



ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ



ИНЖЕНЕРНАЯ
ШКОЛА
ЭНЕРГЕТИКИ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММНО- АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ТПУ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ ИХ СОВРЕМЕННОГО РАЗВИТИЯ

Докладчик:

СУВОРОВ АЛЕКСЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ,

к.т.н., доцент ОЭЭ ИШЭ, НИЛ «Моделирование ЭЭС»

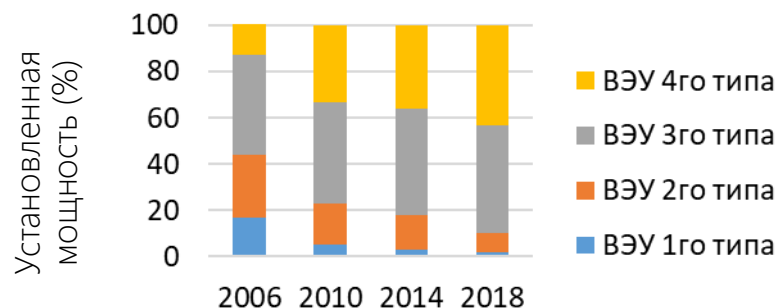
Организация: Томский политехнический университет

28.03.2023

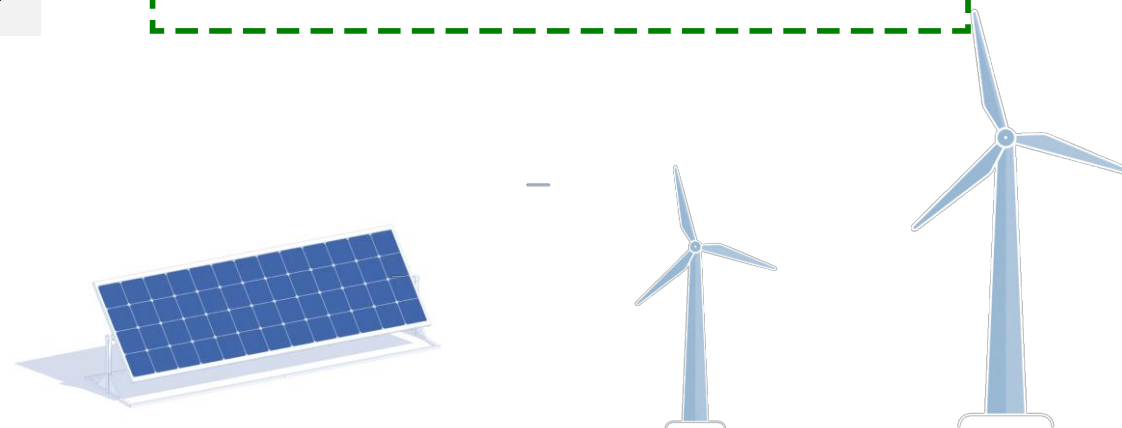
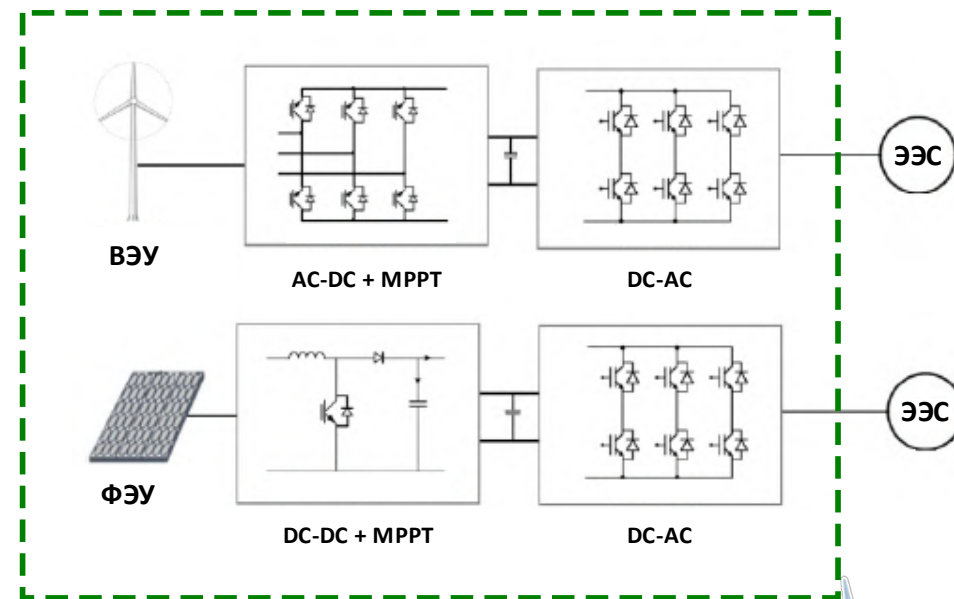
ВВЕДЕНИЕ

Статистика по ВИЭ на базе ветроэнергетических и фотоэлектрических установок в России* и мире**:

ВЭС [ГВт]		ВЭС [ГВт]	
2021 г.	2022 г.	2021 г.	2022 г.
2,04	2,3 ↑	825	906 ↑
СЭС на базе ФЭ [ГВт]		СЭС на базе ФЭ [ГВт]	
2021 г.	2022 г.	2021 г.	2022 г.
1,96	2,12 ↑	894	1067 ↑



Генерирующие установки с силовым преобразователем



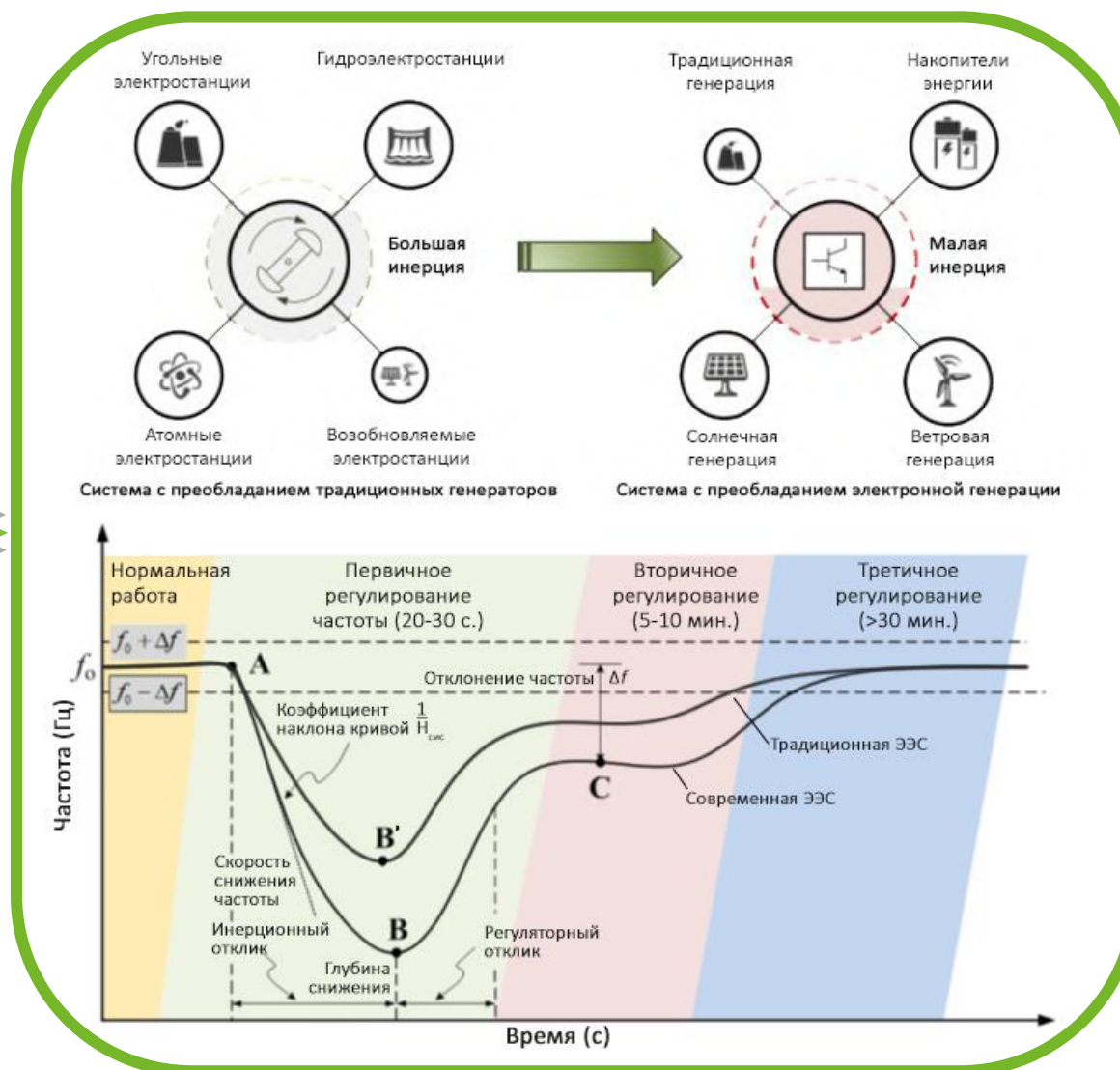
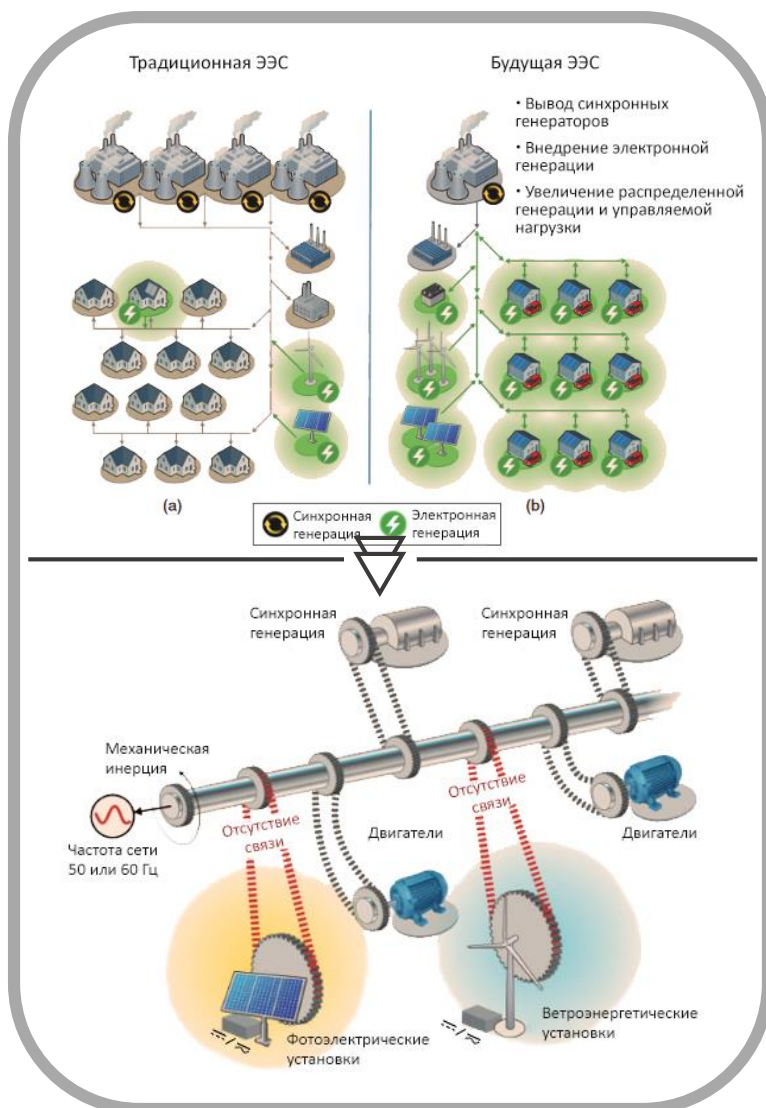
*По данным СО ЕЭС

**По данным Международного энергетического агентства (МЭА)

ВВЕДЕНИЕ



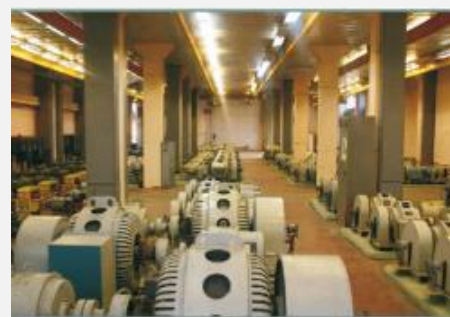
ИНЖЕНЕРНАЯ
ШКОЛА
ЭНЕРГЕТИКИ



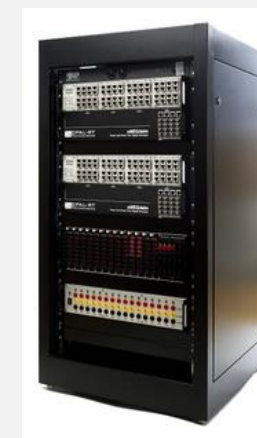
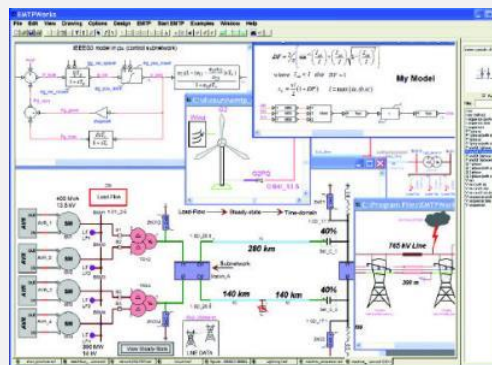
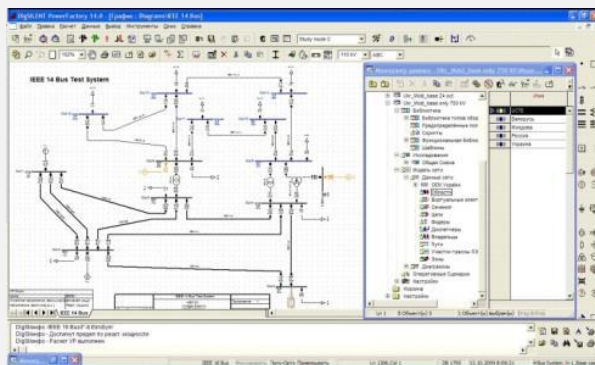
СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ

В настоящее время используются ...

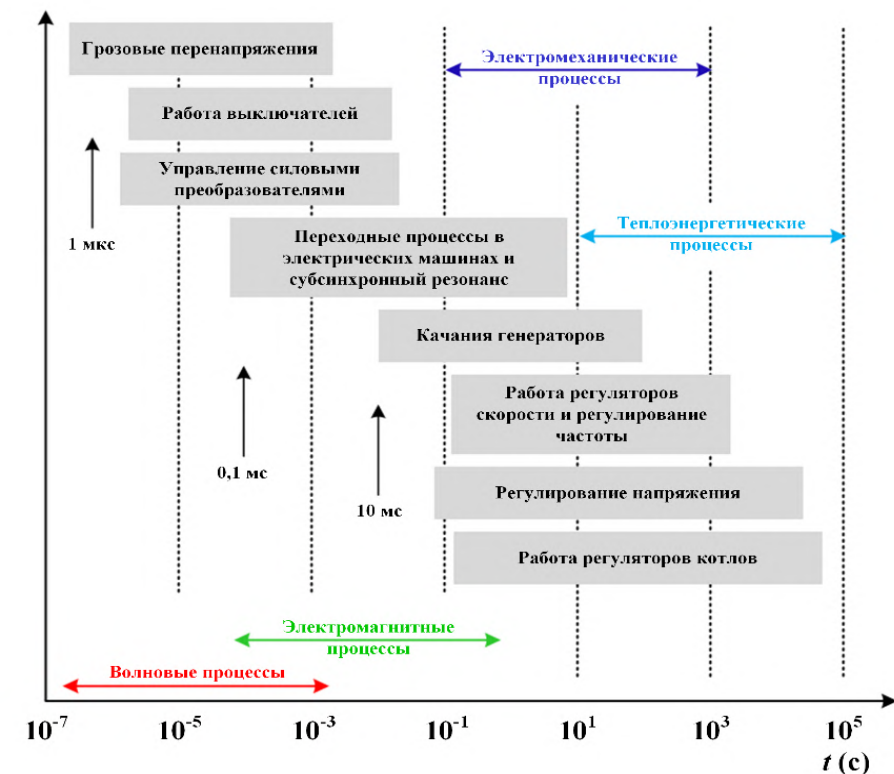
... физические и ...



... цифровые программно-вычислительные и программно-аппаратные комплексы (ПВК и ПАК)



ПРОБЛЕМАТИКА



Переходные процессы в ЭЭС и их группы

ОСОБЕННОСТИ ПАК*:

- в ПАК заданная пользователем схема ЭЭС разделяется на фрагменты, которые распределяются по вычислительным процессорным модулям. Связь фрагментов схемы иногда может быть обеспечена только с помощью фиктивных линий;
- после выполнения своих вычислений процессорные модули должны обмениваться данными за счет создаваемой дополнительной задержки во временном шаге;
- алгоритм разделения исходной схемы ЭЭС на более мелкие подсистемы в лучшем случае является произвольным, обычно основанным на опыте и решаемых задачах пользователя;
- при любой топологии ЭЭС, как правило, есть наибольшая подсистема, которая не может быть разложена на составляющие, что приводит к неравномерной вычислительной нагрузке на процессорные модули;
- при моделировании ЭЭС большой размерности обычно используется шаг расчета 50 мкс. В этом случае модели силовых преобразователей реализуются упрощенными управляемыми источниками напряжения, без воспроизведения топологии, так как время переключения IGBT составляет 4-9 мкс.

ПУТИ РЕШЕНИЯ:

- разделение единой математической модели ЭЭС на подсистемы, рассчитываемые с разным шагом;
- разделение схемы и моделируемого оборудования между подсистемами двух типов. Данный подход является модификацией предыдущего, в котором в подсистеме первого типа также производится расчет электромагнитных переходных процессов, а во втором – расчет электромеханических переходных процессов;
- использование вычислительных процессорных модулей с программируемой пользователем вентильной матрицей (FPGA-панелей).

ЗАЧЕМ МОДЕЛИРОВАТЬ БОЛЬШИЕ ЭЭС С ВИЭ



ИНЖЕНЕРНАЯ
ШКОЛА
ЭНЕРГЕТИКИ

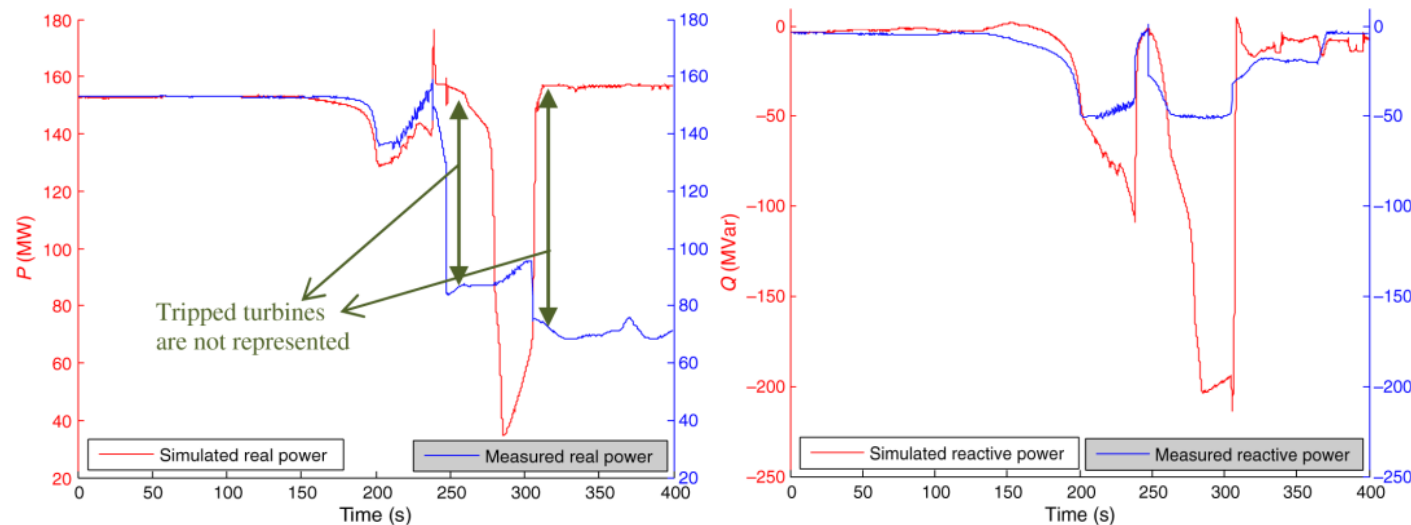


Рисунок 1 – Осциллограммы изменения мощности ВЭС при КЗ в сети*:

■ – моделирование одним эквивалентом; ■ – натурные данные

При значительном эквивалентировании схем ЭЭС «теряется» влияние отдельных элементов или их небольших групп на режим ЭЭС.

Следует также подчеркнуть, что динамика изменения процессов, в особенности переходных, для больших и для маленьких ЭЭС значительно различается

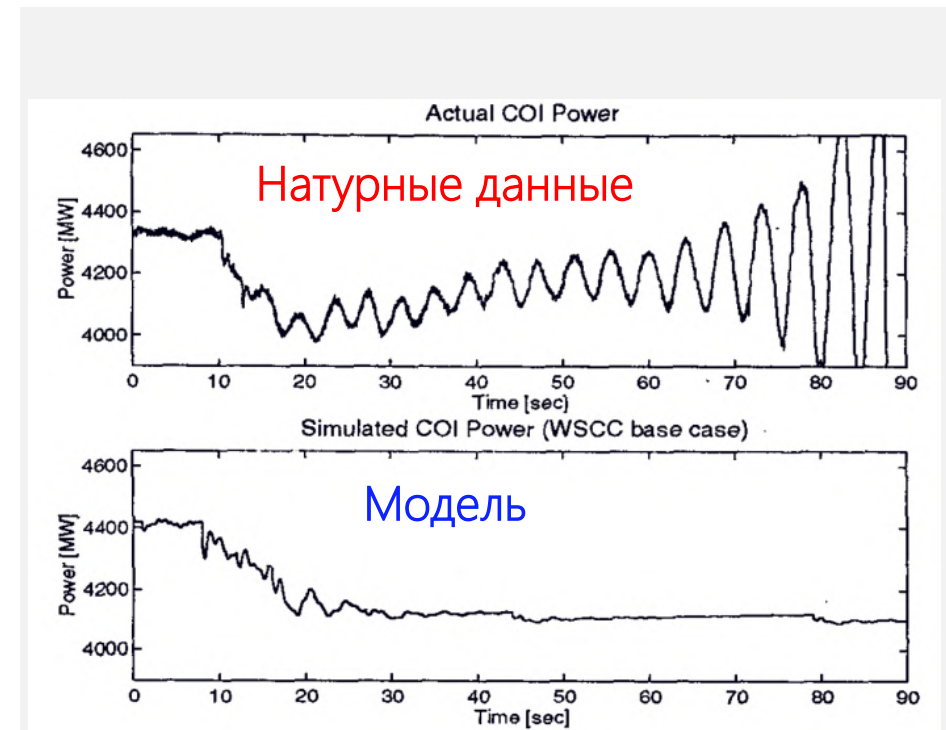


Рисунок 2 – Осциллограммы изменения перетока мощности в линии постоянного тока в аварийном режиме**

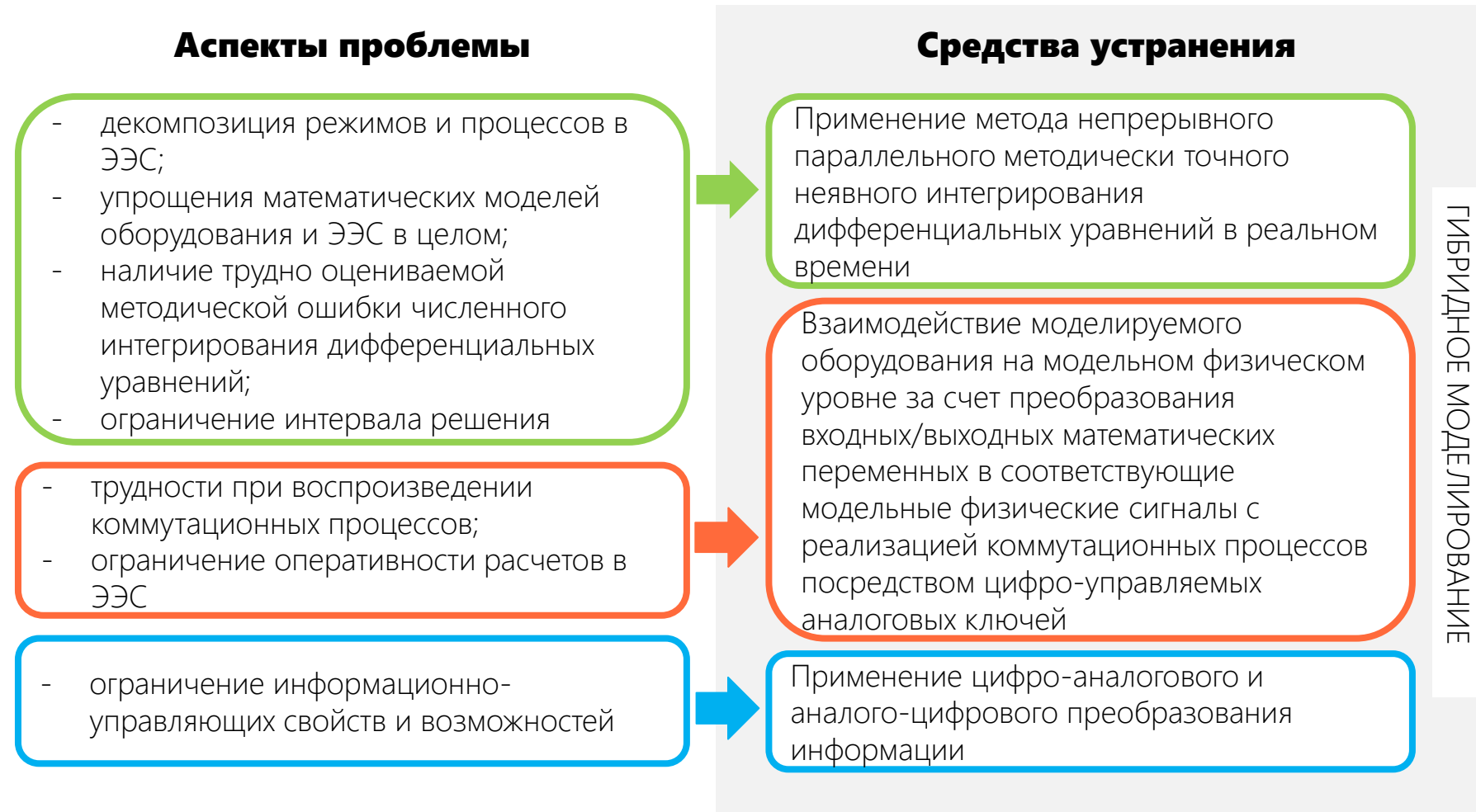
*DOI: 10.1109/TSTE.2014.2343794

**DOI: 10.1109/MPE.2014.2301533

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД



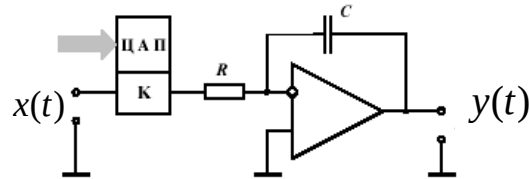
ИНЖЕНЕРНАЯ
ШКОЛА
ЭНЕРГЕТИКИ



АНАЛОГОВЫЙ УРОВЕНЬ

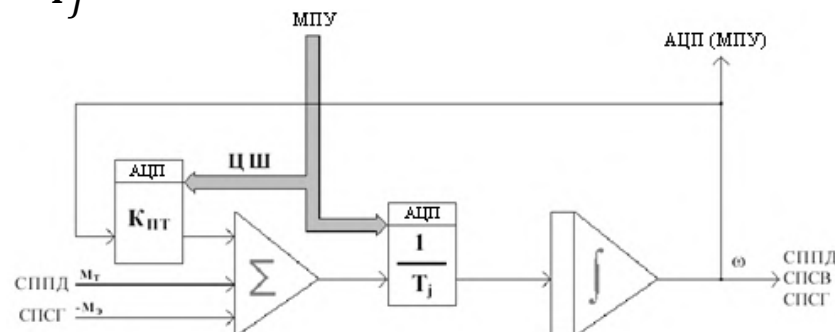
Непрерывное неявное интегрирование

$$y(t) = -\frac{K}{RC} \int_0^t x(t) dt$$



Реализация уравнения движения ротора

$$\begin{cases} T_j \frac{d\omega}{dt} + K_{\text{ПТ}} \omega = M_{\text{Т}} - K_{\text{М}} (\Psi_d i_q - \Psi_q i_d) \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{T_j} (M_{\text{Т}} - M_{\text{ЭМ}} - K_{\text{ПТ}} \omega) \end{cases}$$



Шаг интегрирования

Зададим масштаб времени: $M_t = t / t_n$,

где t - машинное время, t_n - натуральное время.

