $D_{a\text{T}}$, [м] – среднее геометрическое расстояние между фазой *A* линии 2 и тросом 1; $D_{b\text{T}}$, [м] – среднее геометрическое расстояние между фазой *B* линии 2 и тросом 1; $D_{c\text{T}}$, [м] – среднее геометрическое расстояние между фазой *C* линии 2 и тросом 1; $D_{a\text{T}'}$, [м] – среднее геометрическое расстояние между фазой *A* линии 2 и тросом 2; $D_{b\text{T}'}$, [м] – среднее геометрическое расстояние между фазой *B* линии 2 и тросом 2; $D_{c\text{T}'}$, [м] – среднее геометрическое расстояние между фазой *C* линии 2 и тросом 2.

$$\rho_{ЭГ} = 0,9 \cdot \rho_T, \quad (\text{A.3.15})$$

где $\rho_T, [\text{м}]$ – истинный радиус троса;

$$D_{1-2} = \sqrt[9]{D_{Aa} \cdot D_{Ab} \cdot D_{Ac} \cdot D_{Ba} \cdot D_{Bb} \cdot D_{Bc} \cdot D_{Ca} \cdot D_{Cb} \cdot D_{Cc}}, [\text{м}], \quad (\text{A.3.16})$$

где $D_{Aa}, [\text{м}]$ – среднее геометрическое расстояние между фазой A линии 1 и фазой A линии 2; $D_{Ab}, [\text{м}]$ – среднее геометрическое расстояние между фазой A линии 1 и фазой B линии 2; $D_{Ac}, [\text{м}]$ – среднее геометрическое расстояние между фазой A линии 1 и фазой C линии 2; $D_{Ba}, [\text{м}]$ – среднее геометрическое расстояние между фазой B линии 1 и фазой A линии 2; $D_{Bb}, [\text{м}]$ – среднее геометрическое расстояние между фазой B линии 1 и фазой B линии 2; $D_{Bc}, [\text{м}]$ – среднее геометрическое расстояние между фазой B линии 1 и фазой C линии 2; $D_{Ca}, [\text{м}]$ – среднее геометрическое расстояние между фазой C линии 1 и фазой A линии 2; $D_{Cb}, [\text{м}]$ – среднее геометрическое расстояние между фазой C линии 1 и фазой B линии 2; $D_{Cc}, [\text{м}]$ – среднее геометрическое расстояние между фазой C линии 1 и фазой C линии 2.

Таким образом, данные необходимые для расчета модельных параметров линии сведены в табл. А.3.1.

Таблица А.3.1

Название	Обозначение
Номинальные напряжения, [кВ]	$U_{\text{НОМ}}$
Длина линии, [км]	L
Погонное активное сопротивление линии, [Ом/км]	r_0
Погонное реактивное сопротивление линии, [Ом/км]	x_0
Погонная емкостная проводимость линии, [См/км]	b_0
Погонное активное сопротивление грозозащитного троса, [Ом/км]	r_T
Погонное активное сопротивление земли, [Ом/км]	r_3
Среднее соотношение между реактивными сопротивлениями нулевой и прямой последовательностей	$X_0/X_1 \quad X_0/X_1$
Эквивалентная глубина расположения обратного провода, [м]	D_3
Геометрические расстояния между тросами и проводами линий, [м]	$D_{AT}, D_{BT}, D_{CT}, D_{AT'},$ $D_{BT'}, D_{CT'}, D_{aT}, D_{bT},$ $D_{cT}, D_{aT'}, D_{bT'}, D_{cT'}$
Радиус троса, [м]	ρ_T
Геометрические расстояния между фазами линий, [м]	$D_{Aa}, D_{Ab}, D_{Ac}, D_{Ba}, D_{Bb},$ $D_{Bc}, D_{Ca}, D_{Cb}, D_{Cc}$

Параметры, вводимые в модель, сведены в табл. А.3.2:

Таблица А.3.2

Название	Обозначение
Реактивное сопротивление прямой последовательности линии, [о. е.]	X_{1*}
Активное сопротивление прямой последовательности линии, [о. е.]	R_{1*}
Реактивное сопротивление нулевой последовательности линии, [о. е.]	X_{0*}
Активное сопротивление нулевой последовательности линии, [о. е.]	R_{0*}
Емкостная проводимость линии, [о. е.]	$B_*/2$
Активная проводимость, [о. е.]	$G_*/2$
Активное сопротивление взаимоиנדукции, [о. е.]	R_{m*}
Реактивное сопротивление взаимоиנדукции, [о. е.]	X_{m*}

А.4. Определение и обоснование данных для реакторов

Все реакторы имеют трехфазное исполнение. Токоограничивающие реакторы учтены путем добавления их сопротивлений к сопротивлениям трансформаторов.

Параметрами реактора, вводимыми в модель, являются активные сопротивления фаз реактора (R_A, R_B, R_C), реактивные сопротивления фаз реактора (X_A, X_B, X_C).

Активное сопротивление фаз реактора [43]:

$$R = \frac{\Delta P_K}{I_{НОМ}^2}, [\text{Ом}]. \quad (\text{А.4.1})$$

Реактивное сопротивление фаз реактора [40]:

$$X = \frac{U_K \cdot U_{НОМ}}{100 \cdot \sqrt{3} \cdot I_{НОМ}}, [\text{Ом}], \quad (\text{А.4.2})$$

где $U_{НОМ}$, [В] – номинальное линейное напряжение реактора; U_K , [%] – падение напряжения в реакторе; $I_{НОМ}$, [А] – номинальный ток реактора.

Для шунтирующих реакторов $U_K = 100\%$, для токоограничивающих реакторов $U_K = X_p, \%$.

Данные для расчета параметров шунтирующего реактора сведены в табл. А.4.1.

Таблица А.4.1

Название	Обозначение
Номинальное напряжение, [кВ]	$U_{НОМ}$
Номинальный ток, [А]	$I_{НОМ}$
Потери мощности, [кВт]	ΔP

Данные для расчета параметров токоограничивающего реактора сведены в табл. А.4.2.

Таблица А.4.2

Название	Обозначение
Номинальное напряжение, [кВ]	$U_{НОМ}$
Номинальный ток, [А]	$I_{НОМ}$
Реактивное сопротивление реактора, [Ом]	X_R

Параметры, вводимые в модель, сведены в табл. А.4.3.

Таблица А.4.3

Название	Обозначение
Активные сопротивления фаз реактора, [о. е.]	R_{A*}, R_{B*}, R_{C*}
Реактивные сопротивления фаз реактора, [о. е.]	X_{A*}, X_{B*}, X_{C*}

Для учета кривой намагничивания (регулирующей характеристики) управляемого шунтирующего реактора в модели предусмотрена возможность задания в СГП ее формы с помощью функции или табличного описания.

А.5. Определение и обоснование данных для конденсаторных батарей

Параметрами конденсаторных батарей, вводимыми в модель, являются фазные емкости (C_A, C_B, C_C).

По мощности конденсаторной батареи и напряжению производится расчет емкостных реактивных сопротивлений согласно [45]:

$$X_A = X_B = X_C = \frac{U^2}{Q}, \text{ [Ом]}. \quad (\text{A.5.1})$$

Фазные емкости конденсаторной батареи рассчитываются:

$$C_{A, B, C} = \frac{1}{2\pi f \cdot X_{A, B, C}}, \text{ [Ф]}. \quad (\text{A.5.2})$$

Данные для расчета параметров конденсаторной батареи сведены в табл. А.5.1.

Таблица А.5.1

Название	Обозначение
Напряжение на шинах, [кВ]	U
Реактивная мощность конденсаторной батареи, [МВАр]	Q

Параметры, вводимые в модель, сведены в табл. А.5.2.