Примем $M_t = 1$.

Операция интегрирования $y_2 = \int y_1 dt_n$ (1) с помощью ОУ осуществляется по формуле:

$u_2 = -(1/RC) \int u_1 dt$ (2), где u_1 и u_2 напряжения на входе и на выходе соответственно.

Введем масштабы для переменных: $M_{y_2} = u_2 / y_2$, $M_{y_1} = u_1 / y_1$.

В общем масштаб для любых переменных определяется как отношение максимального значения напряжения микроселектронного элемента ($u_{\text{max}} = 10 \text{ В}$) к максимальному значению моделируемой физической величины: $M_y = u_{\text{max}} / y_{\text{max}}$. Исходя из этого, для рассматриваемого примера масштабы переменных можно записать:

$$M_{y_2} = u_{\text{max}} / y_{2\text{max}}, M_{y_1} = u_{\text{max}} / y_{1\text{max}}.$$

Выразив значения u_2 , u_1 , t через значения $y_{2\text{max}}$, $y_{1\text{max}}$, t_n и подставив в (2), получим:

$$M_{y_2} y_{2\text{max}} = -(1/RC) \int M_{y_1} y_{1\text{max}} M_t dt_n.$$

Для тождественности уравнений (1) и (2) необходимо, чтобы $M_{y_1} M_t / R C M_{y_2} = 1$, откуда

$$RC = y_{2\text{max}} \cdot M_t / y_{1\text{max}} = y_{2\text{max}} \cdot 1 / y_{1\text{max}} \quad (3).$$

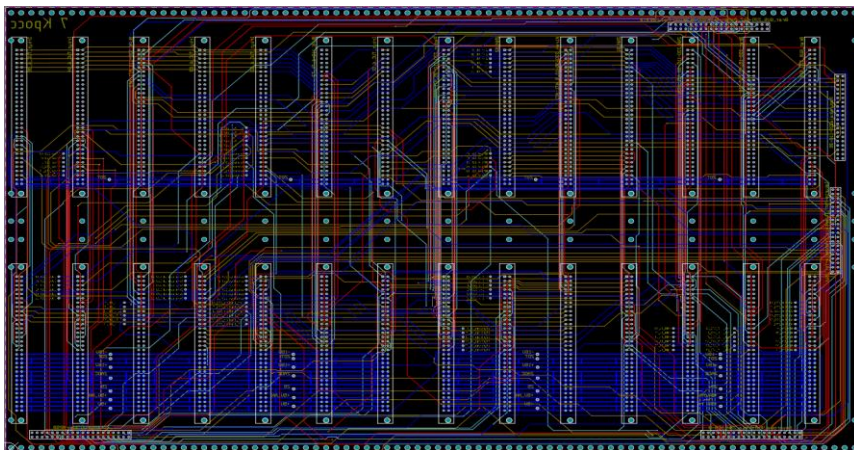
Таким образом, определяется постоянная времени интегратора и осуществляется непрерывное решение в реальном времени

ФИЗИЧЕСКИЙ УРОВЕНЬ



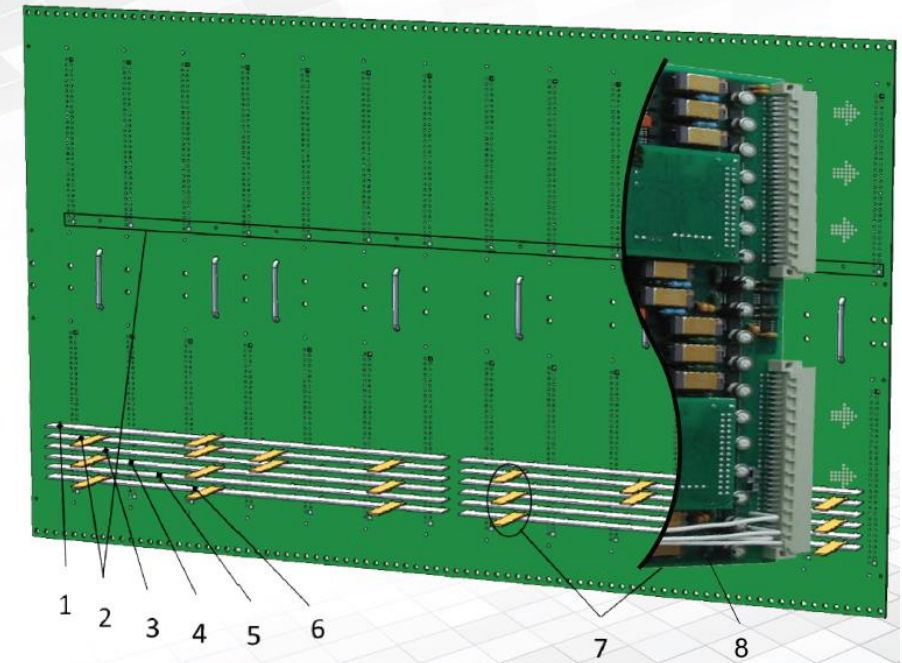
ИНЖЕНЕРНАЯ
ШКОЛА
ЭНЕРГЕТИКИ

Плата коммутатора трехфазных узлов (КТУ)



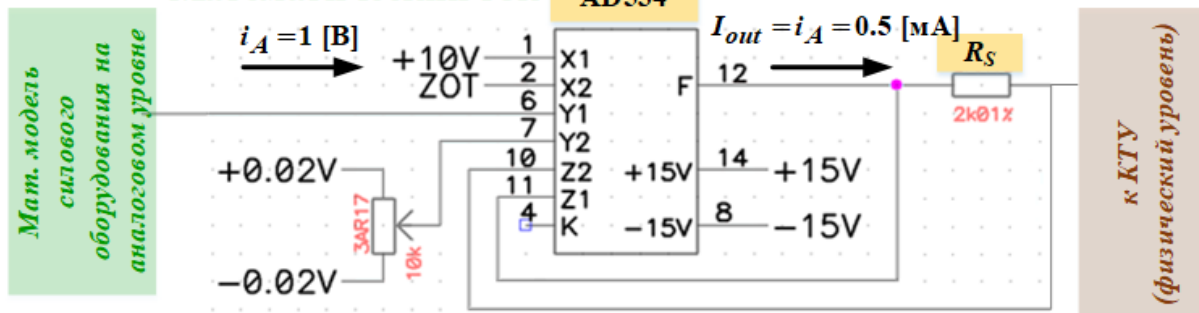
– для взаимодействия моделируемых элементов ЭЭС

- 1 – шина питания -15V;
- 2 – шина операционной аналоговой земли;
- 3 – шина питания +15V;
- 4 – шина земли питания АЦП;
- 5 – шина земли питания микропроцессоров;
- 6 – шина питания +5V;
- 7 – ножевые разъемы;
- 8 – СГП.



Математический ток

Физический ток



$$I_{\text{ВЫХ}} = \frac{(X_1 - X_2)(Y_1 - Y_2)}{10} \cdot \frac{1}{R_s}$$

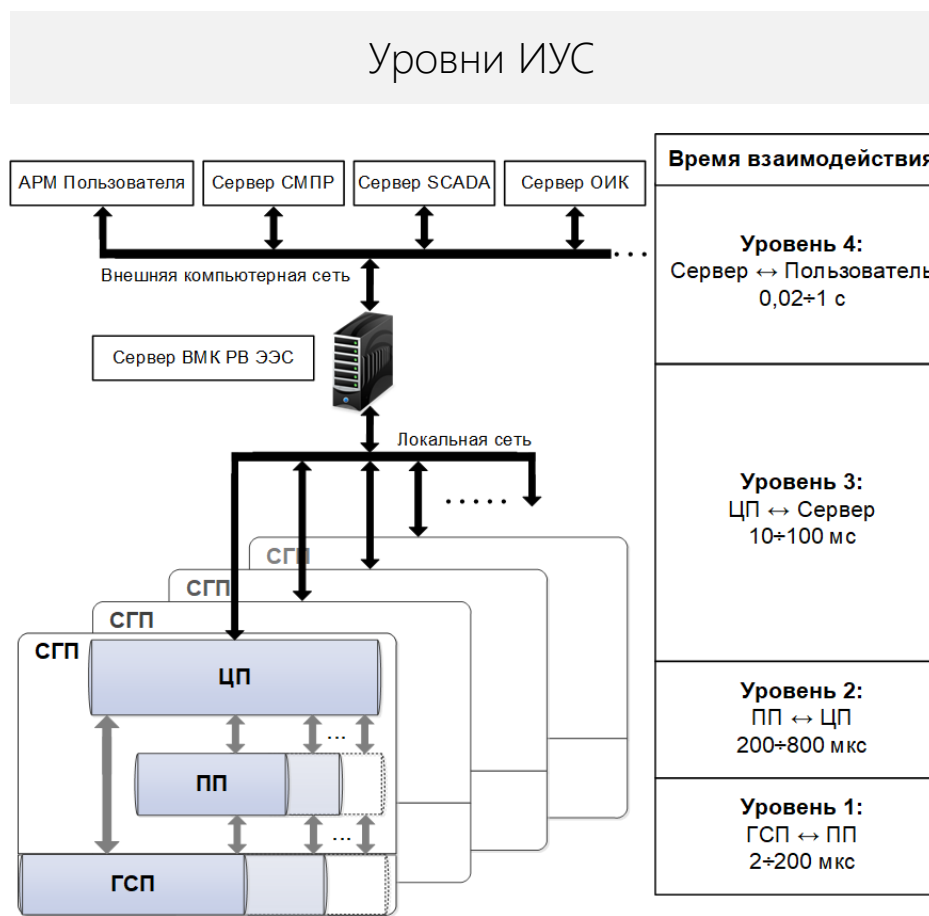
ЦИФРОВОЙ УРОВЕНЬ



ИНЖЕНЕРНАЯ
ШКОЛА
ЭНЕРГЕТИКИ

Структура информационно-управляющей системы (ИУС)

ЦП	Центральный процессор
СП	Специализированный процессор
ПП	Периферийный процессор
АРМ	Автоматизированное рабочее место
ГСП	Гибридный сопроцессор



ЦИФРОВОЙ УРОВЕНЬ

Параллельные процессы сервера

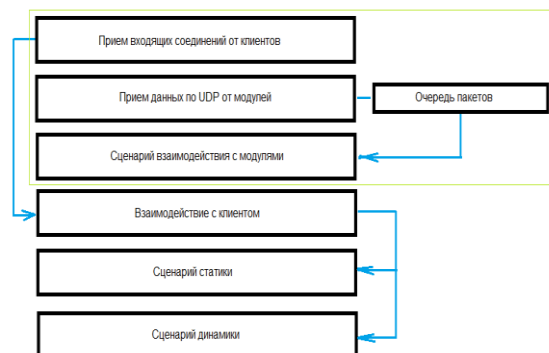


Рисунок 1 – Параллельные процессы сервера

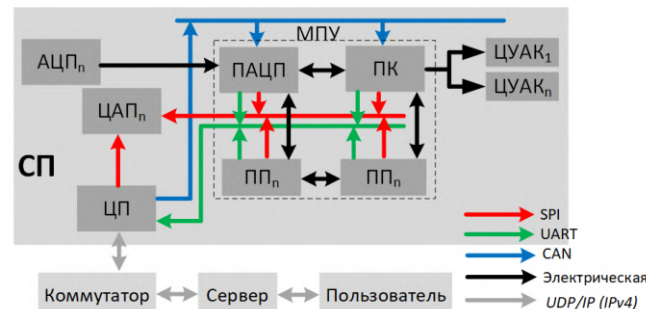


Рисунок 2 – Информационное взаимодействие внутри СС

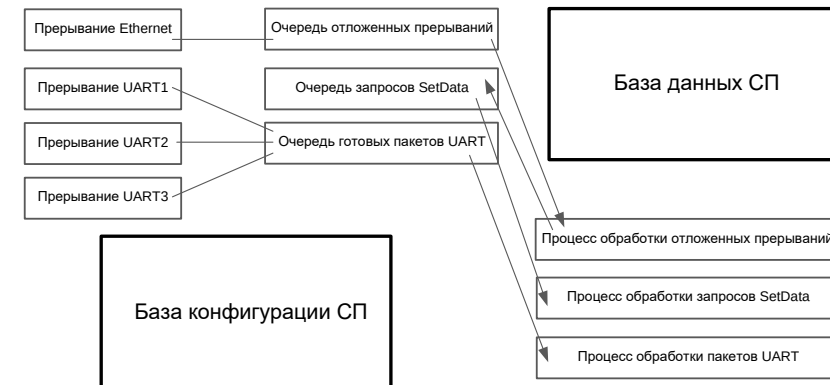


Рисунок 3 – Параллельные процессы ЦП

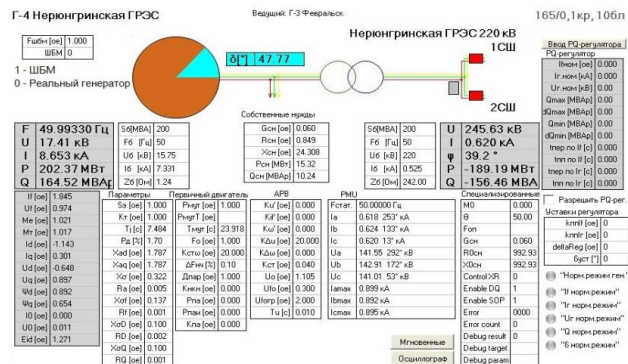


Рисунок 4 – Подсистема динамических панелей наблюдения и управления

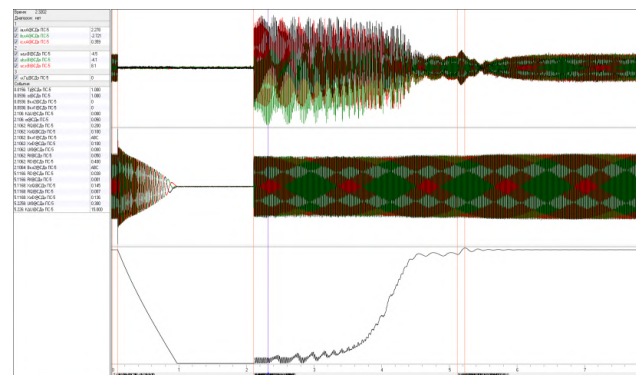


Рисунок 5 – Подсистема осциллографирования

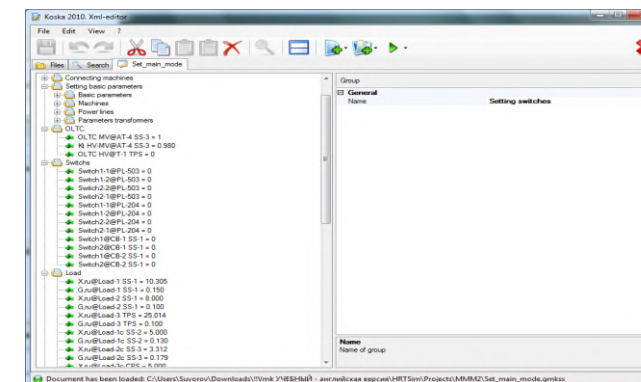
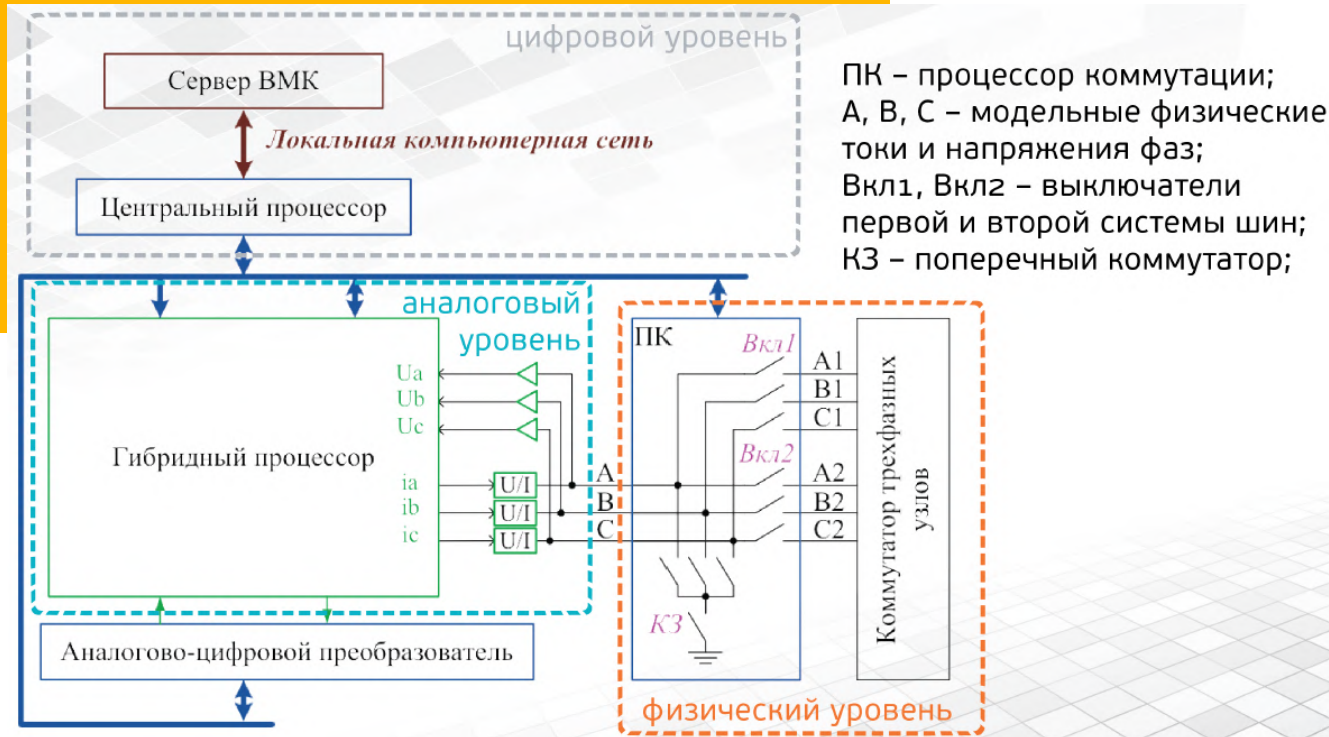


Рисунок 6 – Подсистема сценария

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЙ ПРОЦЕССОР (СП)

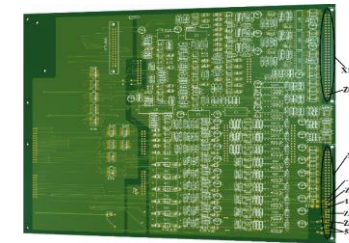


ИНЖЕНЕРНАЯ
ШКОЛА
ЭНЕРГЕТИКИ



ПК – процессор коммутации;
А, В, С – модельные физические
токи и напряжения фаз;
Вкл1, Вкл2 – выключатели
первой и второй системы шин;
КЗ – поперечный коммутатор;

Структурная схема СП



Печатная плата СП



СП
линии электропередачи



СП
ВПТ, ЛПТ, СТАТКОМ

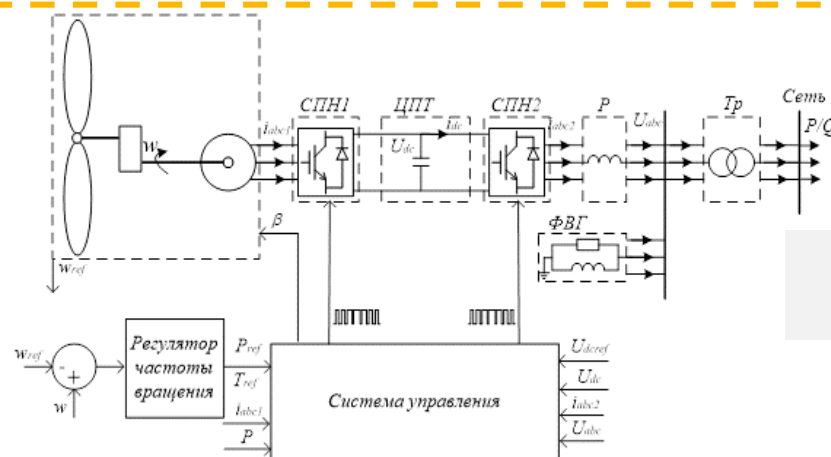
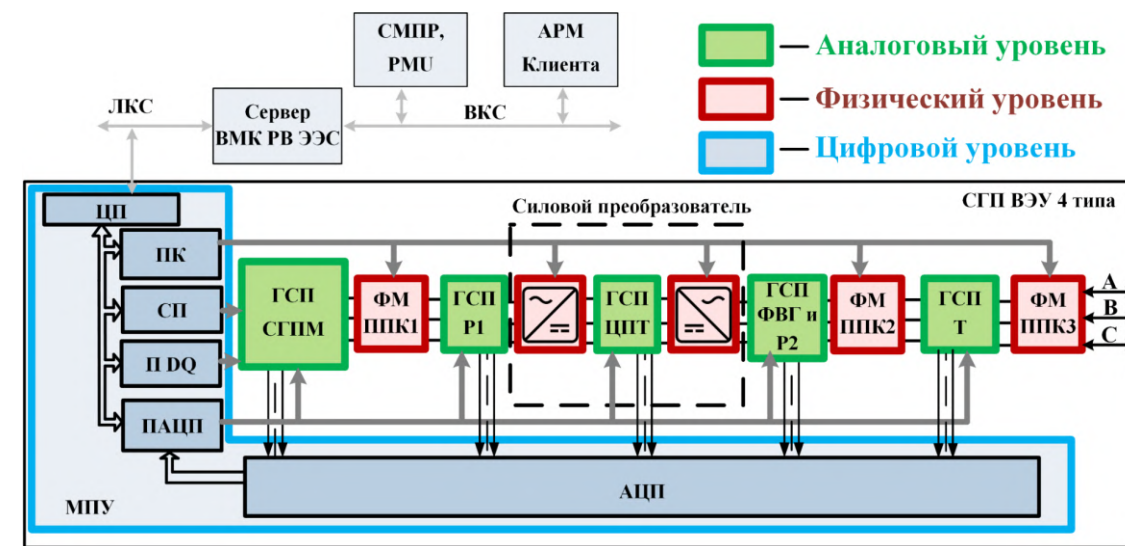


СП
электрической машины

СП ВЭУ 4-ГО ТИПА

Структурная схема СП ВЭУ 4-го типа

где МПУ – микропроцессорный узел, состоящий из периферийных микропроцессоров: СП – сопроцессор; ПК – процессор коммутации, обеспечивающий управление ЦУАК физических моделей (ФМ): ФМ ППК 1 (осуществление всевозможных продольно-поперечных коммутаций) и идентичных ФМ ППК 2, ФМ ППК 3, а также ФМ В – выпрямителя и ФМ И – инвертора; П dq – процессор d,q; ПАЦП – процессор аналого-цифрового преобразования; ЦП – центральный процессор; ГСП СГПМ – гибридный сопроцессор СГПМ; ГСП Р – гибридный сопроцессор реактора; ГСП ЦПТ – гибридный сопроцессор цепи постоянного тока; ГСП ФВГ – гибридный сопроцессор фильтра высших гармоник; ГСП Т – гибридный сопроцессор трансформатора присоединения; АРМ Клиента – автоматизированное рабочее место клиента, ОИК, СМНР – системы мониторинга, сбора и архивирования данных ЭЭС (при необходимости использования данных этих комплексов); ВКС и ЛКС – внешняя и локальная компьютерные сети соответственно



Топология
ВЭУ 4-го типа

ЦИФРОУПРАВЛЯЕМЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ (ФМ) СПН



ИНЖЕНЕРНАЯ
ШКОЛА
ЭНЕРГЕТИКИ

Цифроуправляемая физическая модель фазы А
трехуровневого статического преобразователя
напряжения (выпрямителя)

Цифроуправляемая физическая модель фазы А
трехуровневого статического преобразователя
напряжения (инвертора)

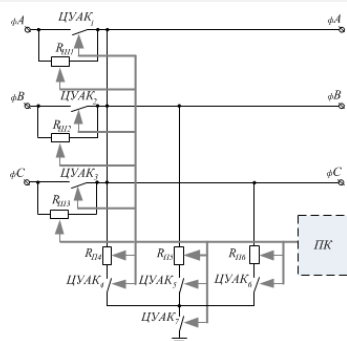
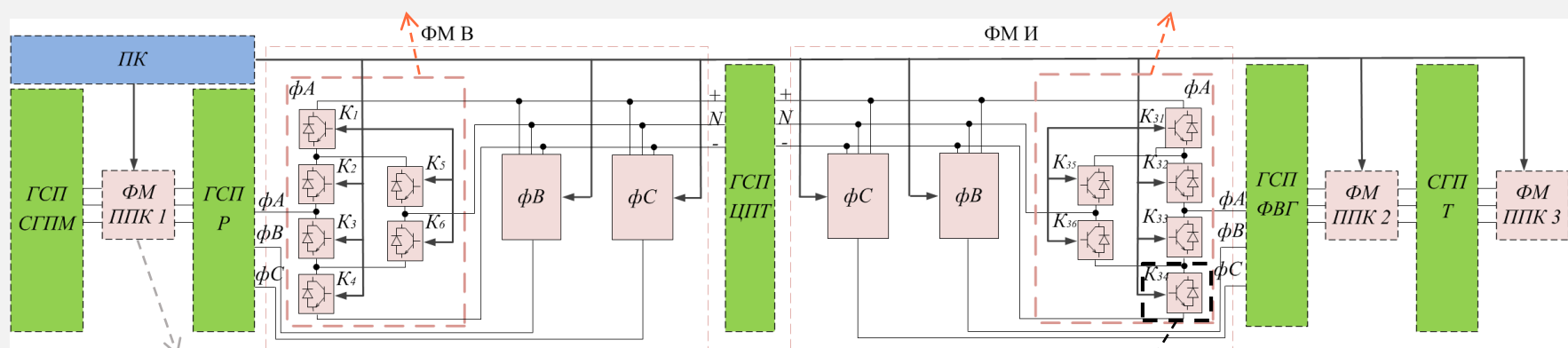


Рисунок 1 – Структурная схема
цифроуправляемой физической модели
продольно-поперечного коммутатора 1

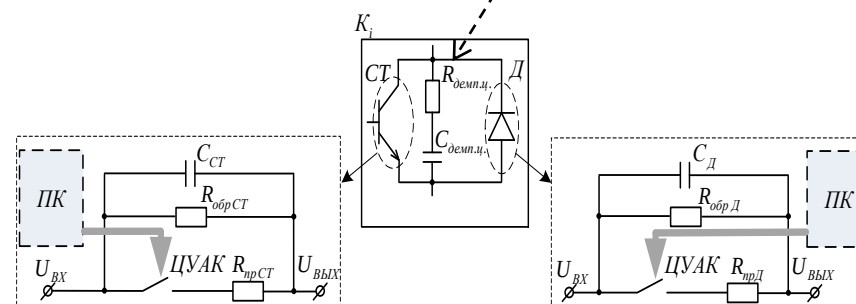


Рисунок 2 – Цифроуправляемая физическая модель
быстродействующего полностью управляемого
полупроводникового ключа

МОДЕЛЬ ГСП СМПМ

Математическая модель СМПМ в осях d, q :

- уравнение движения ротора

$$T_j \frac{d\omega}{dt} + K_{\text{ПТ}} \omega = M_{\text{МЭХ}} - M_{\text{ЭМ}} \longrightarrow$$

$$\longrightarrow \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{T_j} \cdot \left(\frac{P_{\text{МЭХ}}}{\omega} - (\psi_d i_q - \psi_q i_d) - K_{\text{ПТ}} \omega \right)$$

- потокосцепления в воздушном зазоре:

$$\Psi_{\delta q} = x_{aq} i_q, \quad \Psi_{\delta d} = x_{ad} i_d$$

- внутренние ЭДС в воздушном зазоре:

$$E_{iq} = x_{aq} i_q, \quad E_{id} = x_{ad} i_d + E_{\text{ПМ}}$$

- результирующие потокосцепления:

$$\Psi_q = \Psi_{\delta q} + x_{\sigma} i_q, \quad \Psi_d = \Psi_{\delta d} + x_{\sigma} i_d$$

- напряжения статора:

$$u_q = \omega \Psi_d - \frac{d\Psi_q}{dt} - r_a i_q, \quad u_d = -\omega \Psi_q - \frac{d\Psi_d}{dt} - r_a i_d$$

- токи статора:

$$i_q = \frac{1}{x_{\sigma}} (\Psi_q - E_{iq}), \quad i_d = \frac{1}{x_{\sigma}} (\Psi_d - E_{id})$$

Координатные преобразования $d, q \rightleftharpoons A, B, C$:

$$u_d = \frac{2}{3} \left[u_a(t) U_m \cos(\omega t) + u_b(t) U_m \cos\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right) + u_c(t) U_m \cos\left(\omega t - \frac{4}{3}\pi\right) \right],$$

$$u_q = \frac{2}{3} \left[u_a(t) U_m \sin(\omega t) + u_b(t) U_m \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right) + u_c(t) U_m \sin\left(\omega t - \frac{4}{3}\pi\right) \right],$$

$$i_a(t) \equiv U_{am} \sin(\omega t) = i_d U_m \cos(\omega t) + i_q U_m \sin(\omega t),$$

$$i_b(t) \equiv U_{bm} \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right) = i_d U_m \cos\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right) + i_q U_m \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right),$$

$$i_c(t) \equiv U_{cm} \sin\left(\omega t - \frac{4}{3}\pi\right) = i_d U_m \cos\left(\omega t - \frac{4}{3}\pi\right) + i_q U_m \sin\left(\omega t - \frac{4}{3}\pi\right),$$

где: $K_{\text{ПТ}}$ – коэффициент, учитывающий главным образом потери на трение, в том числе функционально изменяемый,

T_j – постоянная инерции ВЭУ, ω – угловая частота вращения ВЭУ, $\frac{d\Psi_q}{dt}$, $\frac{d\Psi_d}{dt}$ и $\omega\Psi_d$, $\omega\Psi_q$ – соответствующие трансформаторные ЭДС и ЭДС вращения,

x_{ad} и x_{aq} – сопротивления взаимоиндукции между ротором и статором, x_{σ} – сопротивление рассеяния статорной фазной обмотки, r_a – активное сопротивление статорной фазной обмотки;

Формируемая в ЦП $E_{\text{ПМ}}$ – ЭДС постоянных магнитов определяется выражением:

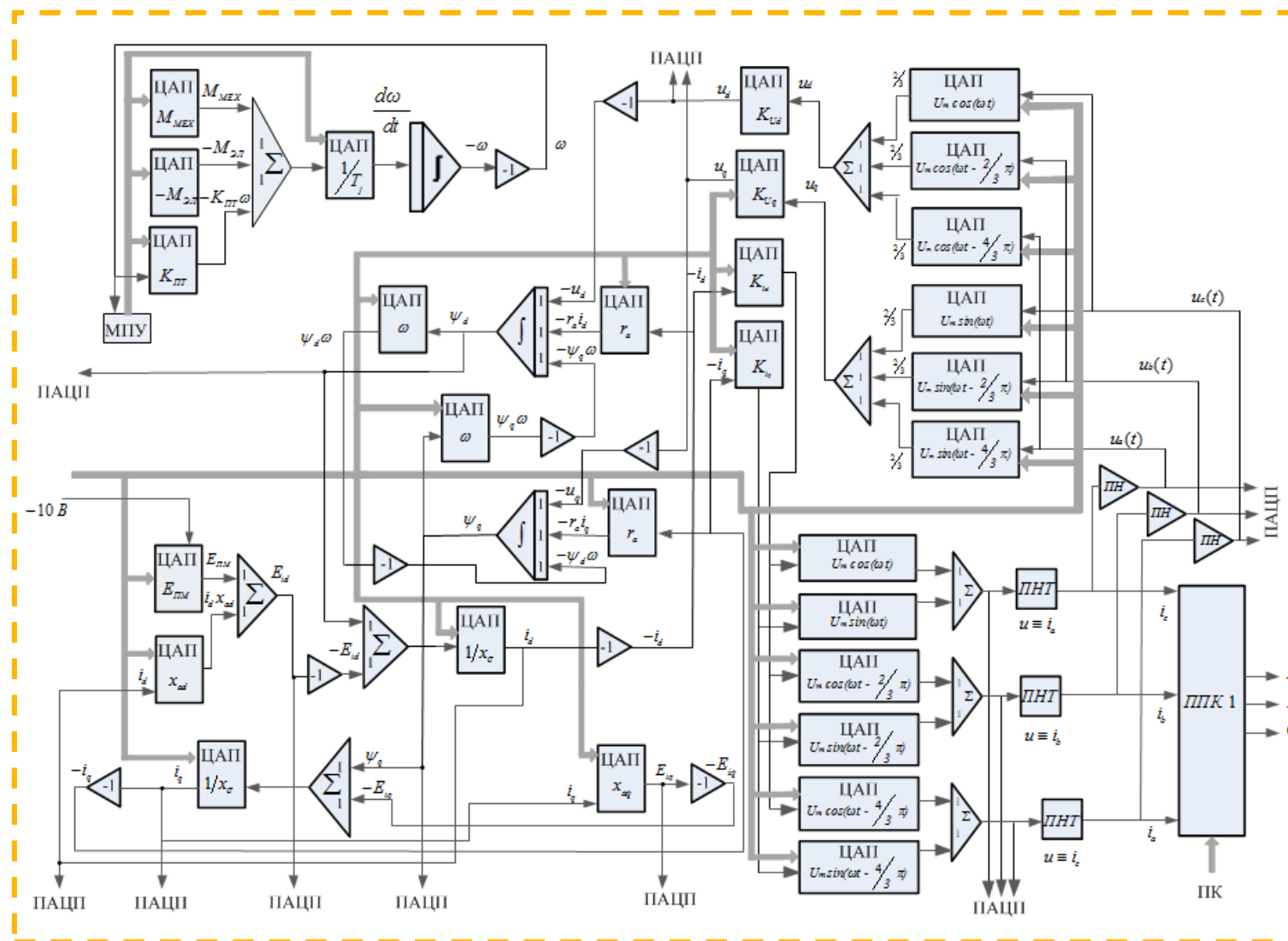
$$E_{\text{ПМ}} = \frac{4,44}{p} \Phi W_{\phi} f K_{\text{об}}$$

где: W_{ϕ} – число витков фазной обмотки статора, $K_{\text{об}}$ – обмоточный коэффициент, $\Phi = SB_r$ – магнитный поток, создаваемый постоянным магнитом, B_r – магнитная индукция магнитного материала, S – сечение полюса постоянного магнита, p – число пар полюсов

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА ГСП СМППМ



ИНЖЕНЕРНАЯ
ШКОЛА
ЭНЕРГЕТИКИ



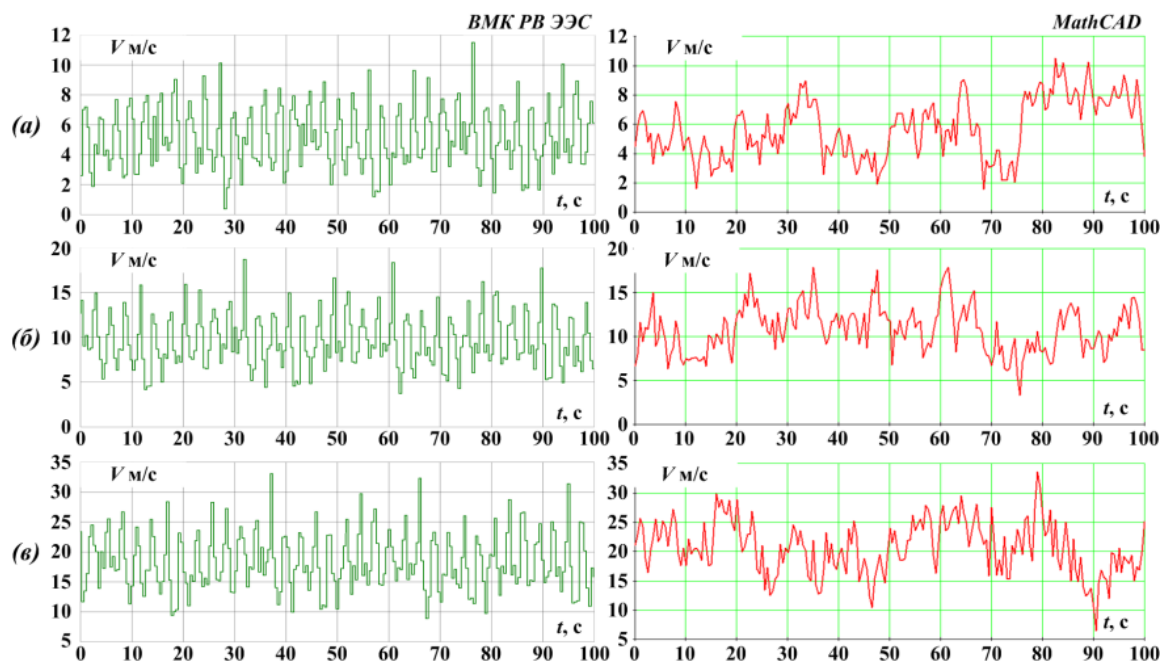
ТЕСТОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СП ВЭУ 4-ГО ТИПА



ИНЖЕНЕРНАЯ
ШКОЛА
ЭНЕРГЕТИКИ

Верификация модели ветра

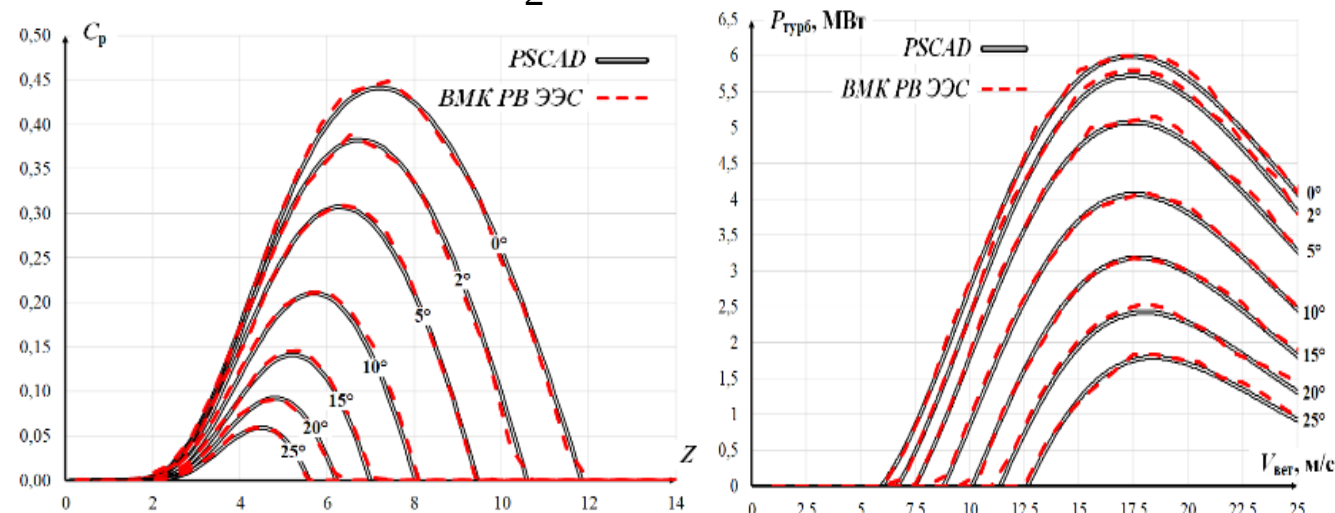
$$V = \bar{V}_{np} + V(t)$$



Воспроизведение динамики ветра:
(а) $V_{np} = 5$ м/с; (б) $V_{np} = 10$ м/с; (в) $V_{np} = 20$ м/с

Верификация модели ветротурбины
без регулятора угла поворота лопастей

$$P_{MEX} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_{np}^3 C_p(Z, \beta)$$



Зависимость коэффициента мощности C_p от быстроходности Z при разных углах поворота лопасти (а); зависимость мощности турбины P_{MEX} от скорости ветра V_{np} при разных углах поворота лопастей β (б)

ТЕСТОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СП ВЭУ 4-ГО ТИПА



ИНЖЕНЕРНАЯ
ШКОЛА
ЭНЕРГЕТИКИ

Верификация модели ветротурбины
с регулятором угла поворота лопастей

Рисунок 4 – Результирующие осциллограммы
работы динамической модели ветра вместе с
введенным в работу регулятором угла поворота
лопастей ветротурбины

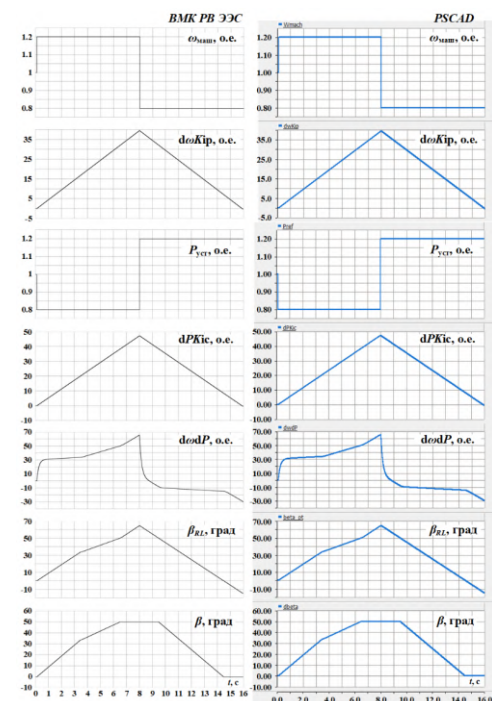


Рисунок 1 – Осциллограммы работы отдельных
звеньев регулятора угла поворота лопастей
ветротурбины

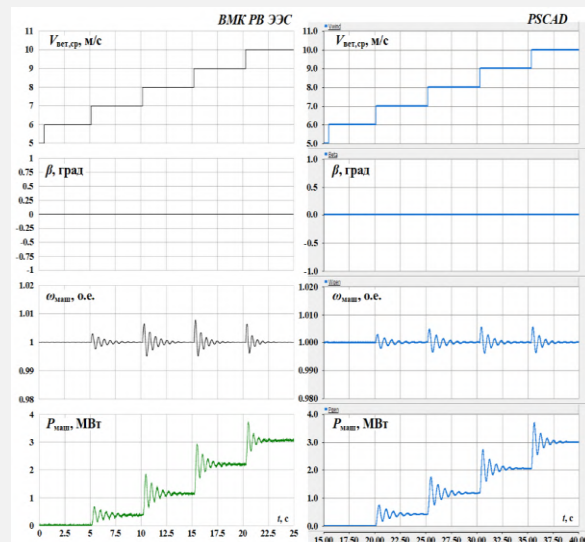


Рисунок 2 – Результирующие осциллограммы
работы регулятора угла поворота лопастей
ветротурбины при ступенчато изменяющихся
значениях скорости ветра (от 5 м/с до 10 м/с)

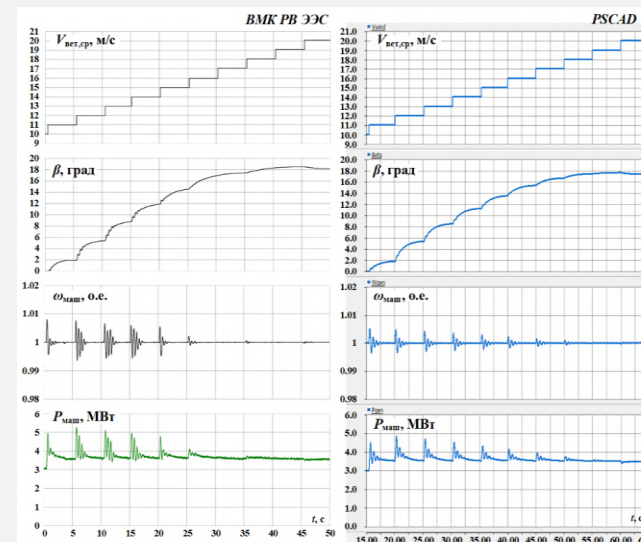
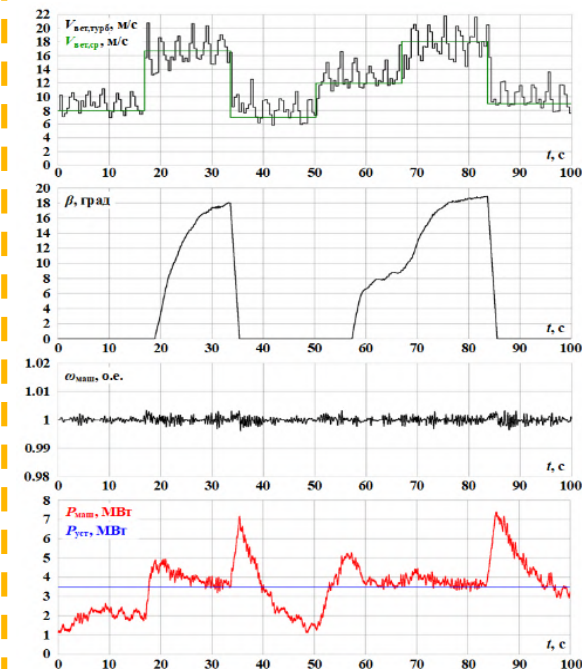


Рисунок 3 – Результирующие осциллограммы
работы регулятора угла поворота лопастей
ветротурбины при ступенчато изменяющихся
значениях скорости ветра (от 10 м/с до 20 м/с)



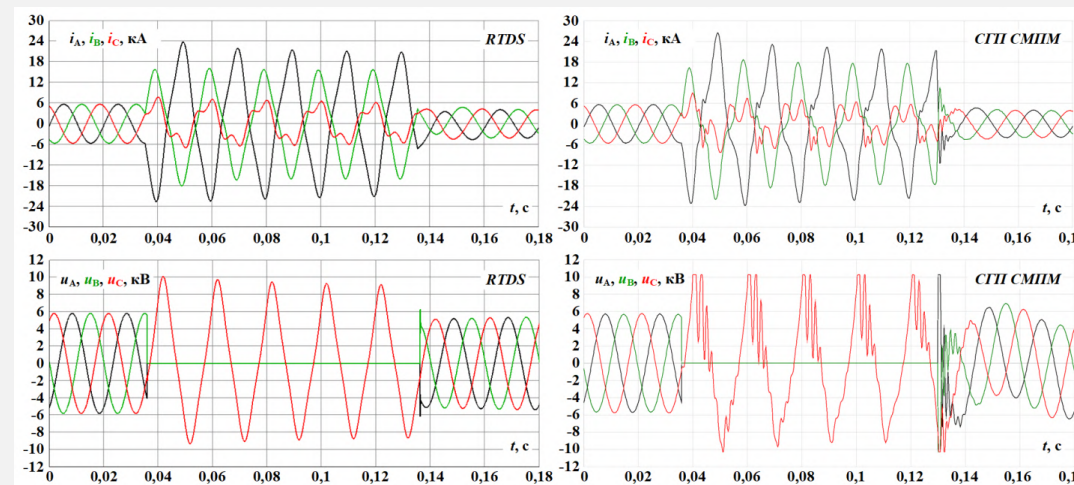
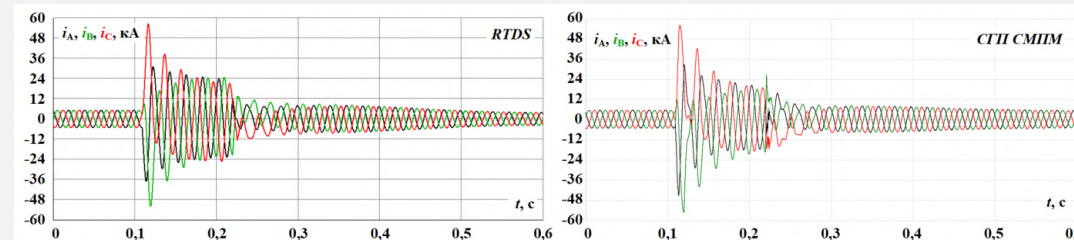
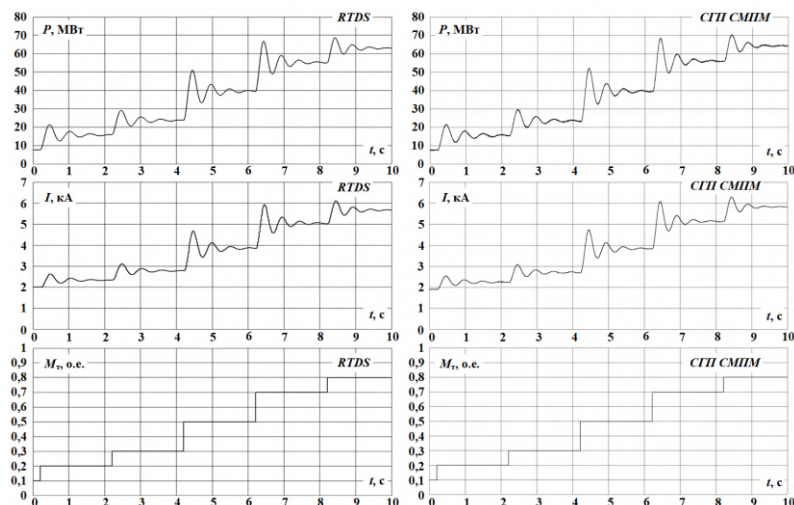
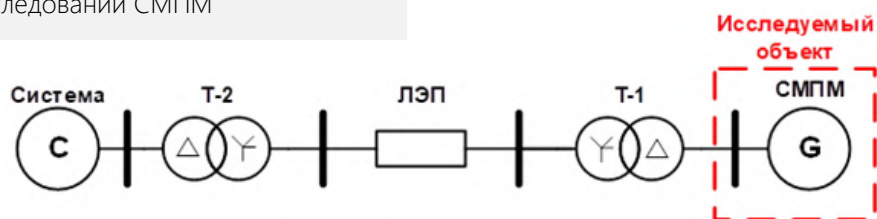
ТЕСТОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СП ВЭУ 4-ГО ТИПА



ИНЖЕНЕРНАЯ
ШКОЛА
ЭНЕРГЕТИКИ

Верификация ГСП СМГМ

Тестовая схема для проведения
исследований СМГМ



ТЕСТОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СП ВЭУ 4-ГО ТИПА



ИНЖЕНЕРНАЯ
ШКОЛА
ЭНЕРГЕТИКИ

Верификация ФМ СПН

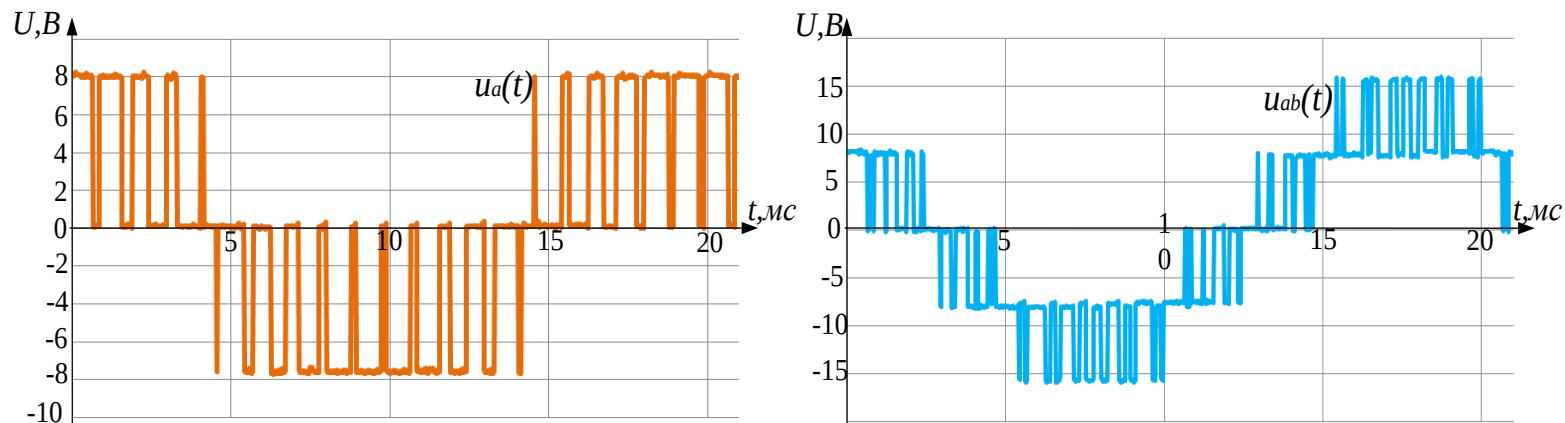


Рисунок 1 – Осциллограммы фазного (а) и линейного (б) напряжений на выходе ЦУ ФМ СПН на базе ЦУАК, функционирующего в режиме инвертора