Таблица А.5.2

Название	Обозначение
Емкости фаз конденсаторной батареи, [мкФ]	C_A, C_B, C_C

А.6. Определение и обоснование данных для обобщенных нагрузок

В соответствии с математической моделью обобщенной нагрузки параметрами, вводимыми в данную модель, являются активные сопротивления фаз нагрузки (R_A, R_B, R_C), реактивные сопротивления фаз нагрузки (X_A, X_B, X_C), а также активные проводимости фаз нагрузки (G_A, G_B, G_C).

Активная проводимость нагрузки:

$$G = \frac{P}{U^2}, [\text{См}]. \quad (\text{А.6.1})$$

Реактивное сопротивление нагрузки:

$$X = \frac{U^2}{Q}, [\text{Ом}]. \quad (\text{А.6.2})$$

Нагрузка принимается симметричной, т. е. сопротивление, рассчитанное по формуле (А.6.1) и проводимость по (А.6.2), разделяются равномерно на три фазы.

В модели обобщенной нагрузки есть возможность независимо управлять её активной и реактивной мощностью. Управление активной мощностью нагрузки осуществляется с помощью активных проводимостей. Управление реактивной мощности реализуется активно-индуктивной цепью. Диапазон регулирования активного сопротивления в этой цепи намного меньше, чем диапазон регулирования реактивного. При отсутствии точных данных по нагрузкам активной частью данной цепи можно пренебречь, т. е. сопротивления (R_A, R_B, R_C) задаем минимальными.

Данные, необходимые для расчета параметров обобщенных нагрузок, сведены в табл. А.6.1.

Таблица А.6.1

Название	Обозначение
Напряжение на шинах, [кВ]	U
Активная мощность нагрузки, [МВт]	P
Реактивная мощность нагрузки, [МВАр]	Q

Параметры, вводимые в модель, сведены в табл. А.6.2:

Таблица А.6.2

Название	Обозначение
Активные сопротивления фаз нагрузки, [о. е.]	R_{A*}, R_{B*}, R_{C*}
Реактивные сопротивления фаз нагрузки, [о. е.]	X_{A*}, X_{B*}, X_{C*}
Активные проводимости фаз нагрузки, [о. е.]	G_A, G_B, G_C

А.7. Определение и обоснование данных для элементов режима нейтрали

Параметрами элементов нейтрали, вводимыми в модель, являются активное (R) и реактивное (X) сопротивления элемента режима нейтрали.

Активное сопротивление рассчитывается по формуле (А.2.7), приведенной в п. А.2 «Определение и обоснование данных для трансформаторов». Кроме того, в нейтраль фильтра нулевой последовательности включен резистор, учитываемый в модели дополнительным активным сопротивлением в каждой из фаз фильтра. Таким образом, к активному сопротивлению обмотки фильтра прибавляется утроенное сопротивление резистора нейтрали.

Реактивное сопротивление фильтра рассчитывается по формуле [43]:

$$X_* = 0,005 \cdot U_k, \text{ [о. е.]} \quad (\text{А.7.1})$$

Данные, необходимые для расчета параметров элементов режима нейтрали, сведены в табл. А.7.1.

Таблица А.7.1

Название	Обозначение
Номинальная мощность, [МВА]	$S_{\text{НОМ}}$
Напряжение короткого замыкания, [%]	U_k
Потери короткого замыкания, [кВт]	ΔP_k
Номинальное сопротивление последовательного резистора, [Ом]	R'

Параметры, вводимые в модель, сведены в табл. А.7.2.

Таблица А.7.2

Название	Обозначение
Реактивное сопротивление обмотки, [о. е.]	X
Активное сопротивление обмотки, [о. е.]	R

Учебное издание

АНДРЕЕВ Михаил Владимирович
РУБАН Николай Юрьевич
СУВОРОВ Алексей Александрович
ГУСЕВ Александр Сергеевич
СУЛАЙМАНОВ Алмаз Омурзакович

ВСЕРЕЖИМНЫЙ МОДЕЛИРУЮЩИЙ КОМПЛЕКС РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Учебное пособие

Редактор *Н.Я. Горбунова*
Компьютерная верстка *В.Д. Пяткова*

Зарегистрировано в Издательстве ТПУ
Размещено на корпоративном портале ТПУ



Издательство

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