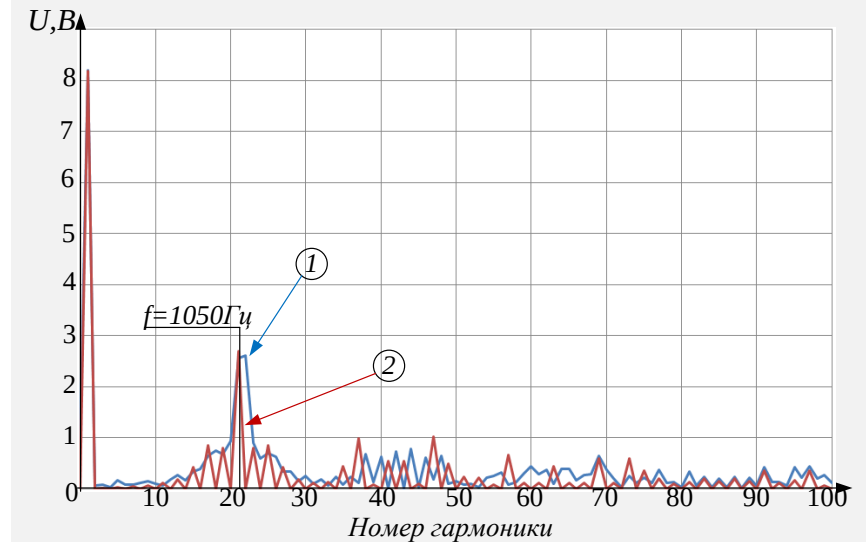


Рисунок 2 – Результаты спектрального анализа фазного напряжения на выходе ЦУ ФМ СПН, функционирующего в режиме инвертора:
1 – ЦУ ФМ СПН, 2 – компьютерная модель

ТЕСТОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СП ВЭУ 4-ГО ТИПА



ИНЖЕНЕРНАЯ
ШКОЛА
ЭНЕРГЕТИКИ

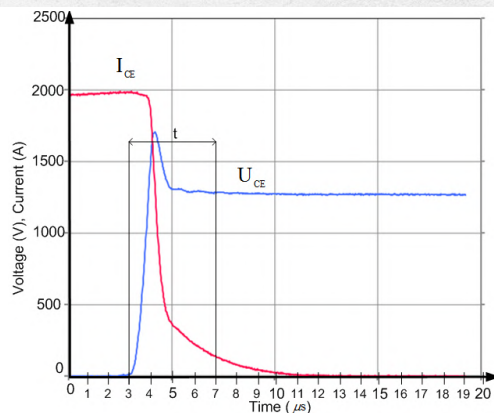


Рисунок 1 – Реальная осциллограмма напряжения и тока при размыкании силового ключа на базе IGBT (модель IGBT #5SNR, производитель ABB)

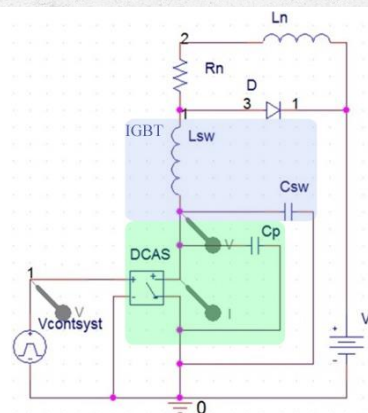


Рисунок 3 – Схема коммутации силового ключа на базе IGBT без демпферных цепей в OrCAD: C_{sw} , L_{sw} – эквивалентные емкость и индуктивность IGBT; C_p – емкость ЦУАК; R_n , L_n – сопротивление эквивалентной нагрузки; D – обходной диод

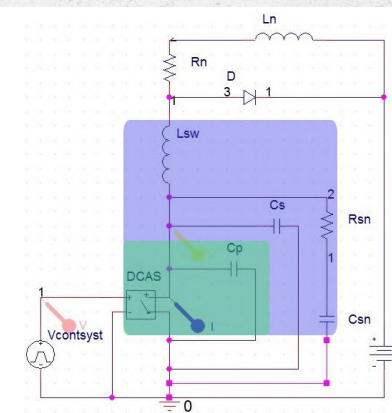


Рисунок 4 – Схема коммутации силового ключа на базе IGBT с демпферной цепью в OrCAD: C_{sn} , R_{sn} – параметры демпферной цепи

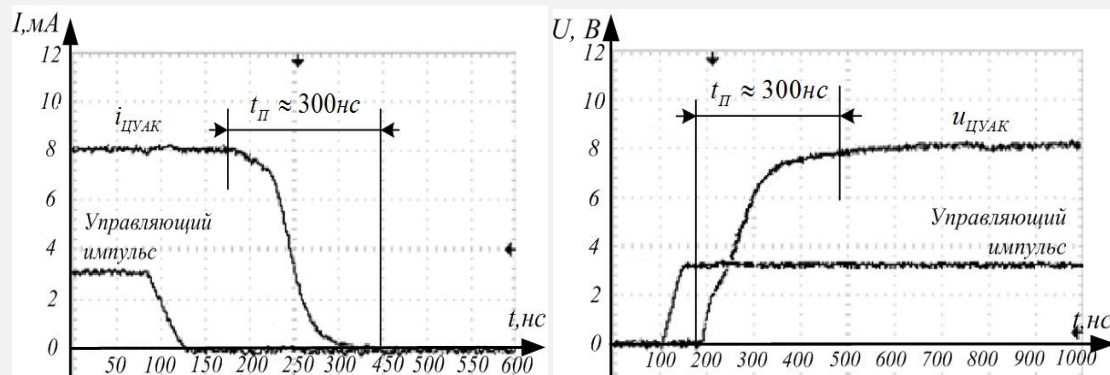


Рисунок 2 – Осциллограммы напряжения и тока при размыкании силового ключа на базе IGBT, полученные при гибридном моделировании с помощью ЦУАК

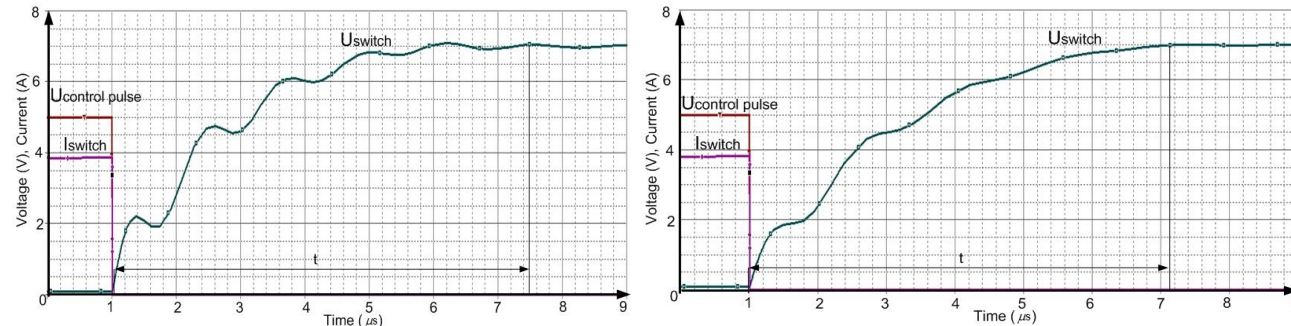


Рисунок 5 – Осциллограммы напряжения и тока при размыкании силового ключа на базе IGBT при отсутствии и наличии демпферной цепи, полученные при гибридном моделировании с помощью ЦУАК

ТЕСТОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СП ВЭУ 4-ГО ТИПА



ИНЖЕНЕРНАЯ
ШКОЛА
ЭНЕРГЕТИКИ

Тестовые исследования МПУ

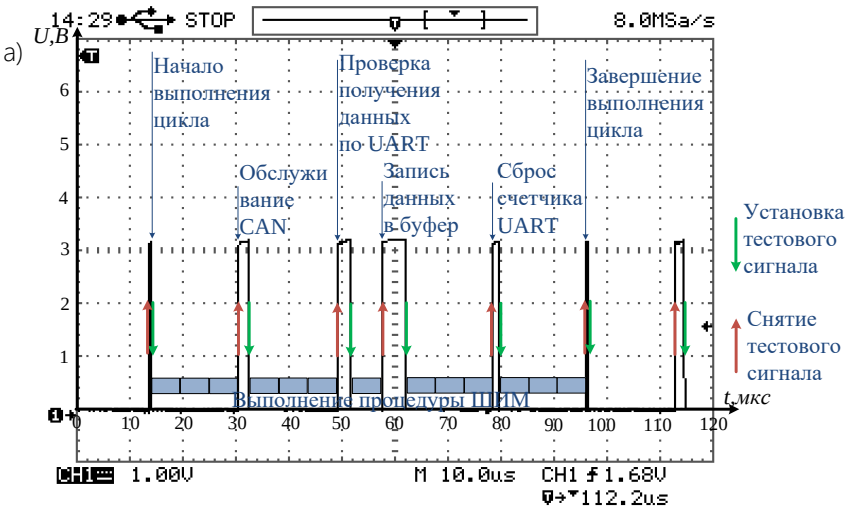


Рисунок 1 – Временная диаграмма выполнения операций программы ПК (а) и ПАЦП (б)

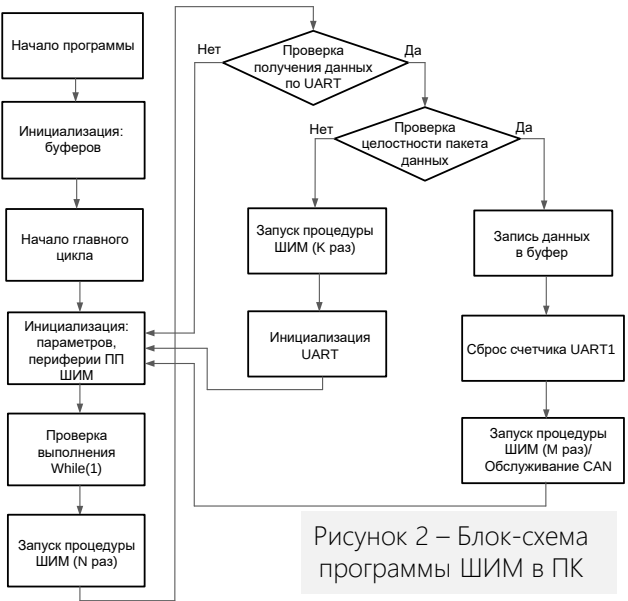
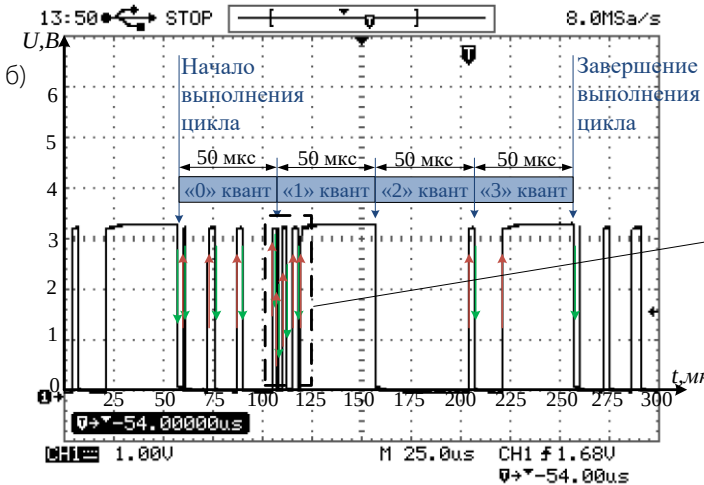
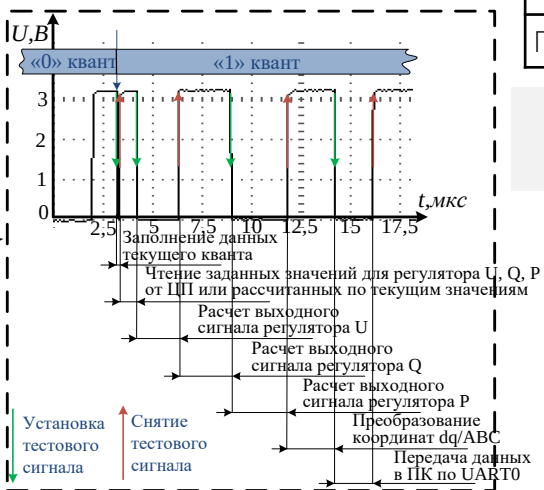


Рисунок 2 – Блок-схема программы ШИМ в ПК



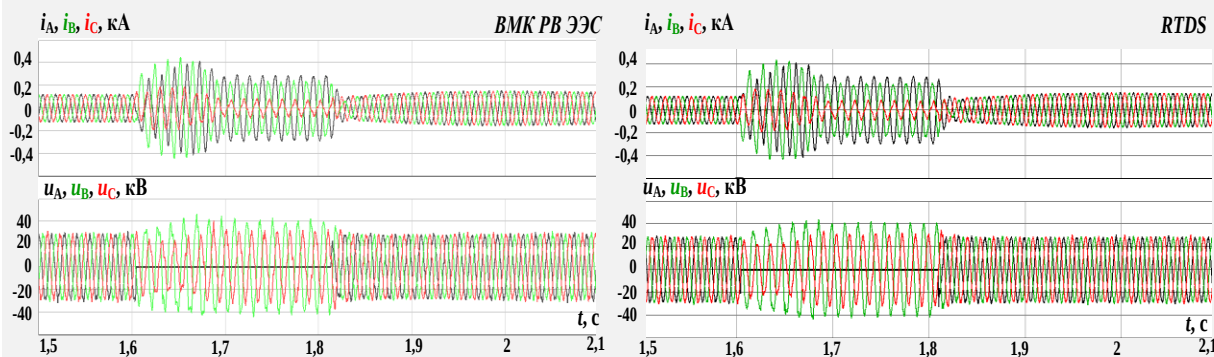
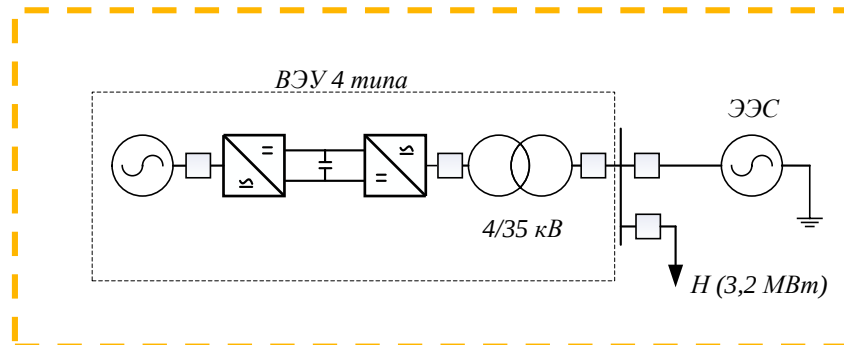
Процедура	Временные затраты
Чтение АЦП	13 мкс
Цифровая фильтрация измеренных данных	4 мкс
Преобразование ($ABC \rightarrow d, q, 0$)	15 мкс
Расчет ($p(t), q(t), s(t)$)	3 мкс
Чтение заданных значений для регулятора U, Q, P от ЦП или рассчитанных по текущим значениям	1 мкс
Расчет уставок регулятора U	2,4 мкс
Расчет уставок регулятора Q	2,7 мкс
Расчет уставок регулятора P	2,7 мкс
Преобразование ($d, q, 0 \rightarrow ABC$)	2,5 мкс
Передача данных в ПК по UART	2 мкс

Затраты времени на выполнение программы ПАЦП

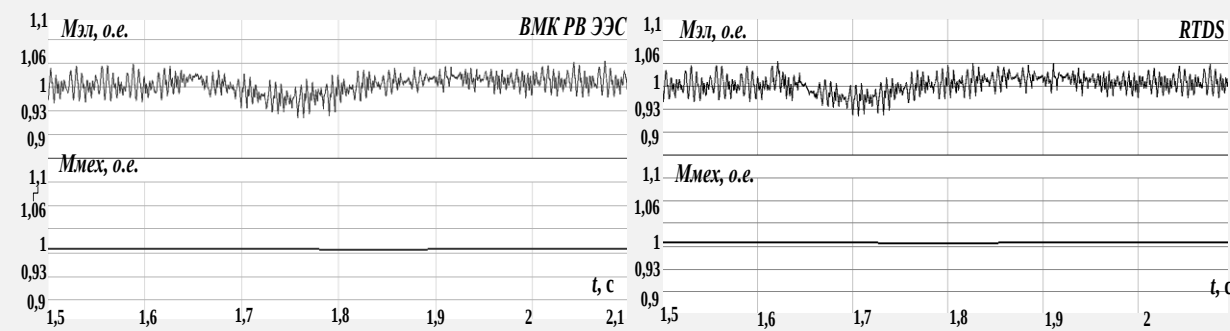
ТЕСТОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СП ВЭУ 4-ГО ТИПА



ИНЖЕНЕРНАЯ
ШКОЛА
ЭНЕРГЕТИКИ



Осциллограммы фазных токов и напряжений
в узле подключения ВЭУ в ЭЭС при однофазном КЗ

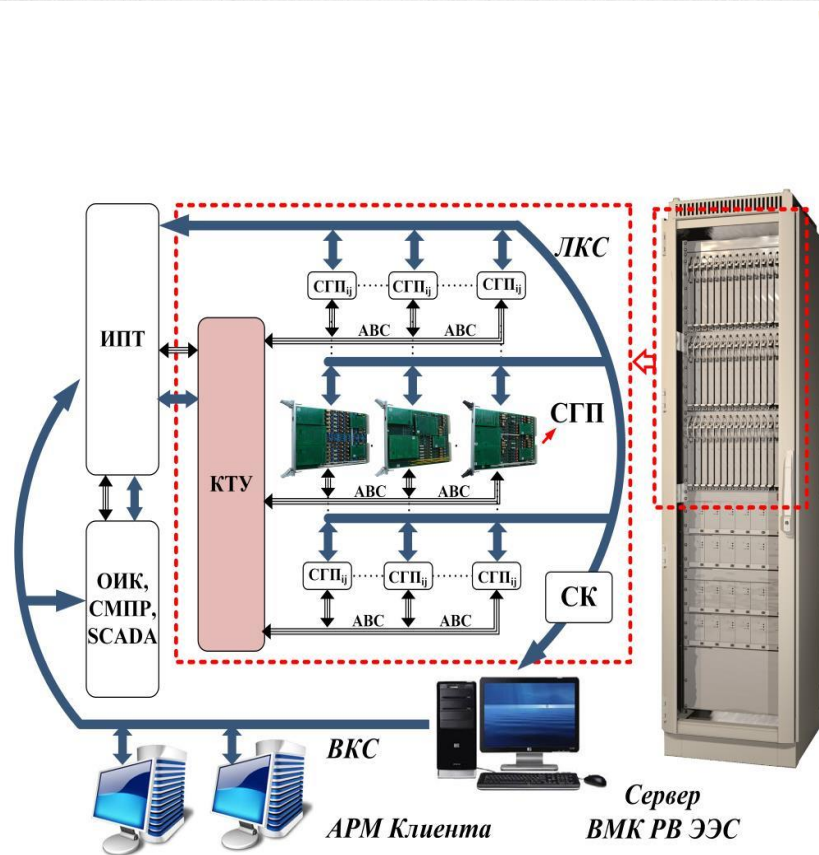


Осциллограммы электромагнитного и механического
моментов ВЭУ при однофазном КЗ

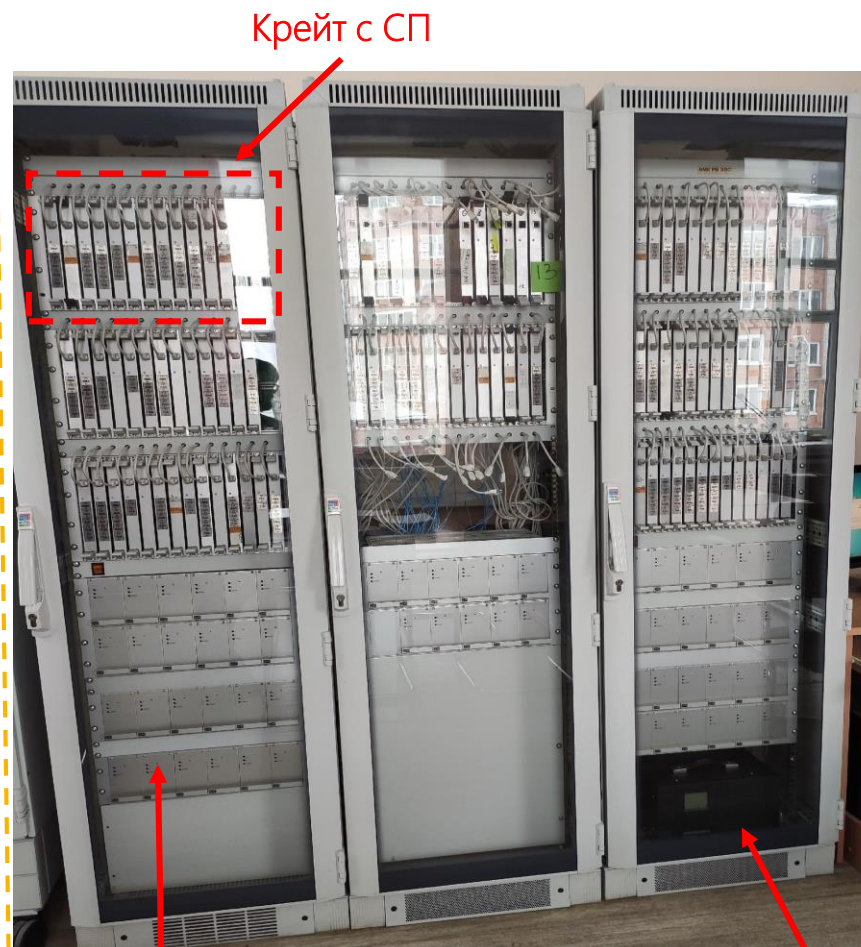
СТРУКТУРНАЯ СХЕМА И ВНЕШНИЙ ВИД ВМК РВ ЭЭС



ИНЖЕНЕРНАЯ
ШКОЛА
ЭНЕРГЕТИКИ



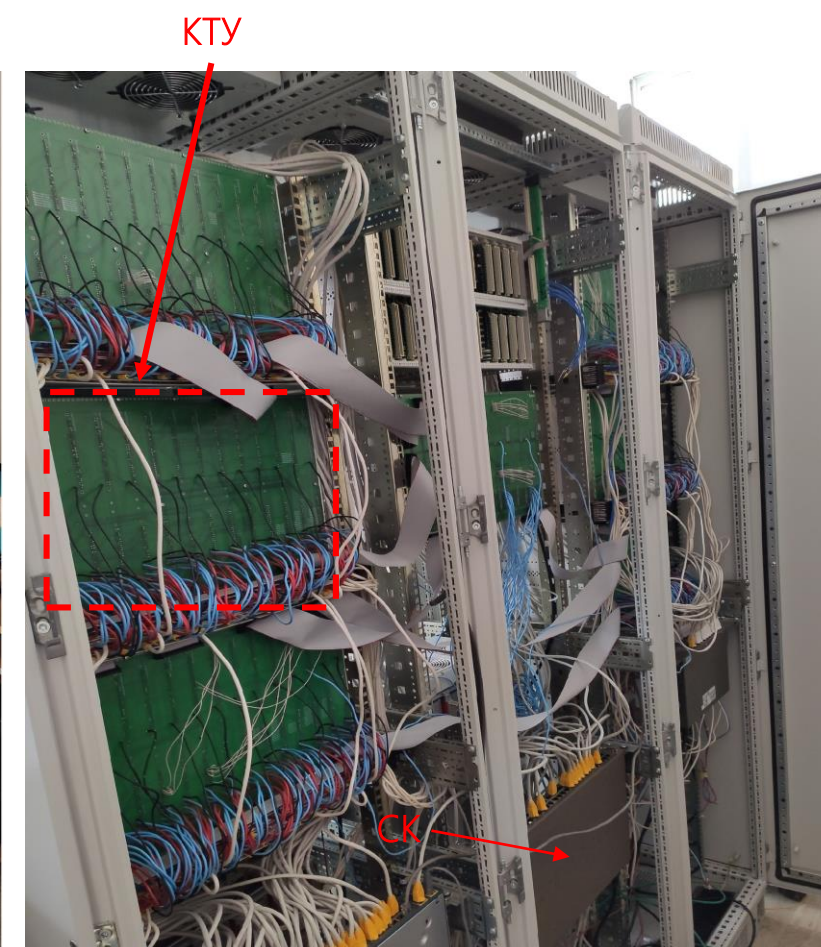
Структурная схема



Крейт с СП

Внешний вид (вид спереди)

Блоки питания



КТУ

Внешний вид (вид сзади)

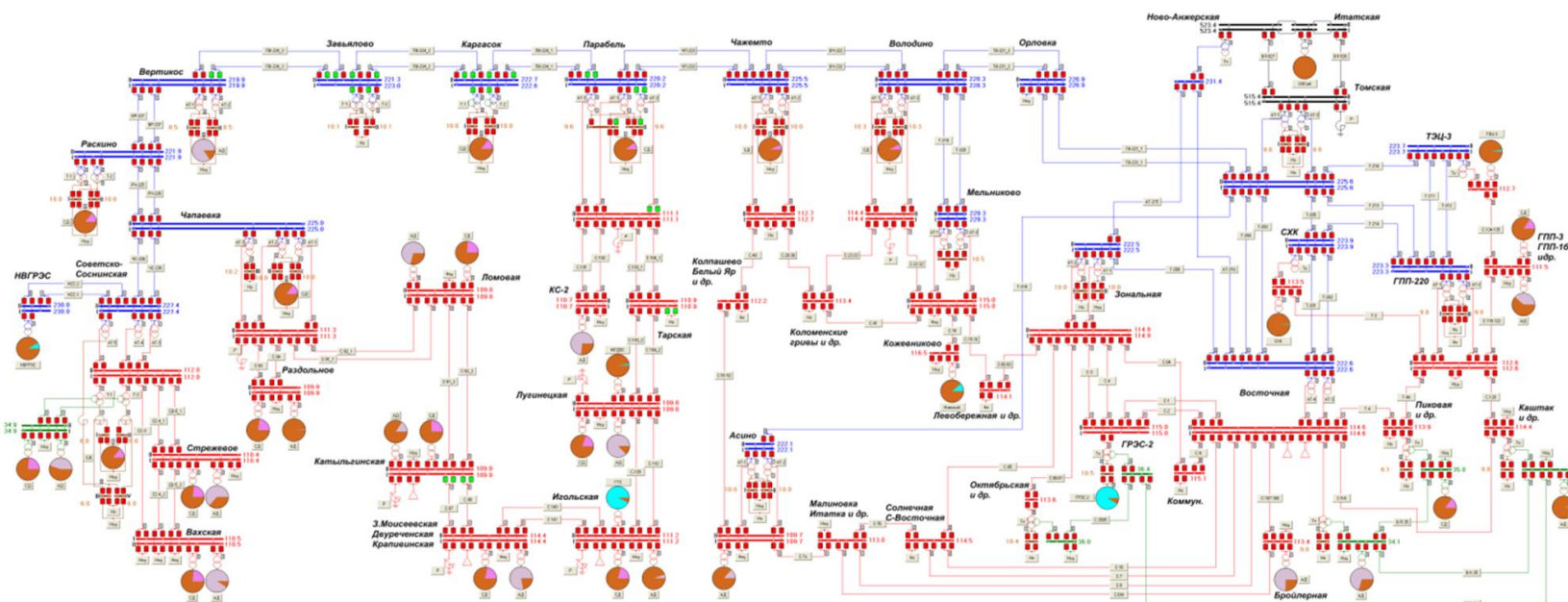
Стабилизатор напряжения питания

СРАВНЕНИЕ С НАТУРНЫМИ ДАННЫМИ



ИНЖЕНЕРНАЯ
ШКОЛА
ЭНЕРГЕТИКИ

Динамическая панель наблюдения и управления Томской ЭЭС в ВМК



В состав схемы входят:

200 трехфазных узлов, 42 электрические машины, 97 линий электропередачи,
42 трансформатора, 63 динамических нагрузки



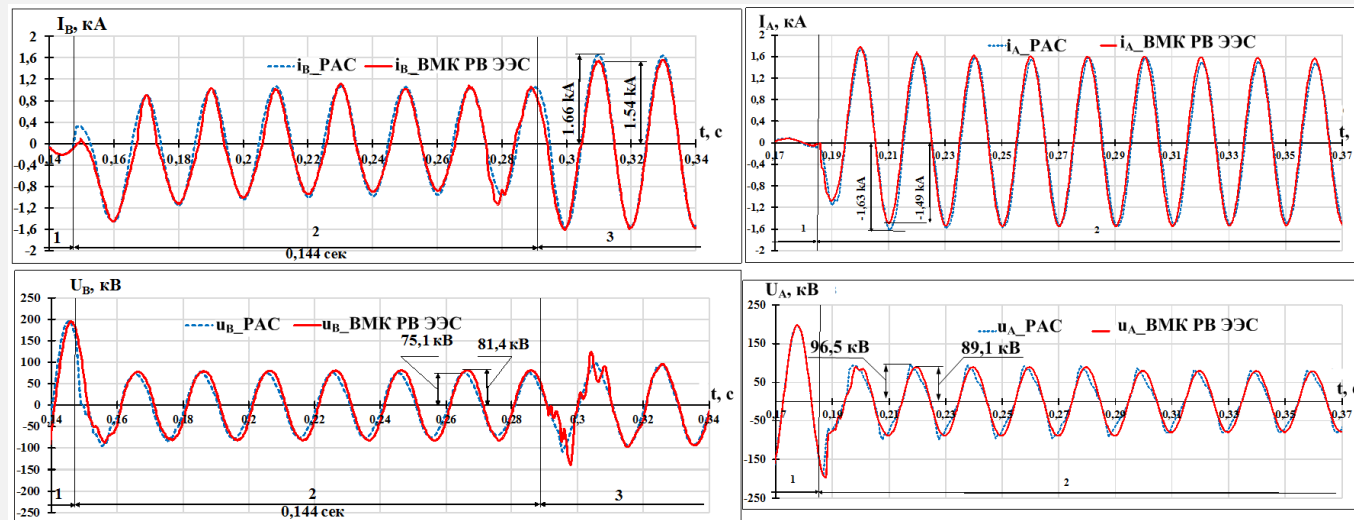
СРАВНЕНИЕ С НАТУРНЫМИ ДАННЫМИ

Наименование подстанции	Уном, кВ	U, кВ	Uоик, кВ	$\Delta U_o-t, \%$
Володино	220	229.46	230	0.22
Асино	220	229.76	230	0.28
Восточная	220	226.33	224	0.81
ГПП-220	220	228.45	226.5	1.12
Зональная	220	225.87	226	0.03

Наим. ЛЭП	P1, МВт	P1оик, МВт	$\Delta P1, \%$	P2, МВт	P2оик, МВт	$\Delta P2, \%$	I, кА	Iоик, кА	$\Delta I, \%$
T-201	52.01	50	4.01	-51.88	-50	3.77	0.148	0.144	3.01
T-202	62.73	62	1.18	-62.62	-62	0.99	0.185	0.184	0.46
T-203	39.15	37	5.81	-39.06	-38	2.79	0.156	0.156	0.22
T-204	32.64	31	5.28	-32.50	-32	1.57	0.131	0.13	0.54
T-208	-64.30	-65	1.07	64.37	64	0.57	0.164	0.164	0.02
T-211	25.27	27	6.42	-25.30	-29	2.75	0.082	0.096	4.57
T-212	24.48	24	1.99	-24.47	-20	2.35	0.067	0.055	1.74
T-213	8.16	9	1.30	-8.10	-9	2.99	0.089	0.091	1.78

Фрагменты динамических таблиц разности напряжений, токов и перетоков активной мощности ЛЭП, полученных с помощью ВМК и ОИК в доаварийном режиме

Осциллограммы тока и напряжения поврежденных фаз В и А при однофазных коротких замыканиях на ЛЭП 220 кВ ВЧ-232 и ПВ-244_1 соответственно



— моделирование

— натурные данные

ВАРИАНТЫ РЕАЛИЗАЦИИ

Переносной вариант моделирующего комплекса

Мобильный вариант моделирующего комплекса –
для тестирования релейной защиты и
противоаварийной автоматики

Стационарный вариант моделирующего комплекса
– для исследования больших энергосистем



НАПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВМК РВ ЭЭС



ИНЖЕНЕРНАЯ
ШКОЛА
ЭНЕРГЕТИКИ

Моделирующий комплекс



Углубленное изучение свойств и процессов эксплуатируемых и проектируемых энергообъектов и энергосистем в целом.

Исследование влияния функционирования объектов возобновляемой генерации, накопителей энергии, устройств FACTS и HVDC технологий на режимы работы энергосистем.

Анализ и оптимизация режимов работы электроэнергетических сетей и систем с целью повышения надежности и эффективности их функционирования.

Всерезимное моделирование модернизируемого и разрабатываемого силового оборудования, а также современных и перспективных информационно-управляющих систем в условиях функционирования, максимально приближенных к реальным.

Разработка платформы для тестирования и настройки систем автоматического управления, релейной защиты и автоматики объектов современных энергосистем.

Советчик диспетчерского и оперативного персонала энергосистем.

Углубленная подготовка и переподготовка персонала.

Обучение студентов ВУЗов.

ОПЫТ МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕАЛЬНЫХ ЭЭС



ИНЖЕНЕРНАЯ
ШКОЛА
ЭНЕРГЕТИКИ

Единая энергетическая система России



ВЫПОЛНЯЕМЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ВМК РВ ЭЭС



ИНЖЕНЕРНАЯ
ШКОЛА
ЭНЕРГЕТИКИ

1. Сравнение с ПВК для расчета электромеханических переходных процессов.
2. Исследование влияния ВИЭ на демпфирование колебаний в ЭЭС.
3. Настройка АРВ в условиях развития современных ЭЭС.
4. Разработка алгоритмов управления силовыми преобразователями.
5. Исследование объединения ЭЭС Томской области.

ОТСУТСТВИЕ ПРОБЛЕМЫ НЕСХОДИМОСТИ РАСЧЕТА



ИНЖЕНЕРНАЯ
ШКОЛА
ЭНЕРГЕТИКИ

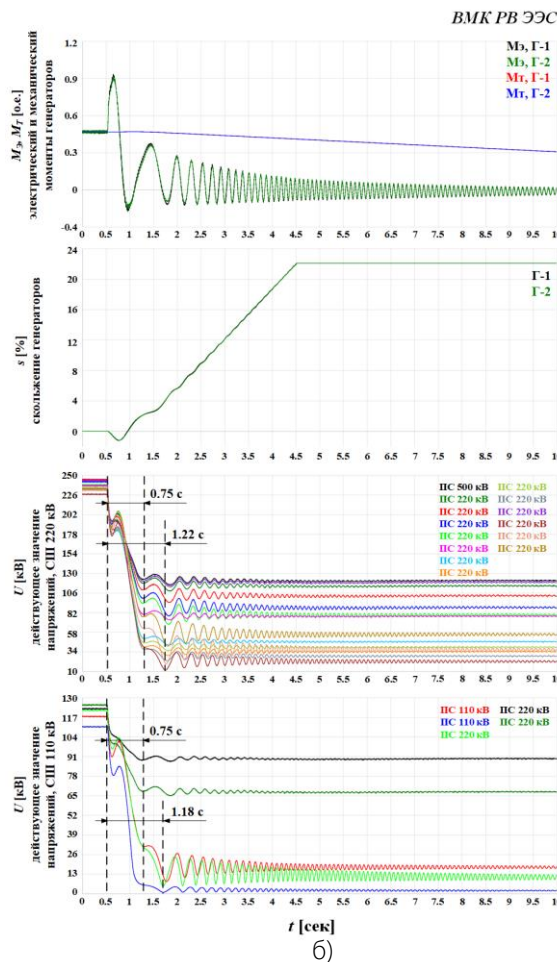
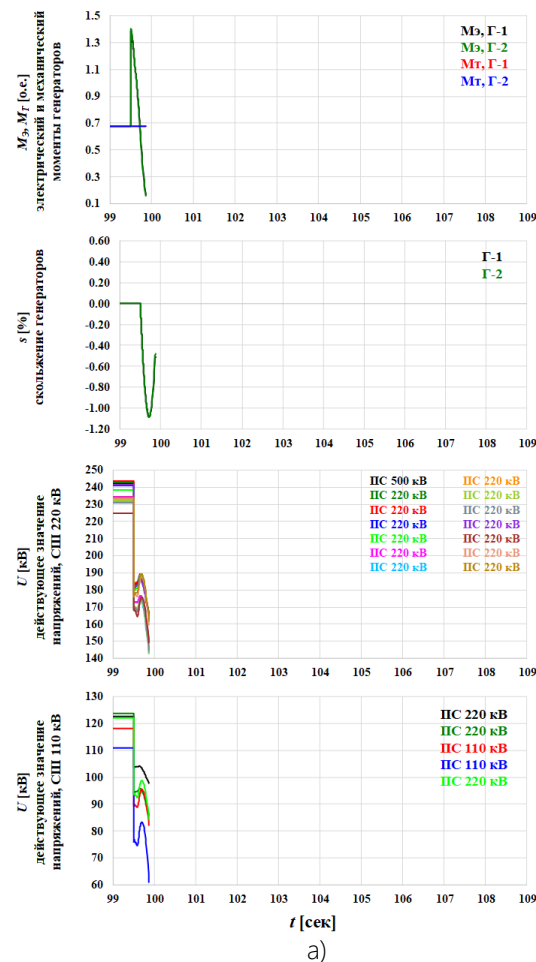
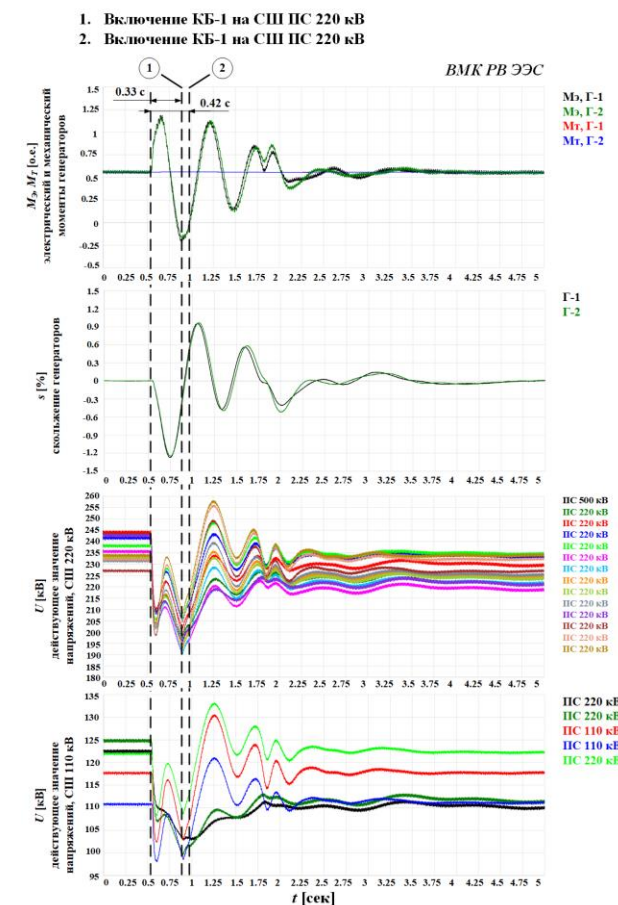


Рисунок 1 – Осциллограммы переходного процесса, вызванного отключением ЛЭП 500 кВ при задании 55% нагрузки в виде постоянных проводимостей, 45% нагрузки в виде СХН и функционировании САУ УШР: а) ПВК; б) ВМК РВ ЭЭС

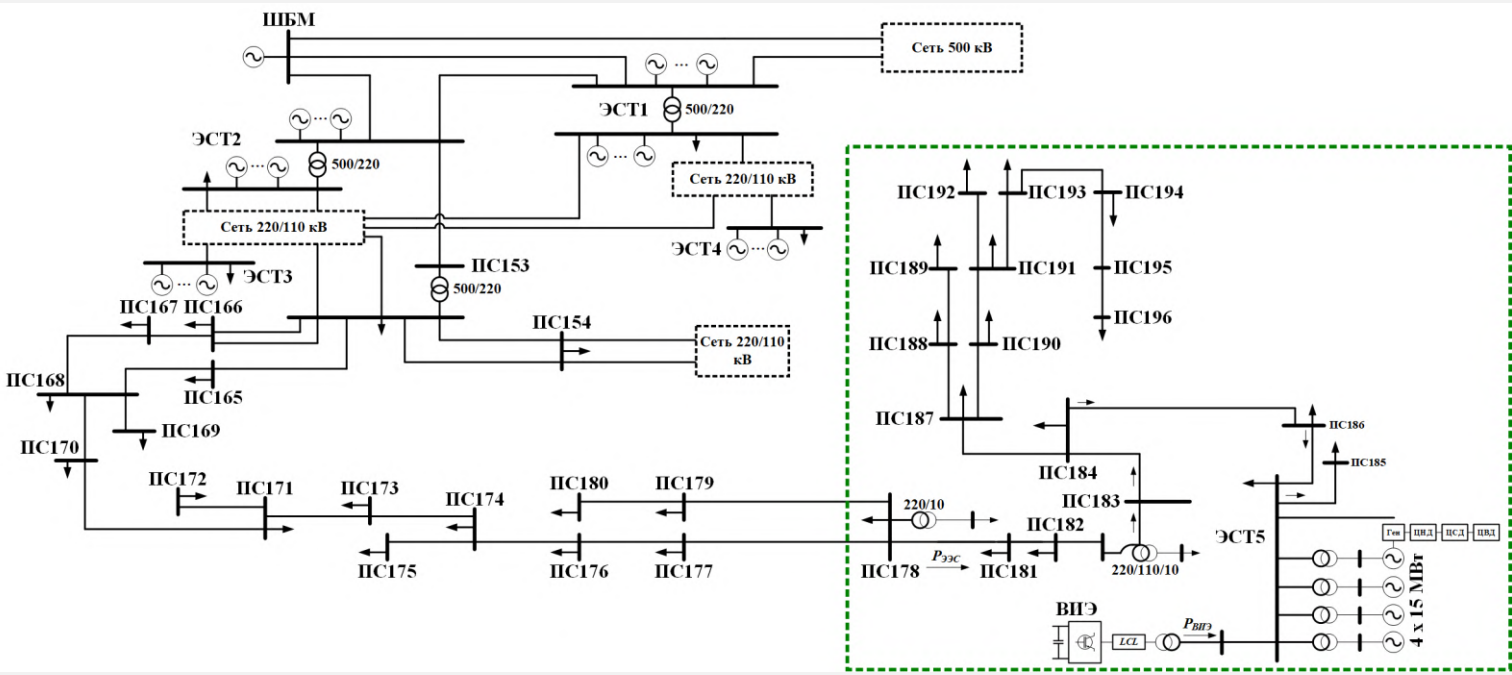
Рисунок 2 – Осциллограммы переходного процесса и действие ПА при отключении ЛЭП 500 кВ при задании 100% нагрузки в виде постоянных проводимостей и функционировании САУ УШР



ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ВИЭ НА КОЛЕБАНИЯ В ЭЭС



ИНЖЕНЕРНАЯ
ШКОЛА
ЭНЕРГЕТИКИ

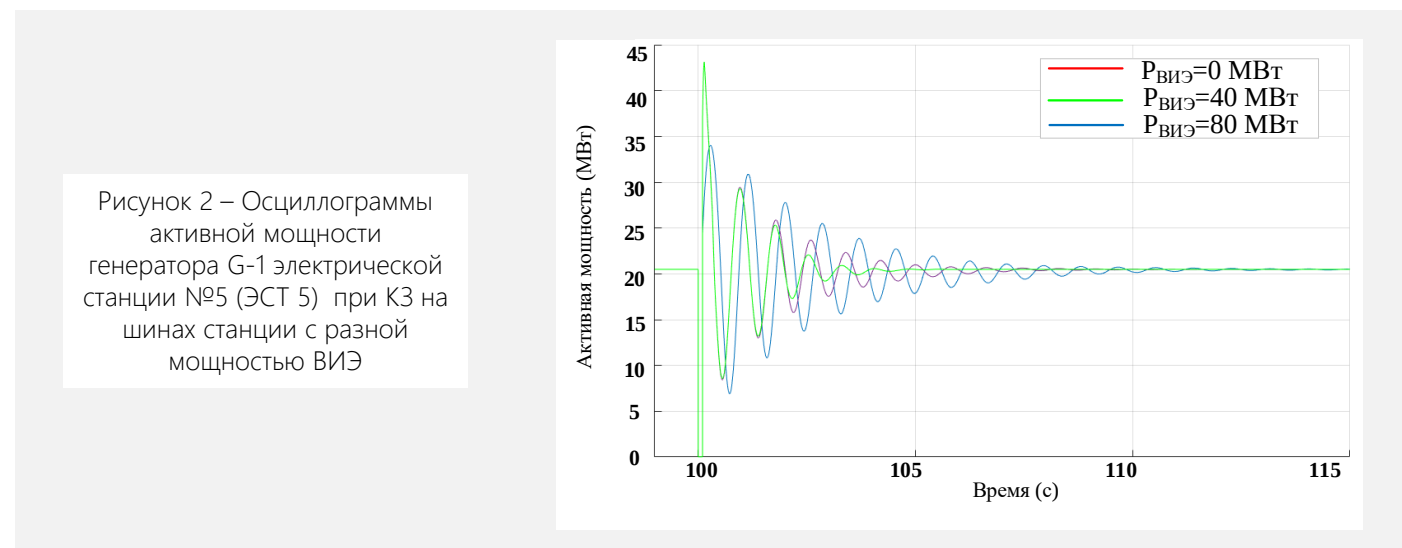
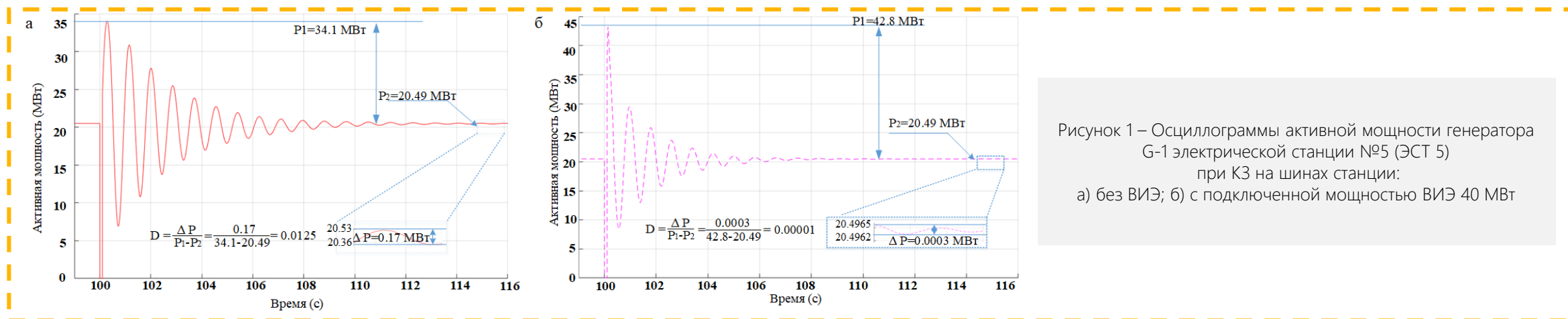


Наименование элемента	Количество
ШБМ	1
Генераторы	50
Трансформаторы и автотрансформаторы	60
ЛЭП	114
Нагрузки	75
УШР	11
ШР	16
КБ	15

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ВИЭ НА КОЛЕБАНИЯ В ЭЭС



ИНЖЕНЕРНАЯ
ШКОЛА
ЭНЕРГЕТИКИ



ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ВИЭ НА КОЛЕБАНИЯ В ЭЭС

Рисунок 1 – Распределение собственных значений при различной мощности объекта ВИЭ и подключении к ПС 183 (а), ПС 186 (б), ПС 185 (в)

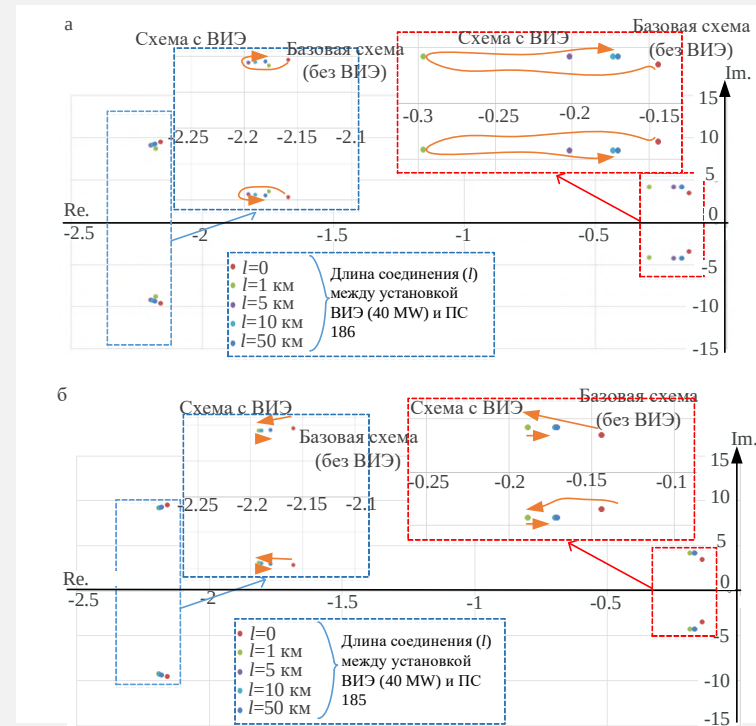
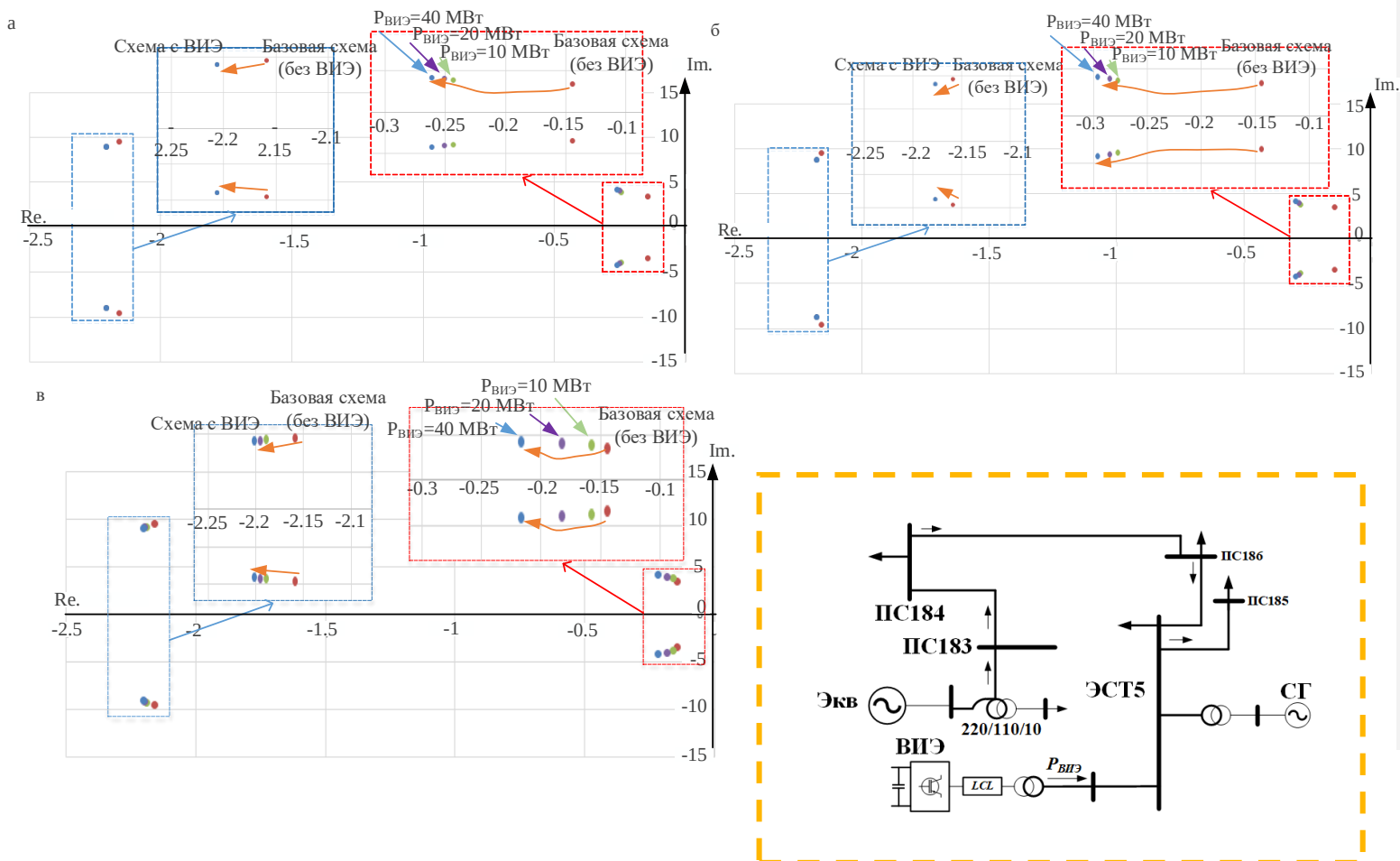


Рисунок 2 – Распределение собственных значений в зависимости от длины линии подключения объекта ВИЭ (40 MW) и подключения в ПС186 (а), ПС 185 (б)

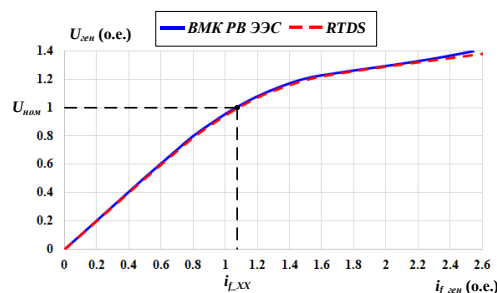
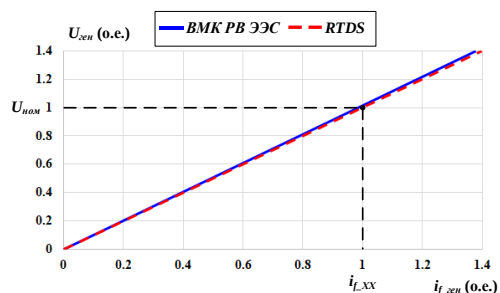
НАСТРОЙКА АРВ В УСЛОВИЯХ РАЗВИТИЯ СОВРЕМЕННЫХ ЭЭС



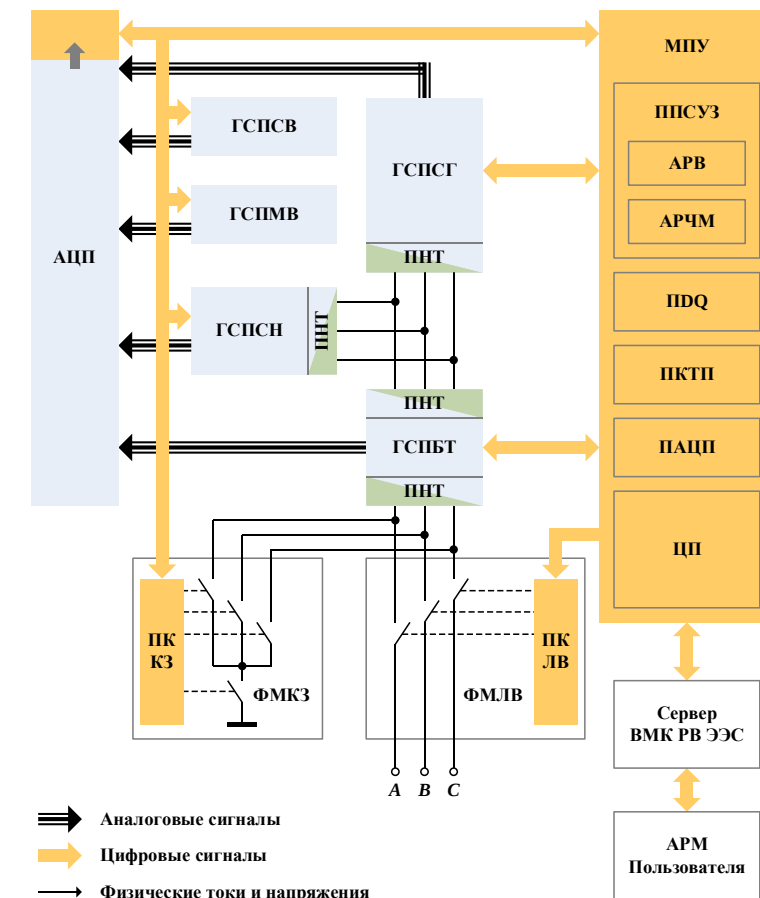
ИНЖЕНЕРНАЯ
ШКОЛА
ЭНЕРГЕТИКИ

Результаты верификации разработанных средств гибридного моделирования энергоблока

1. Разработана универсальная совокупная математическая модель энергоблока, включающая:
 - детальную модель электрической машины;
 - мультимассную модель вала;
 - модель системы возбуждения;
 - библиотеку моделей АРВ отечественного и зарубежного типов;
 - библиотеку моделей регуляторов частоты вращения турбин;
 - модель нагрузки собственных нужд и блочного трансформатора.
2. Предложена концепция настройки АРВ СГ с применением программно-аппаратных средств моделирования электромагнитных переходных процессов, позволяющих достоверно учесть влияние специфики и динамики функционирования современных установок с инверторным включением на конечный результат настройки регуляторов возбуждения разного типа.
3. Сформированы новые положения методики настройки АРВ СГ в современных ЭЭС с объектами ВИЭ и устройствами ГСППТ, позволяющие учесть особенности обозначенных установок при формировании перечня рассматриваемых схемно-режимных условий работы ЭЭС, а также динамику их функционирования при моделировании переходных процессов с целью значительного повышения эффективности настройки регуляторов возбуждения



Характеристика холостого хода генератора:
(а) без учета насыщения, (б) с учетом насыщения



Структурная схема СП энергоблока

НАСТРОЙКА АРВ В УСЛОВИЯХ РАЗВИТИЯ СОВРЕМЕННЫХ ЭЭС



ИНЖЕНЕРНАЯ
ШКОЛА
ЭНЕРГЕТИКИ

1 этап

Выбор параметров настройки АРВ СГ с использованием статической (линеаризованной) модели ЭЭС

Расширение перечня рассматриваемых режимов

Изменение уровня выдаваемой мощности ВИЭ

Изменение условий подключения ВИЭ

Изменение степени продольной компенсации

Изменение уровня загрузки СТАТКОМ

Изменение параметров настройки ВИЭ и ГСППТ

Учет дополнительных контуров и алгоритмов в САУ ВИЭ и ГСППТ

Изменение

$$OK3 = \frac{S_{K3}}{P_{ВИЭ}}$$

Оценка возможности возникновения колебаний на 2 этапе настройки

2 этап

Оценка правильности и эффективности параметров настройки АРВ СГ на динамической модели ЭЭС с применением ВМК РВ ЭЭС

Расширение перечня рассматриваемых возмущений

Тестовые возмущения

Нормативные возмущения

Отключение ВИЭ согласно LVRT

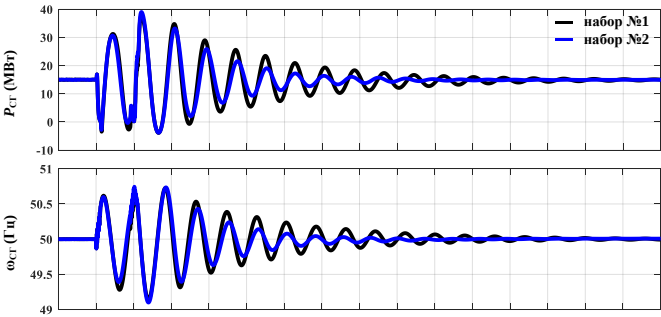
Отключение ВИЭ с повторным включением согласно LVRT

Повторное включение ВИЭ в п/ав режиме

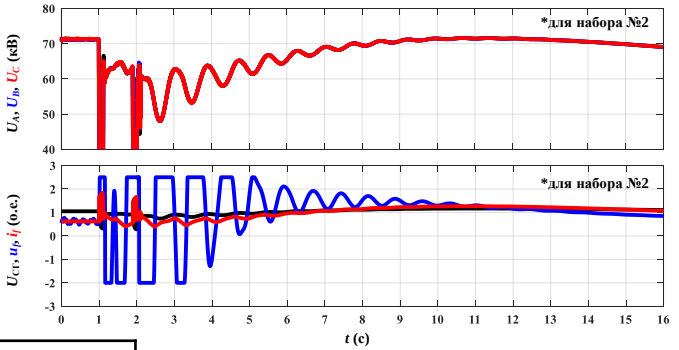
Отключение ВИЭ согласно НVRT

Отключение ВИЭ без возмущения

Ненормативные возмущения



Осциллограммы процессов и результаты анализа эффективности работы АРВ в случае трехфазного КЗ с неуспешным ТАПВ при мощности ВИЭ равной 100% от установленной и $Z_{св} = 0,41$ о.е.



Показатель	Набор параметров	$Z_{св} = 0,41$ о.е.
		% от $P_{уст,ВИЭ}$
		100%
ISE	набор №1*	0,18
	набор №2**	0,14
ISTES	набор №1	65,25
	набор №2	15,78
ISTSE	набор №1	2,16
	набор №2	1,10
$t_{затух}$ (с)	набор №1	10,3
	набор №2	6,8

Предложено применение совокупности из трех квадратичных интегральных показателей качества для количественной оценки эффективности выбранных параметров настройки АРВ СГ на основе результатов моделирования переходных процессов:

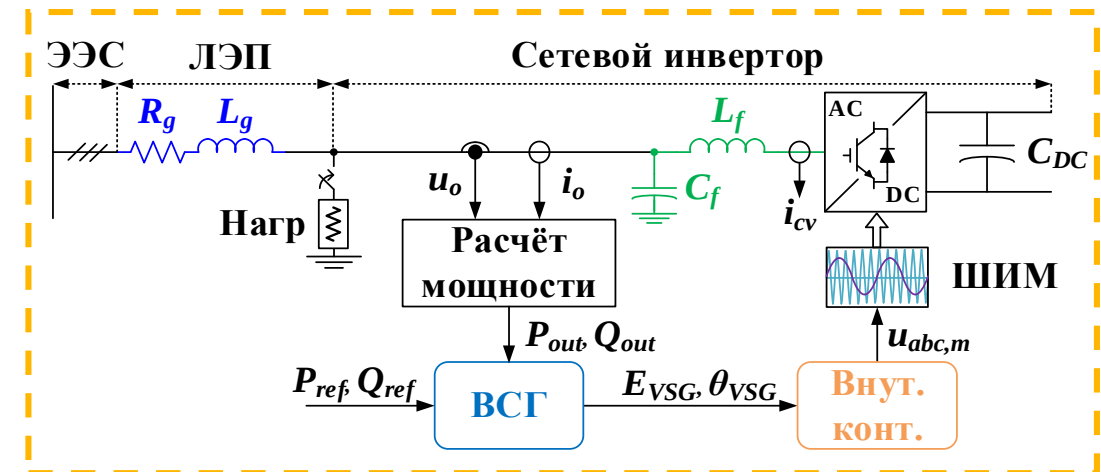
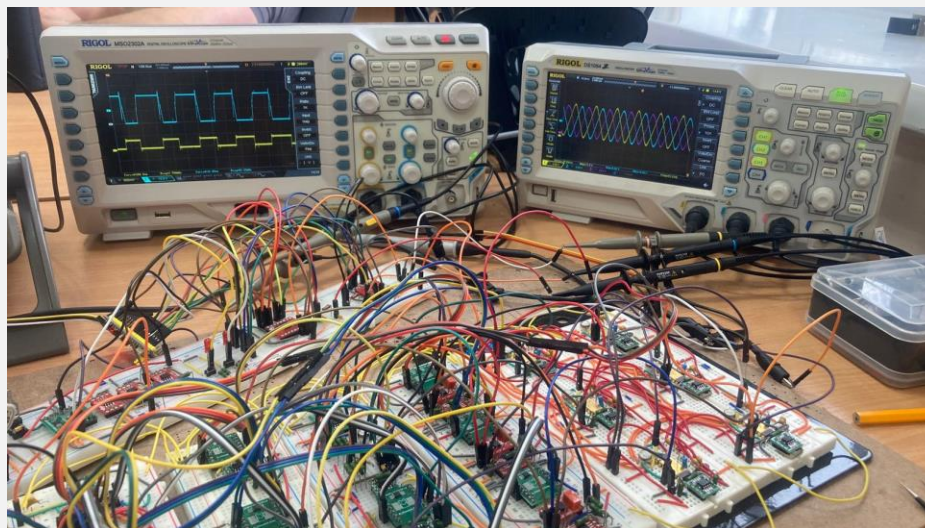
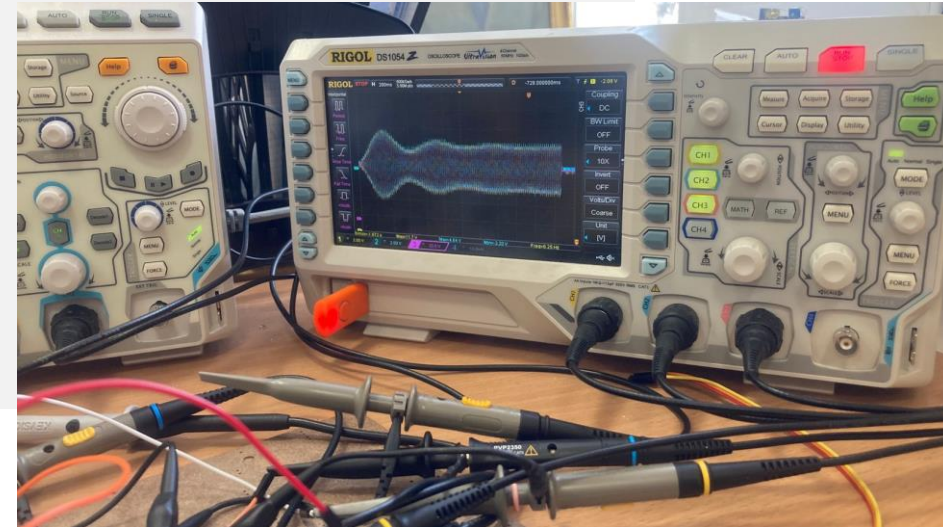
$$ISE = \int_{t=0}^{T=t_{зад}} e^2(t) dt$$

$$ISTES = \int_{t=0}^{T=t_{зад}} (t^2 \cdot e(t))^2 dt$$

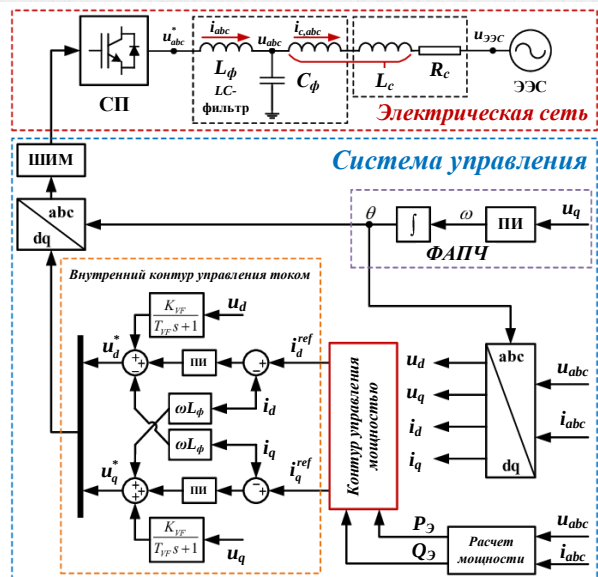
$$ISTSE = \int_{t=0}^{T=t_{зад}} t^2 \cdot e^2(t) dt$$

* Традиционная методика
** Предлагаемая методика

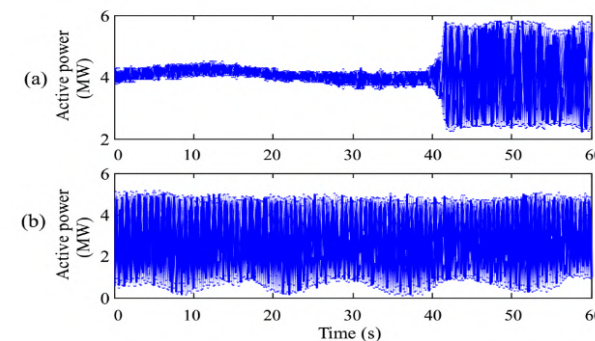
РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ СП В РЕЖИМЕ «ВЕДУЩИЙ»



ПРОБЛЕМЫ. МИРОВОЙ ОПЫТ



Традиционная система управления сетевым инвертором объектов ВИЭ подразумевает режим работы по типу «ведомый» сетью, что приводит к возникновению незатухающих колебаний различной частоты и проблемам обеспечения устойчивости работы ВИЭ в различных режимах



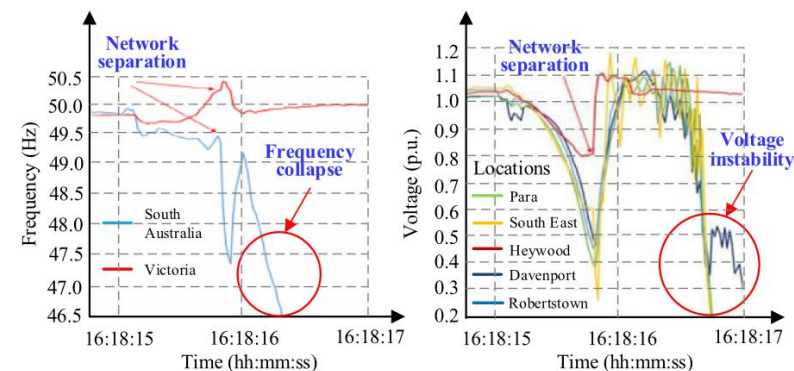
$$OK3 = \frac{S_{\min}}{P_{ВИЭ}} \approx \frac{1}{X_{сети}}$$

OK3 > 3 – сильная сеть,
OK3 < 3 – слабая сеть

Колебания активной мощности в энергосистеме Синьцзян-Уйгурского автономного района Китая (2016)



Внедрение объектов ВИЭ приводит к снижению общей инерции системы, что способствует существенным по скорости и глубине снижениям частоты при возмущениях

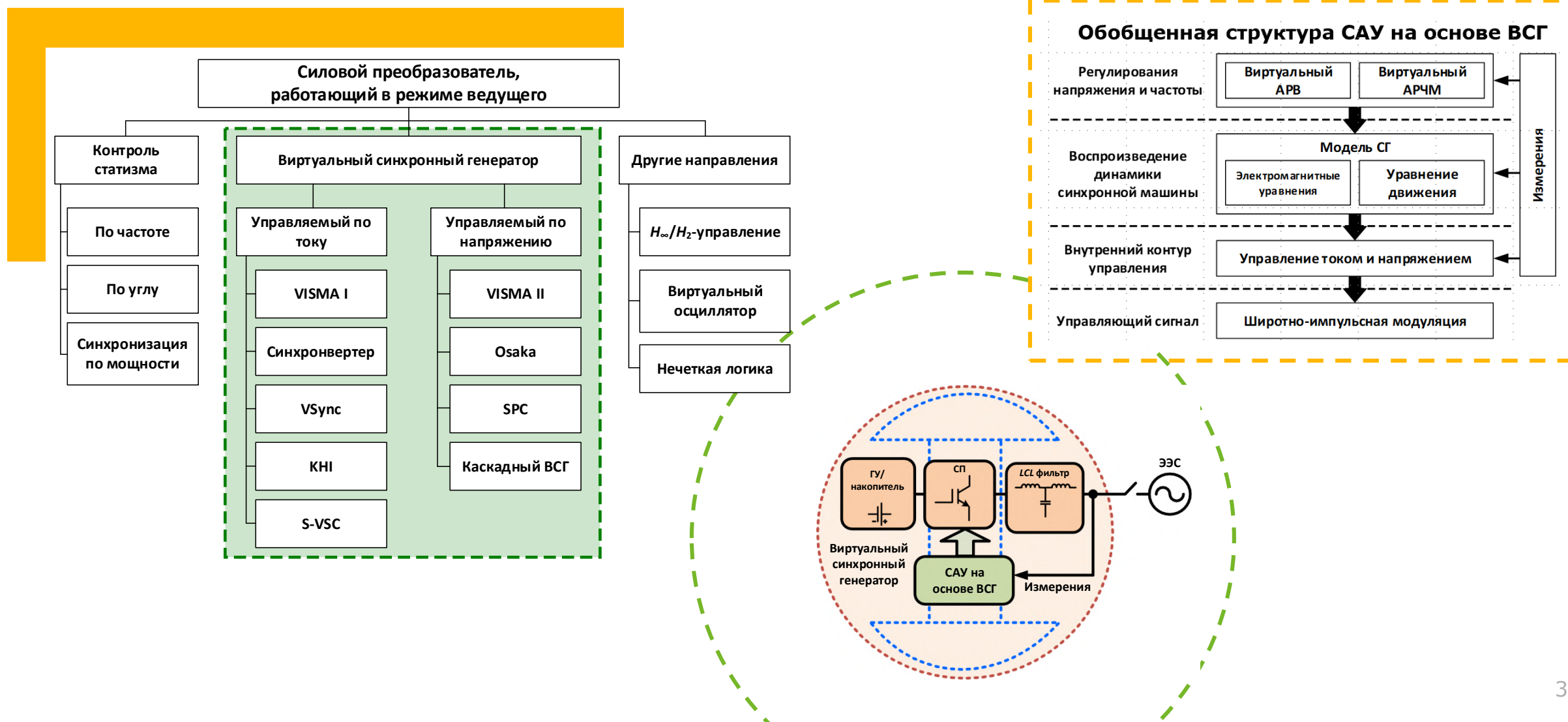


Авария в энергосистеме Австралии со скоростью снижения частоты 6 Гц/с (2016)

ВАРИАНТ РЕАЛИЗАЦИИ КОНЦЕПЦИИ «ВЕДУЩИЙ» СП



ИНЖЕНЕРНАЯ
ШКОЛА
ЭНЕРГЕТИКИ

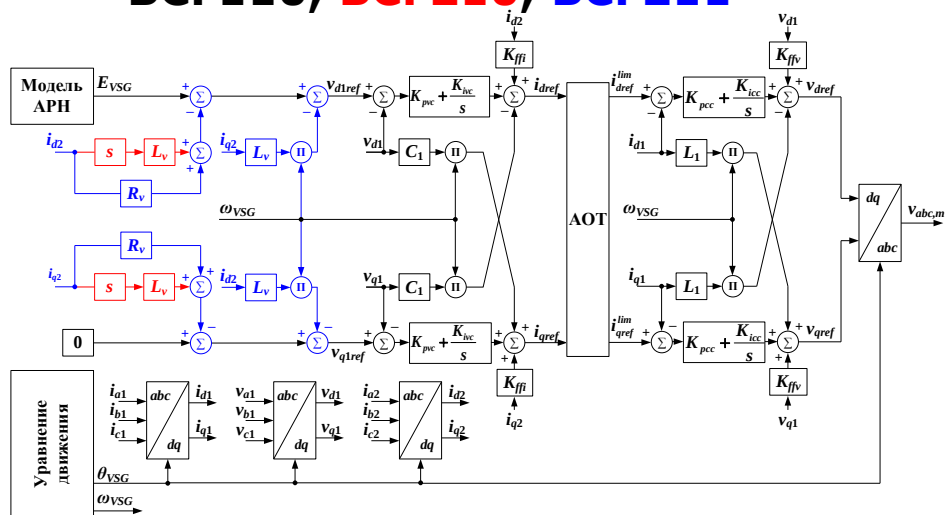


ОБОБЩЕННЫЕ СТРУКТУРЫ ВСГ

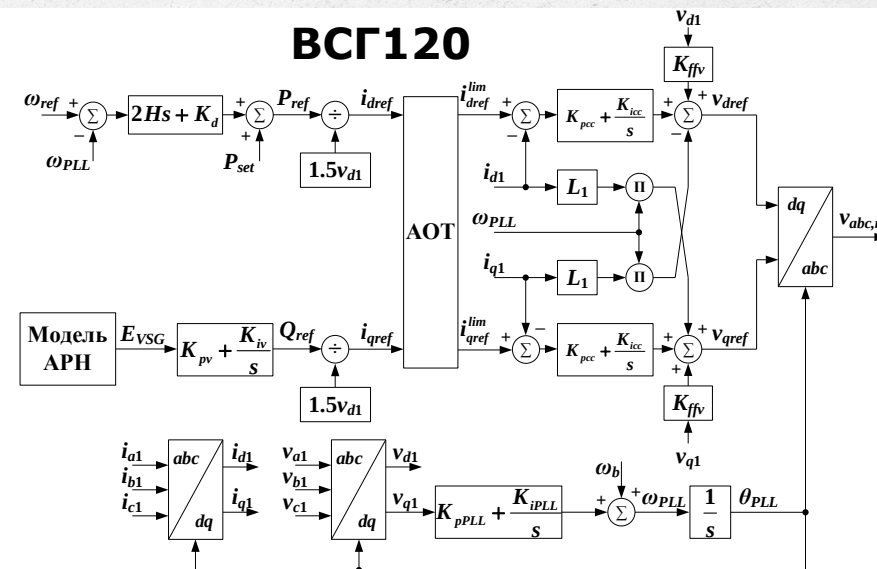


ИНЖЕНЕРНАЯ
ШКОЛА
ЭНЕРГЕТИКИ

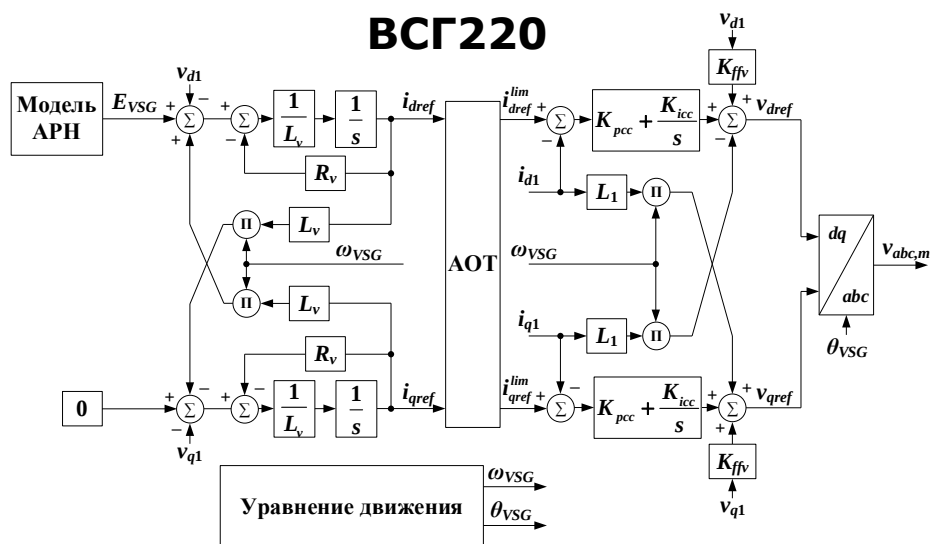
ВСГ110, ВСГ210, ВСГ211



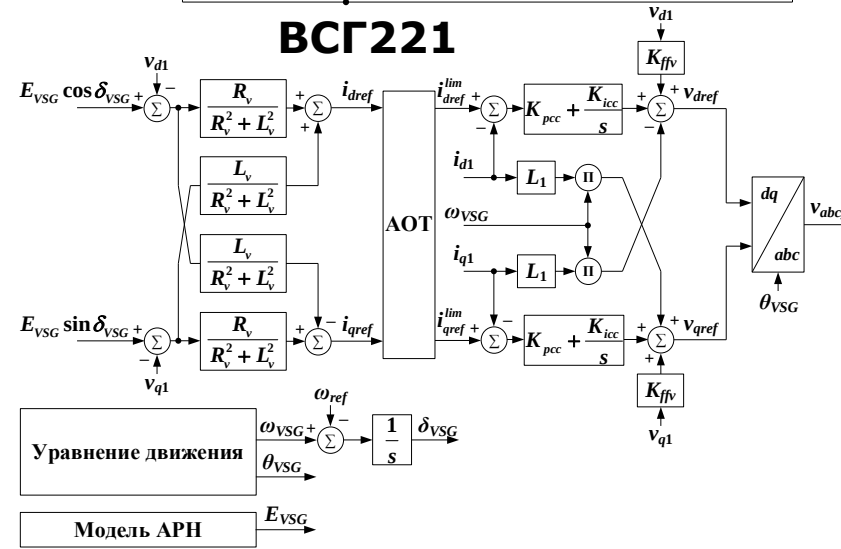
ВСГ120



ВСГ220



ВСГ221



АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Модели ВСГ, управляемые по напряжению, **(ВСГ110, ВСГ210 и ВСГ211)** оказались самыми надежными и эффективными среди всех остальных. Отсутствие виртуального сопротивления в модели ВСГ120 приводит к самой быстрой скорости отклика при любых возмущениях. Однако это приводит к постоянному перерегулированию и большему отклонению частоты. Добавление виртуальных сопротивлений исправляет ситуацию. Таким образом, **наиболее оптимальной структурой ВСГ можно назвать модель ВСГ210**, но ей присуща фундаментальная проблема взаимовлияния мощностей.

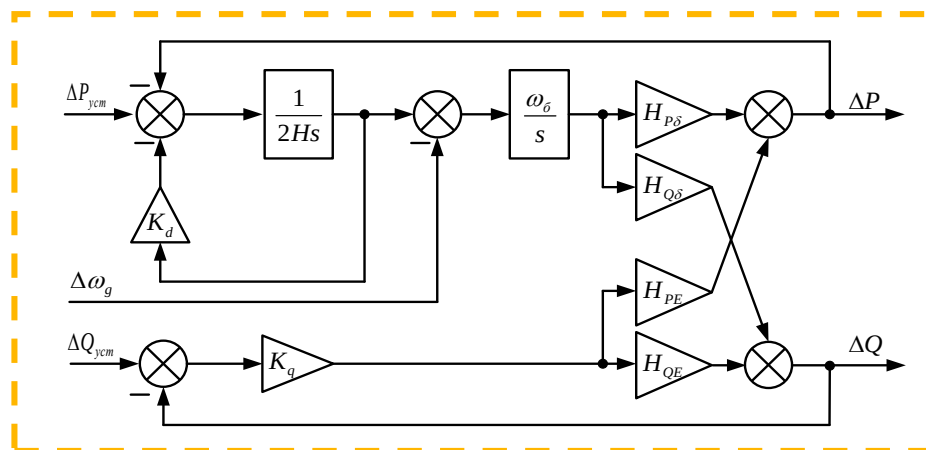
Проверяемое свойство	ВСГ110	ВСГ120	ВСГ210	ВСГ211	ВСГ220	ВСГ221
Функционирование в слабых сетях	+	+	+	+	+	+
Качество электрической энергии	+	+	+	+	+	+
Характер первичного отклика	+/-	-	+	+	+	+
Взаимозависимость активной и реактивной мощностей	+	+/-	+/-	+/-	+	+
Инерционный отклик и первичное быстродействующее регулирование частоты	-	-	+	+	+	+
Реакция при внешнем малом возмущении	+/-	-	+	+	+	+
Влияние АОТ	+	-	+	+	-	-
Реакция на большое возмущение	+	-	+	-	-	-
Величина области устойчивости	+	+	+	+/-	-	-

ПРОБЛЕМАТИКА МОДЕЛИ ВСГ-Н*



ИНЖЕНЕРНАЯ
ШКОЛА
ЭНЕРГЕТИКИ

Структура линейризованной упрощенной модели ВСГ-Н



$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{dP/d\delta} & H_{dP/dE} \\ H_{dQ/d\delta} & H_{dQ/dE} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta E \end{bmatrix}$$

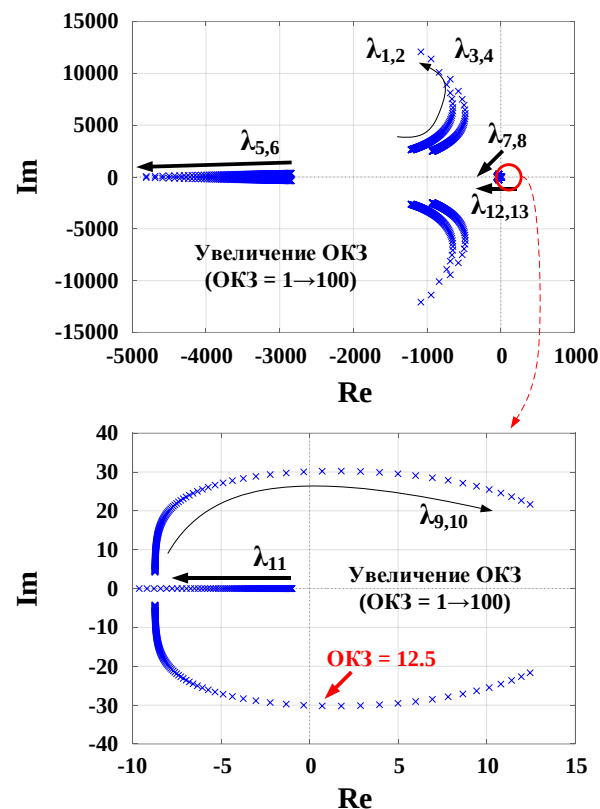
Выходная мощность ВСГ-Н

$$H_{dP/d\delta} = \frac{E_0 \cdot R \cdot U \cdot \sin \delta_0 - 2 \cdot E_0 \cdot R_v \cdot U \cdot \sin \delta_0 + E_0 \cdot U \cdot X \cdot \cos \delta_0}{R^2 + X^2}$$

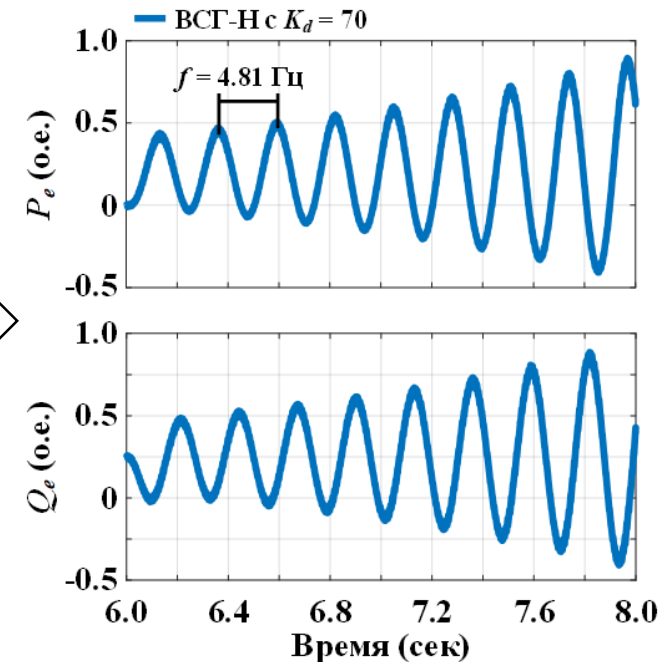
$$H_{dQ/d\delta} = \frac{-E_0 \cdot R \cdot U \cdot \cos \delta_0 + E_0 \cdot U \cdot X \cdot \sin \delta_0 - 2 \cdot E_0 \cdot U \cdot X_v \cdot \sin \delta_0}{R^2 + X^2}$$

$$H_{dP/dE} = \frac{2 \cdot E_0 \cdot R - 2 \cdot E_0 \cdot R_v - R \cdot U \cdot \cos \delta_0 + 2 \cdot R_v \cdot U \cdot \cos \delta_0 + U \cdot X \cdot \sin \delta_0}{R^2 + X^2}$$

$$H_{dQ/dE} = \frac{-2 \cdot E_0 \cdot X_v + 2 \cdot E_0 \cdot X - R \cdot U \cdot \sin \delta_0 - U \cdot X \cdot \cos \delta_0 + 2 \cdot U \cdot X_v \cdot \cos \delta_0}{R^2 + X^2}$$



Корневой годограф линейризованной детальной модели ВСГ-Н в пространстве состояний



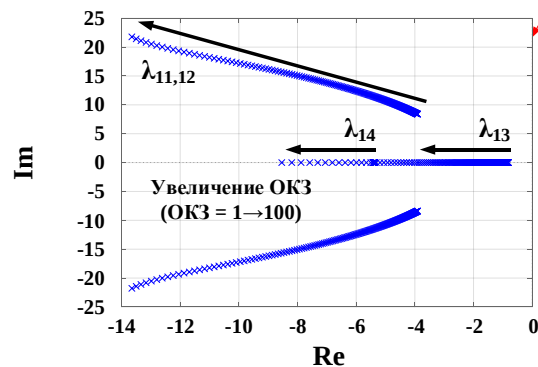
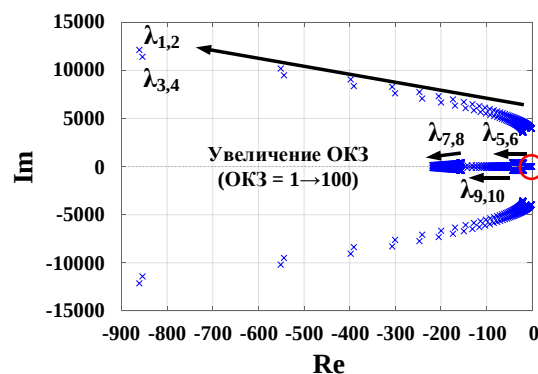
Результаты моделирования для модели ВСГ-Н при OK3=12.5

*Примечание: ВСГ-Н = ВСГ210

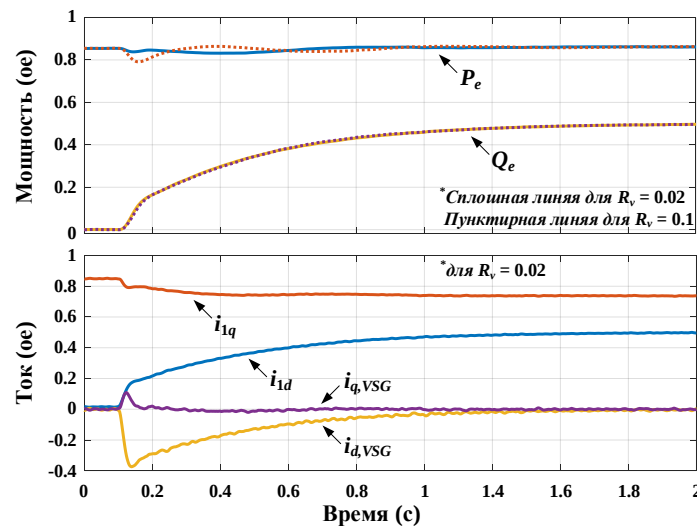
РАЗРАБОТАННАЯ СТРУКТУРА ВСГ-Т



ИНЖЕНЕРНАЯ
ШКОЛА
ЭНЕРГЕТИКИ

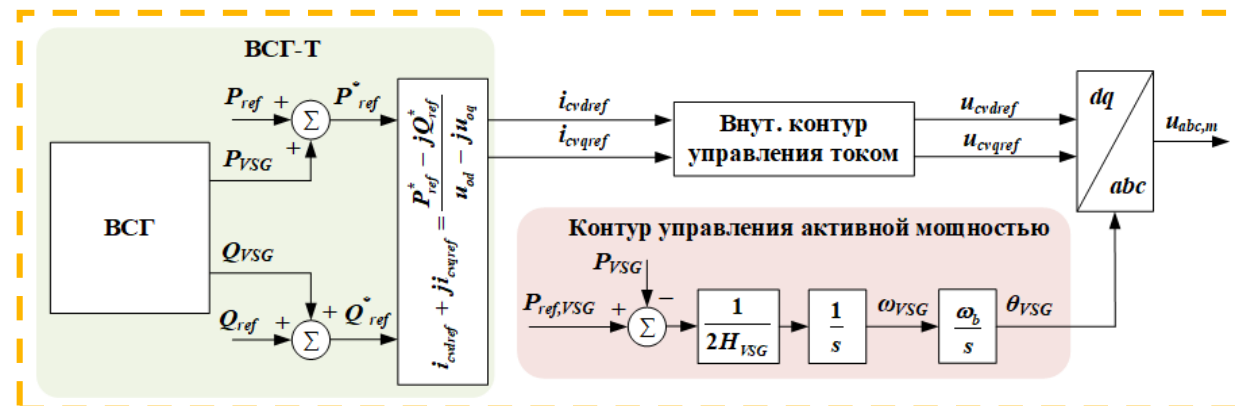
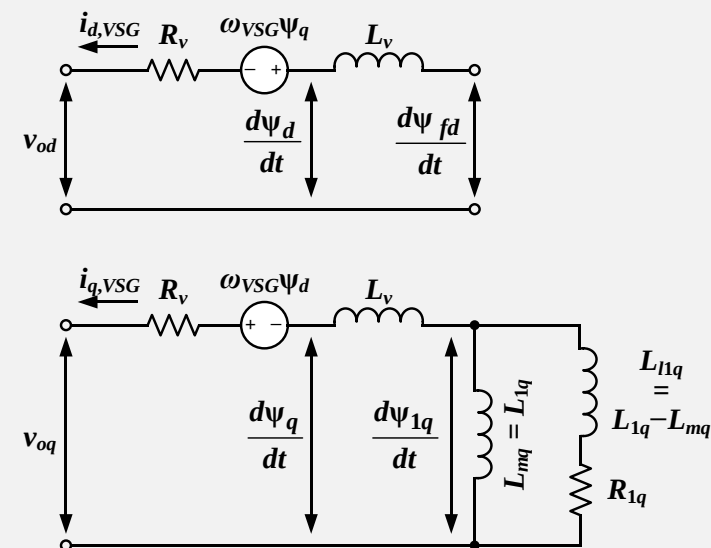


Корневой годограф модели ВСГ-Т в пространстве состояний, демонстрирующий устойчивое функционирование при любом ОКЗ



При изменении уставки по РМ отсутствует влияние на АМ

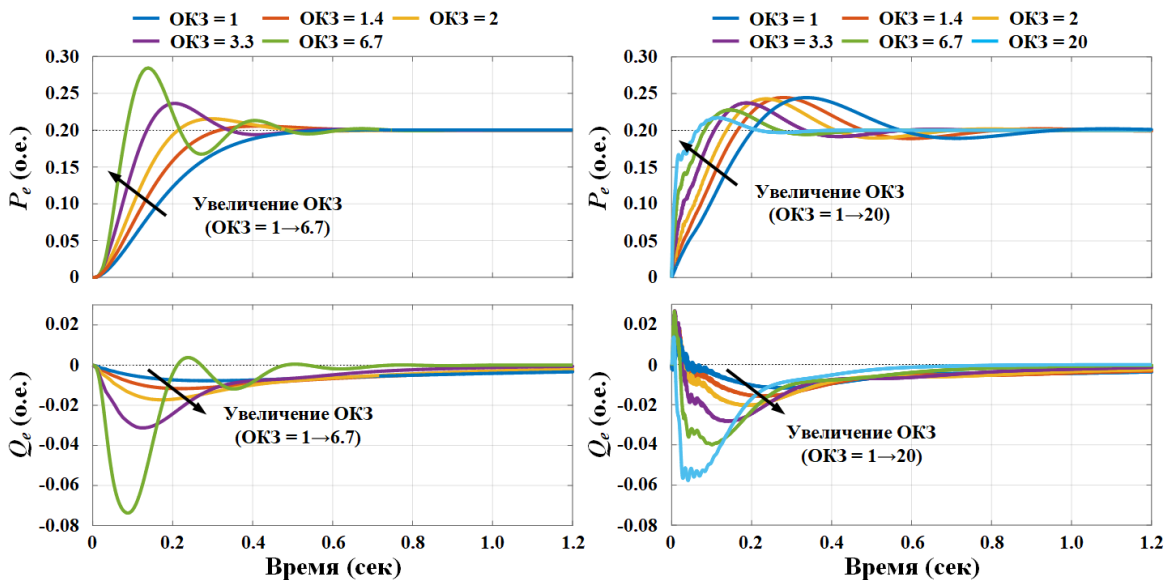
Эквивалентная схема ВСГ-Т



СРАВНЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВСГ-Н И ВСГ-Т



ИНЖЕНЕРНАЯ
ШКОЛА
ЭНЕРГЕТИКИ



Переходные характеристики моделей (а) ВСГ-Н и (б) ВСГ-Т при ступенчатом увеличении $P_{уст}$ от 0 до 0.2 о.е. для разных значений ОКЗ

Показатели динамического отклика

Вид ВСГ	ВСГ-Н			ВСГ-Т		
ОКЗ	t_r (с)	t_s (с)	ζ	t_r (с)	t_s (с)	ζ
1	0.297	0.485	0.901	0.161	0.874	0.423
1.4	0.198	0.497	0.753	0.133	0.738	0.419
2	0.141	0.441	0.635	0.112	0.633	0.426
3.3	0.089	0.465	0.483	0.087	0.507	0.449
6.7	0.048	0.567	0.284	0.065	0.383	0.490
20	Неустой.	Неустой.	Неустой.	0.043	0.193	0.529

СРАВНЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВСГ-Н И ВСГ-Т

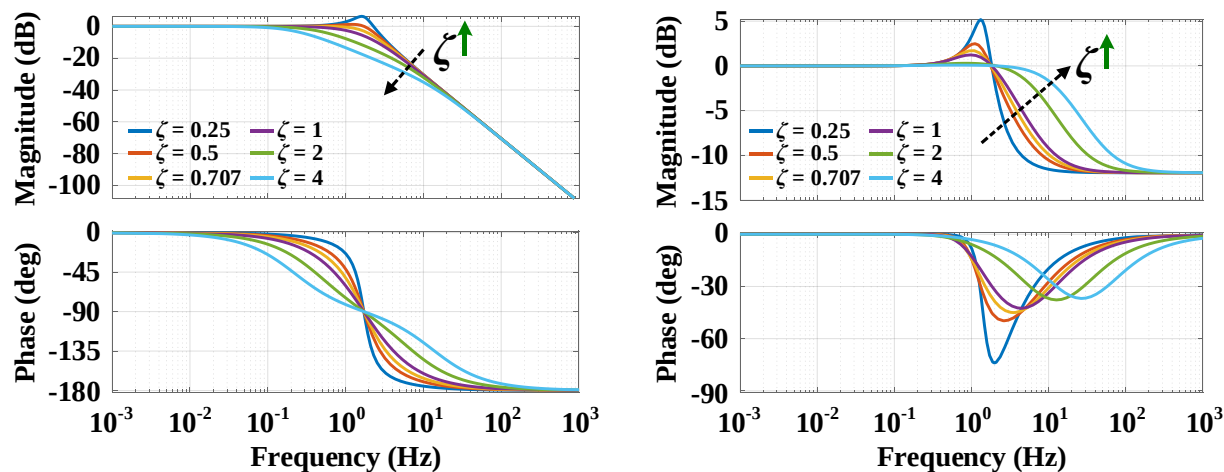


Рисунок 1 – ЛАФЧХ зависимости выходной от входной активной мощности ($W(p) = \Delta P_{out} / \Delta P_{ref}$):
а) ВСГ-Н; б) ВСГ-Т

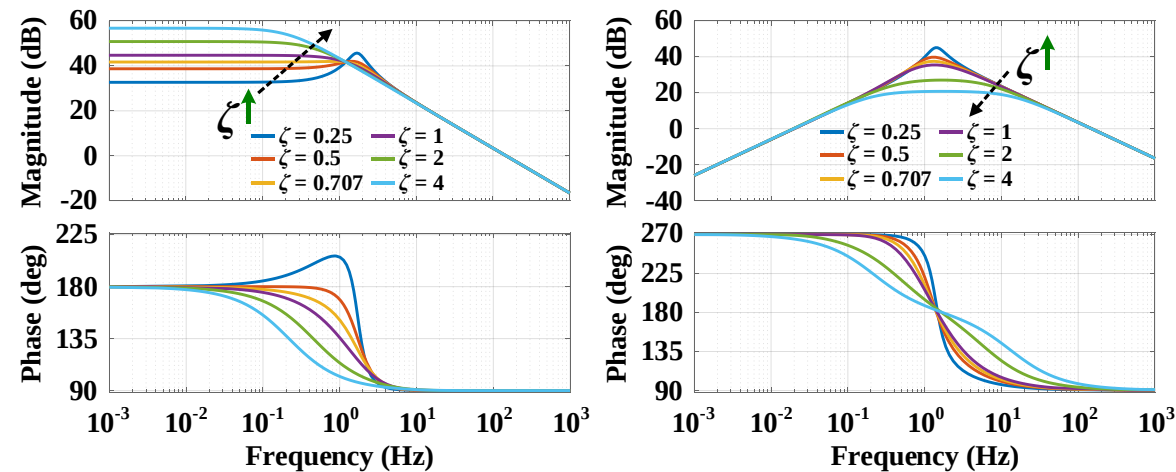


Рисунок 2 – ЛАФЧХ зависимости выходной активной мощности от частоты сети
($W(p) = \Delta P_{out} / \Delta \omega_g$): а) ВСГ-Н; б) ВСГ-Т

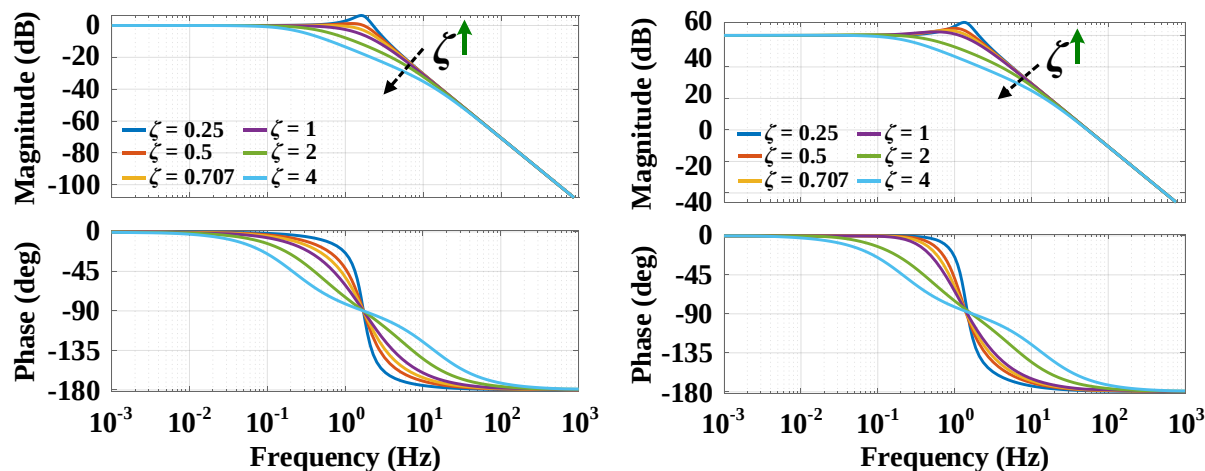


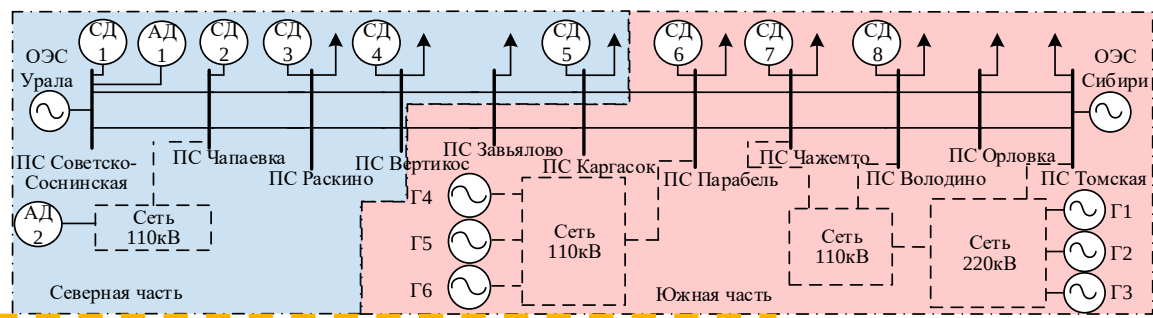
Рисунок 3 – ЛАФЧХ зависимости частоты ВСГ от частоты сети
($W(p) = \Delta \omega_{VSG} / \Delta \omega_g$): а) ВСГ-Н; б) ВСГ-Т

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЪЕДИНЕНИЯ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ



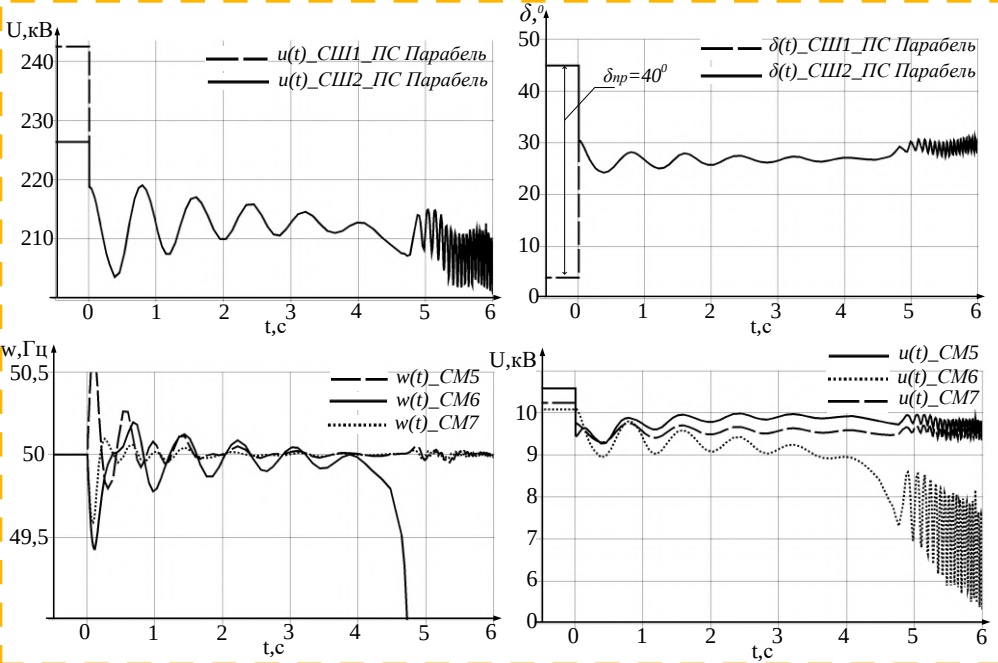
ИНЖЕНЕРНАЯ
ШКОЛА
ЭНЕРГЕТИКИ

Схема транзита ПС 500 кВ Томская –
Нижневартовская ГРЭС



Величины предельных углов включения на параллельную работу на
различных ПС объединения

ПС объединения	Предельный угол ($\delta, ^\circ$)	
	Опережает вектор напряжения ОЭС Урала	Опережает вектор напряжения ОЭС Сибири
ПС Парabelь	40 ⁰	38 ⁰
ПС Каргасок	49 ⁰	43 ⁰
ПС Завьялово	50 ⁰	46 ⁰
ПС Вертикос	54 ⁰	50 ⁰
ПС Раскино	57 ⁰	52 ⁰
ПС Чапаевка	62 ⁰	57 ⁰
ПС Советско- Соснинская	66 ⁰	60 ⁰

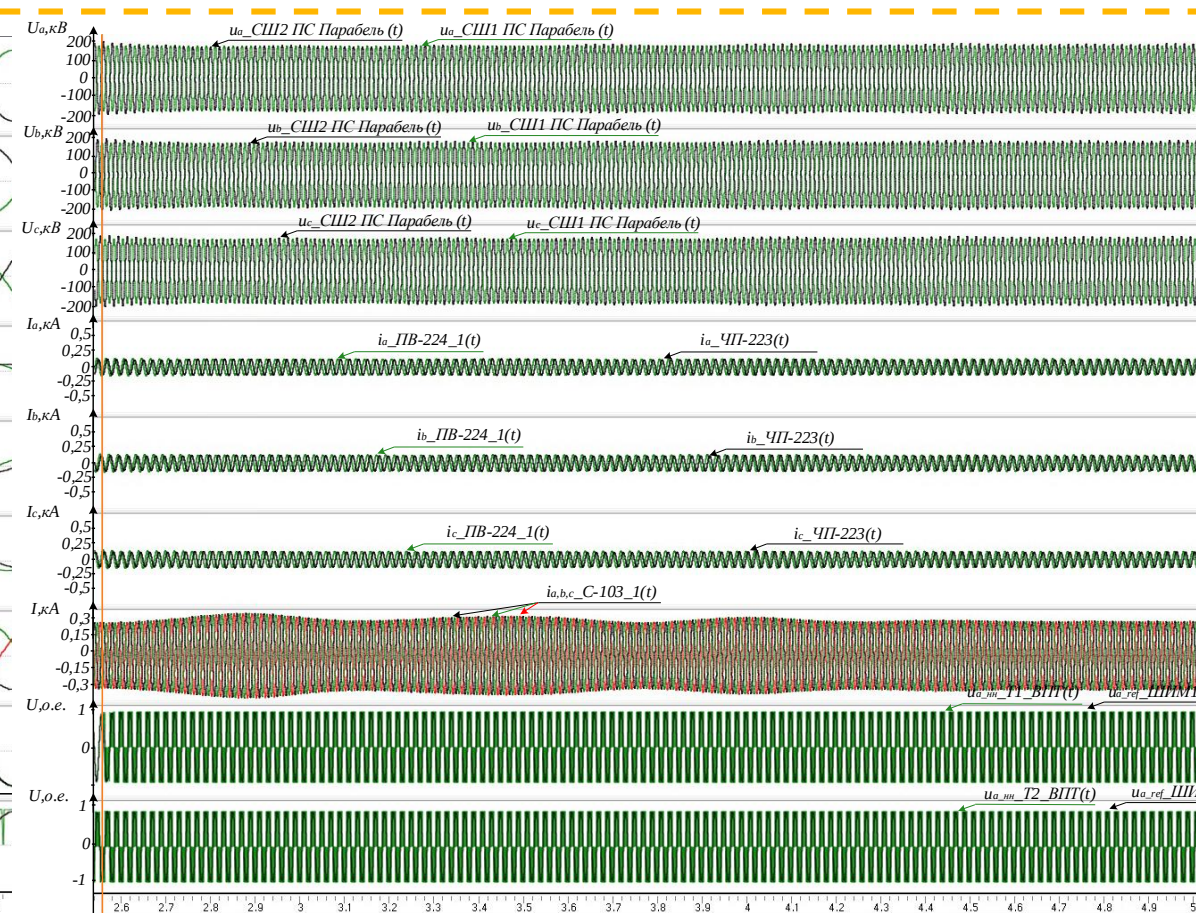
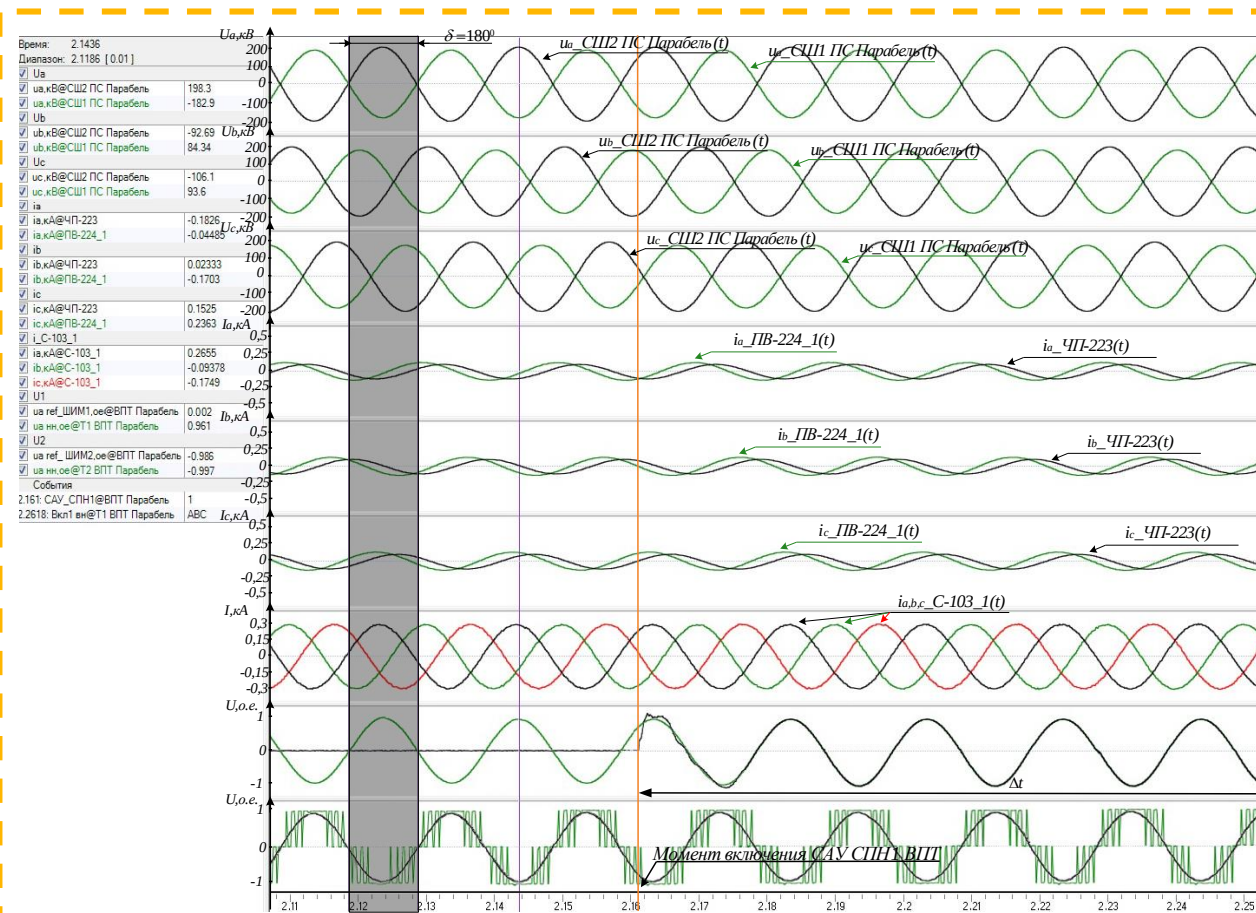


Кривые напряжений (а) и углов напряжений (б) на шинах ПС
Парabelь, частот вращения электрических машин (в) и
напряжений в узлах их подключения (г)
при $\delta=40^\circ$, СШ – система шин

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЪЕДИНЕНИЯ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ



ИНЖЕНЕРНАЯ
ШКОЛА
ЭНЕРГЕТИКИ

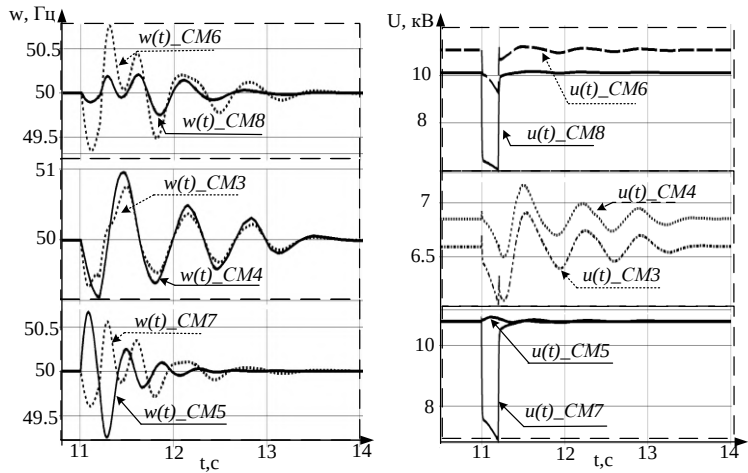


Объединение несинхронно работающих частей Томской ЭЭС на параллельную работу
на ПС Параль при $\delta=180^\circ$ с помощью ВПТ

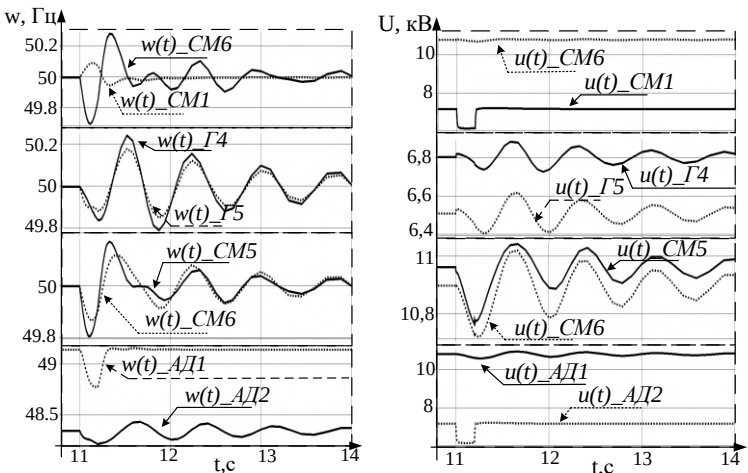
ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЪЕДИНЕНИЯ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ



ИНЖЕНЕРНАЯ
ШКОЛА
ЭНЕРГЕТИКИ



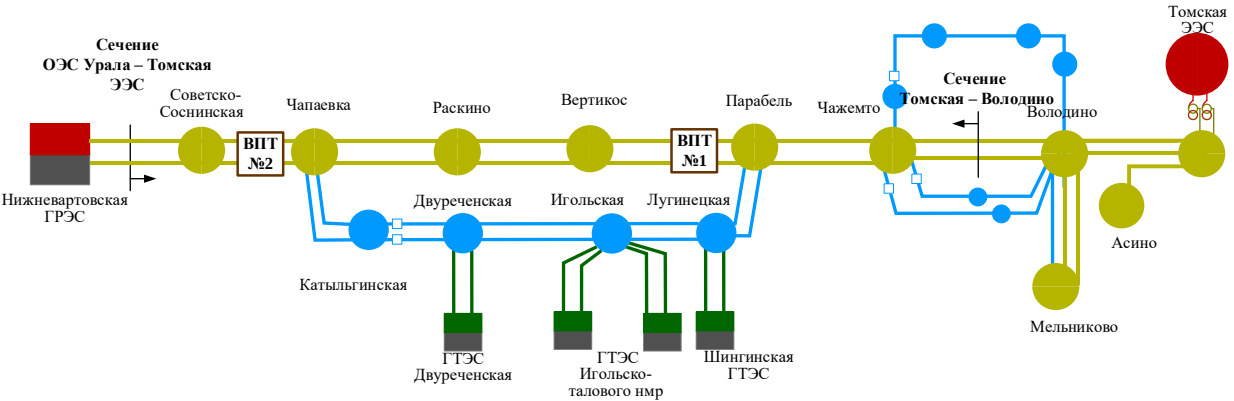
Кривые частот вращения электрических машин (а) и напряжений в узлах их подключения (б) при трехфазном КЗ ($t_{кз}=11$ с) на стороне инвертора ВПТ, установленной на ПС Парабель



Кривые частот вращения электрических машин (а) и напряжений в узлах их подключения (б) при трехфазном КЗ ($t_{кз}=11$ с) на стороне инвертора ВПТ, установленной на ПС Советско-Соснинская

Величина токов КЗ при повреждении на шинах ПС Парабель

Линия электропередачи	До установки ВПТ при замкнутом транзите, А	После установки ВПТ, А	Δ , А
ПС Советско-Соснинская – ПС Чапаевка	590	440	150
ПС Чапаевка – ПС Раскино	600	460	140
ПС Раскино – ПС Вертикос	650	480	170
ПС Вертикос – ПС Завьялово	1200	870	330
ПС Завьялово – ПС Каргасок	1240	880	360
ПС Каргасок – ПС Парабель	1300	910	390
ПС Парабель – ПС Чажемто	970	260	710
ПС Чажемто – ПС Володино	780	310	470
ПС Володино – ПС Орловка	760	340	420
ПС Орловка – ПС Томская	740	350	390

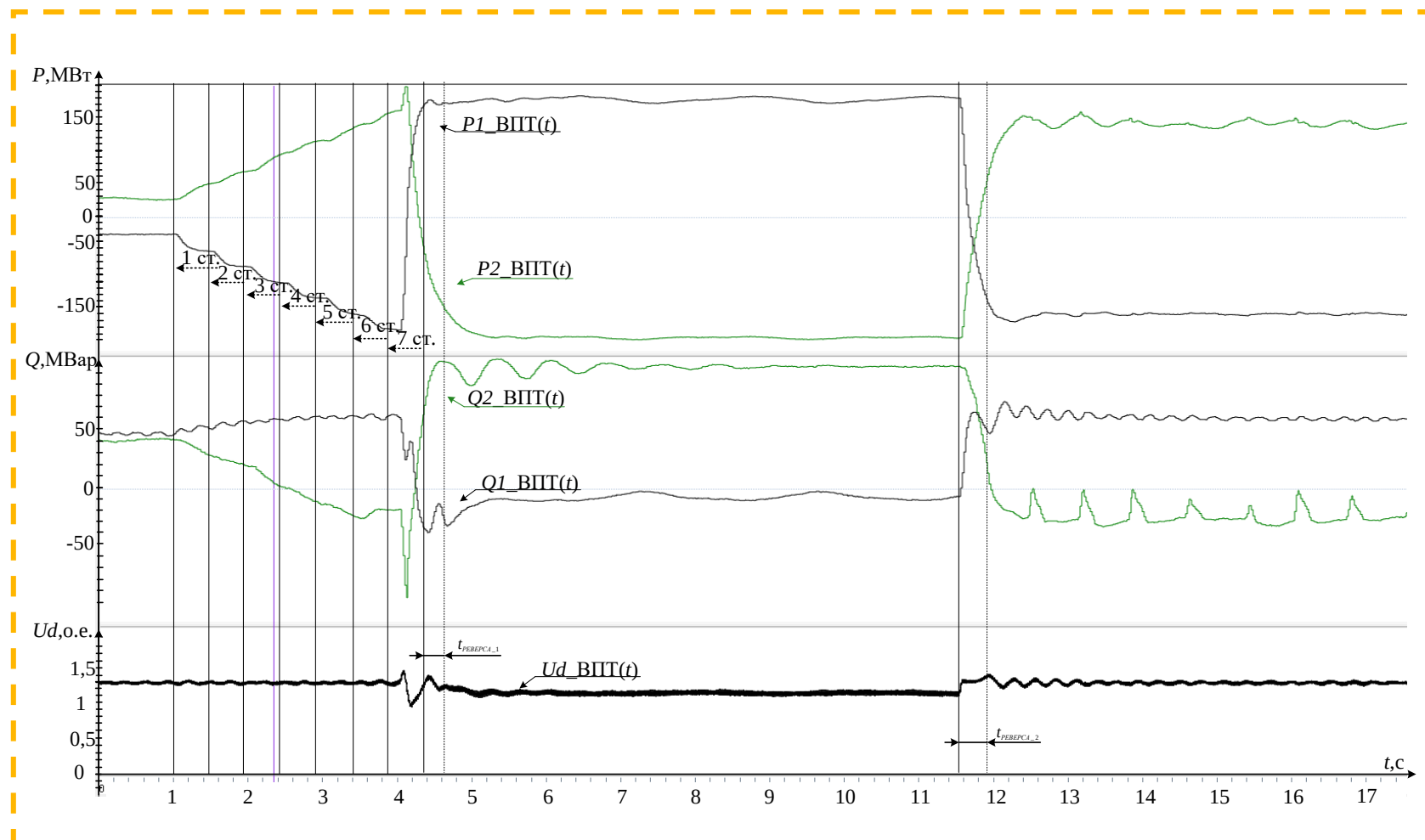


Упрощенная схема транзита 220 кВ ПС 500 кВ Томская – Нижневартовская ГРЭС с рассматриваемыми местами установки ВПТ

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЪЕДИНЕНИЯ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ



ИНЖЕНЕРНАЯ
ШКОЛА
ЭНЕРГЕТИКИ



Осциллограммы мощности и напряжения постоянного тока
при регулировании перетока мощности через ВПТ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

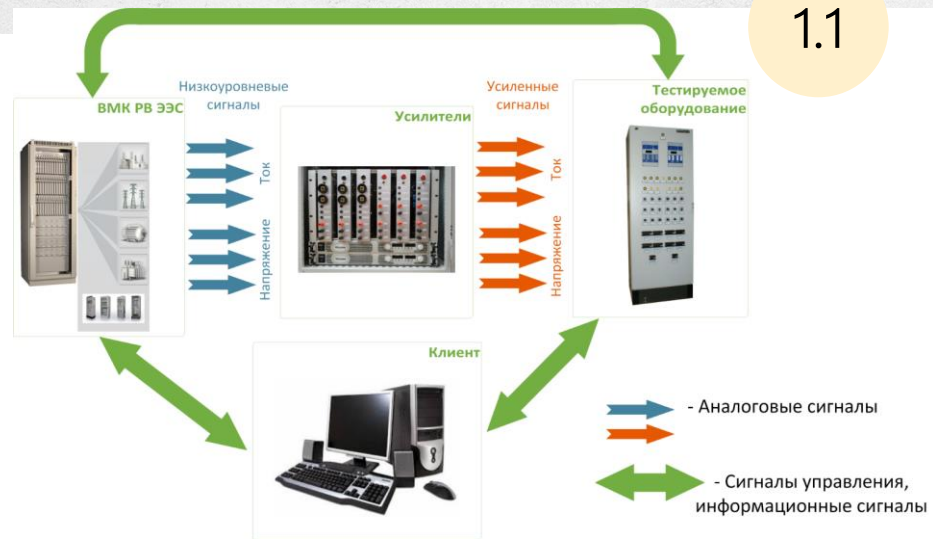
На основе предложенной гибридной концепции создан уникальный моделирующий комплекс, в котором:

- исключены декомпозиция режимов и процессов и нет ограничения интервала их воспроизведения;
- обеспечивается непрерывное методически точное решение детальных трехфазных математических моделей элементов и электроэнергетических систем в целом в реальном времени;
- отсутствуют ограничения на объем моделируемой электроэнергетической системы и глубину детализации.

Комплекс является полностью российской разработкой, т.е. члены коллектива НИЛ «Моделирование ЭЭС» самостоятельно реализуют все этапы создания этой системы: проектирование печатных плат, написание исходного кода и программирование микроконтроллеров, системное программирование, обеспечение сетевого взаимодействия и т.д.

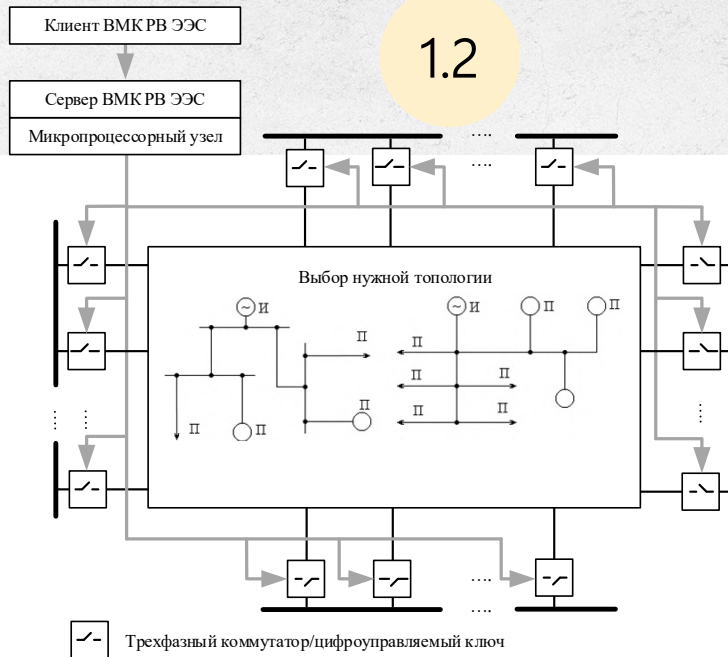
НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ

1.1



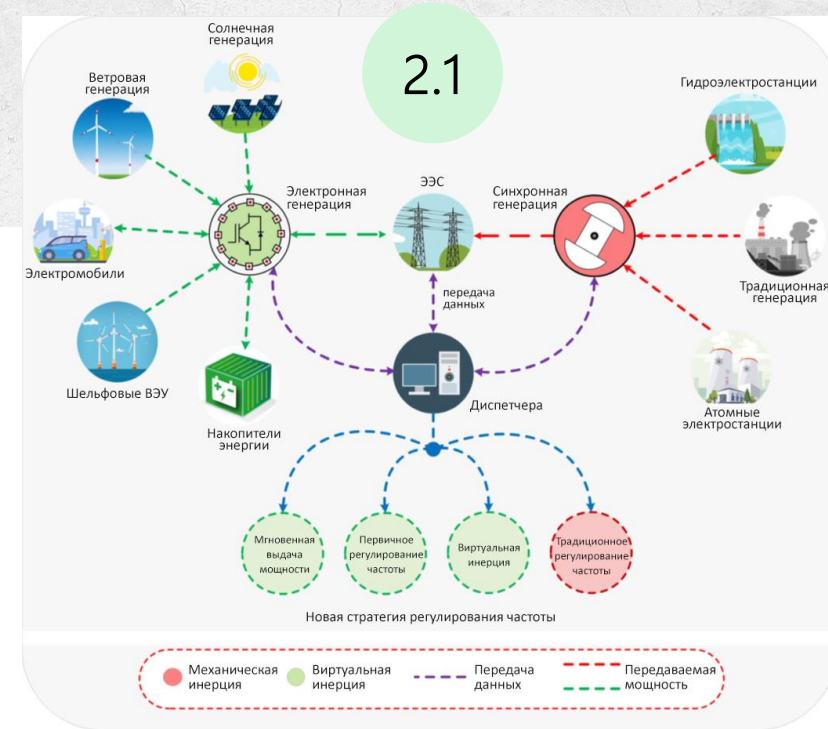
Использование BMK для тестирования в замкнутом цикле

1.2



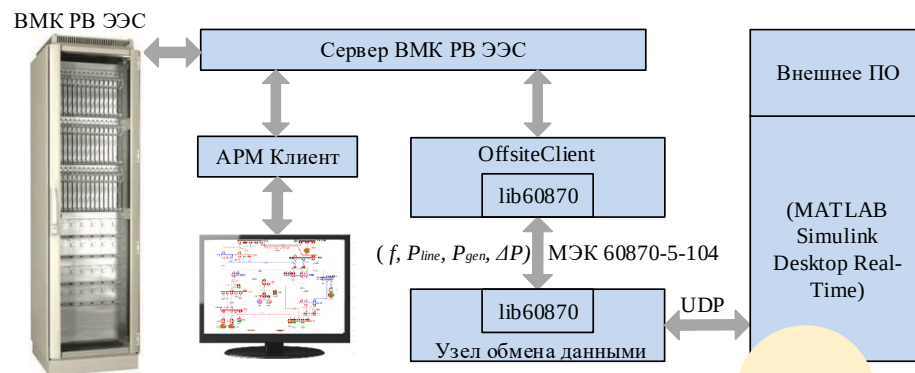
Структура гибкого КТУ

2.1



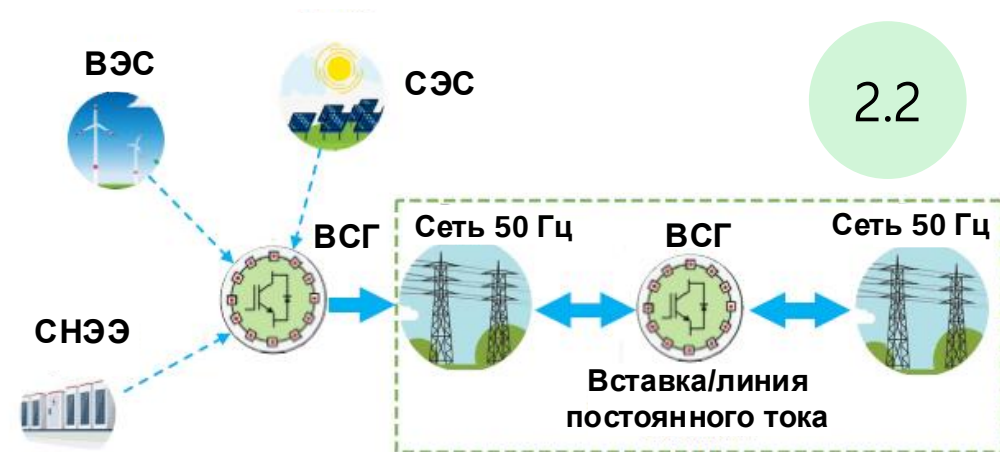
Структура современной ЭЭС

1.3



Структурная схема для взаимодействия с внешним ПО

2.2



Развитие концепции управления сетевого инвертора в режиме «ведущий»



**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО
КОМПЛЕКСА ТПУ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ
В УСЛОВИЯХ ИХ СОВРЕМЕННОГО РАЗВИТИЯ**

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

Докладчик:

СУВОРОВ АЛЕКСЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ,

к.т.н., доцент ОЭЭ ИШЭ, НИЛ «Моделирование ЭЭС»

Организация: Томский политехнический университет

Контактная информация: e-mail: **suvorovaa@tpu.ru**