



ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ



ИНЖЕНЕРНАЯ
ШКОЛА
ЭНЕРГЕТИКИ

Особенности и преимущества всережимного моделирования режимов работы фотоэлектрических установок в составе электроэнергетических систем

Докладчик: Рудник Владимир Евгеньевич
ассистент ОЭЭ, НИЛ «Моделирование ЭЭС» ИШЭ

Организация: Томский политехнический университет

Научный руководитель: Суворов Алексей Александрович
к.т.н., доцент ОЭЭ, НИЛ «Моделирование ЭЭС» ИШЭ ТПУ

Статистика по внедрению ветряных электростанций (ВЭС) и фотоэлектрических установок (ФЭУ), которые при объединение п-количества объектов образуют фотоэлектрические солнечные электростанции (ФСЭС):

в России [1]

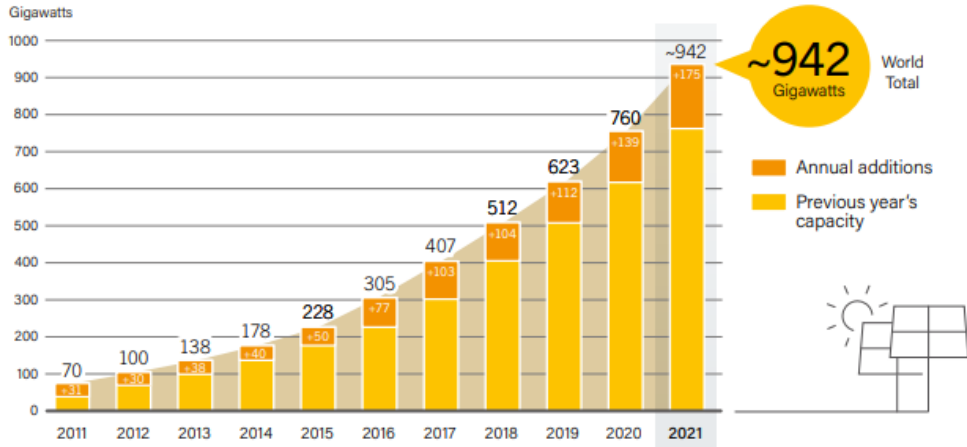
ФСЭС [ГВт]	
2021 г.	2022 г.
1,96	2,12
ВЭС [ГВт]	
2021 г.	2022 г.
2,04	2,3

в мире [2]

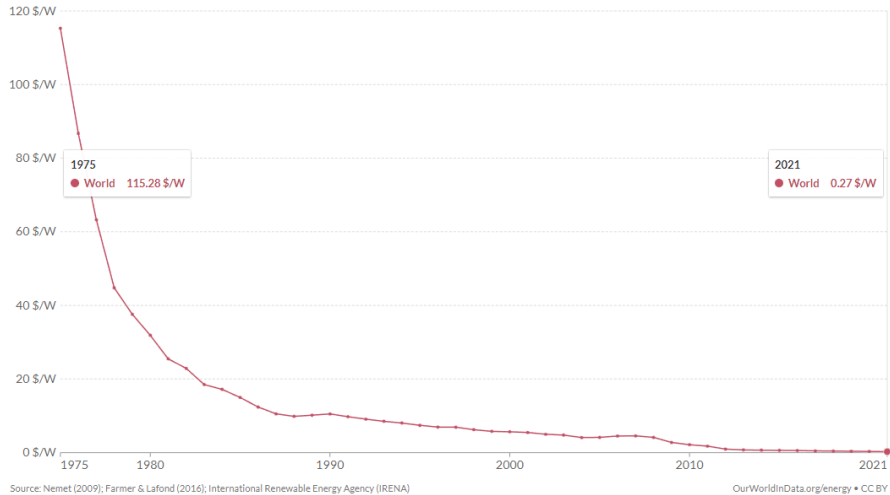
ФСЭС [ГВт]	
2021 г.	2022 г.
942	1067
ВЭС [ГВт]	
2021 г.	2022 г.
845	906

[1] По данным СО ЕЭС

[2] RENEWABLES 2022 GLOBAL STATUS REPORT



Установленная мощность ФСЭС на конец 2021



Основные негативные факторы при функционировании ФСЭС в ЭЭС следующие:

- 1) увеличение скорости переходных процессов из-за снижения общей инерции энергосистемы становится причиной неправильной работы противоаварийной автоматики;
- 2) несогласованное действие системы автоматического управления силового преобразователя (САУ СП) с системами управления другого оборудования приводит к нарастающим колебаниям режимных параметров после возмущений за счёт использования больших коэффициентов усиления;
- 3) усугубление аварийной ситуации в ЭЭС ввиду несоответствия поведения ФСЭС требованиям их функционирования в аварийных режимах.

Обозначенные проблемы особенно остро стоят при внедрении данных объектов в региональные энергосистемы и энергорайоны, которым характерно наличие «слабых» сетей.

$$OKЗ = \frac{S_{\min}}{P_{ВИЭ}},$$

где $S_{\min}$ – минимальное значение мощности короткого замыкания в точке подключения ВИЭ к сети без учета влияния ВИЭ (МВА), $P_{ВИЭ}$ – номинальная мощность ВИЭ (МВт) [1,2].

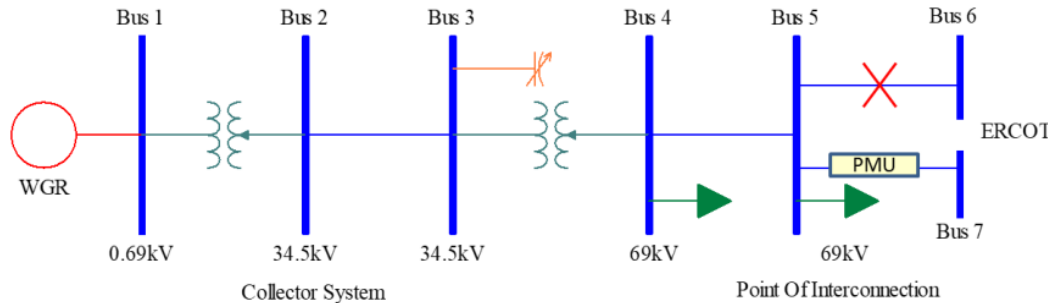
Значение коэффициента отношения короткого замыкания (ОКЗ) используется для классификации плотности сети [1,2]:

- система переменного/постоянного тока с высоким ОКЗ классифицируется по значению ОКЗ, превышающему 3 о.е. (сильные сети);
- система переменного/постоянного тока с низким ОКЗ классифицируется по значению ОКЗ между 2 о.е. и 3 о.е. (слабые сети).
- Система переменного/постоянного тока с очень низким ОКЗ классифицируется по значению ОКЗ ниже 2 о.е. (ультра слабые сети)

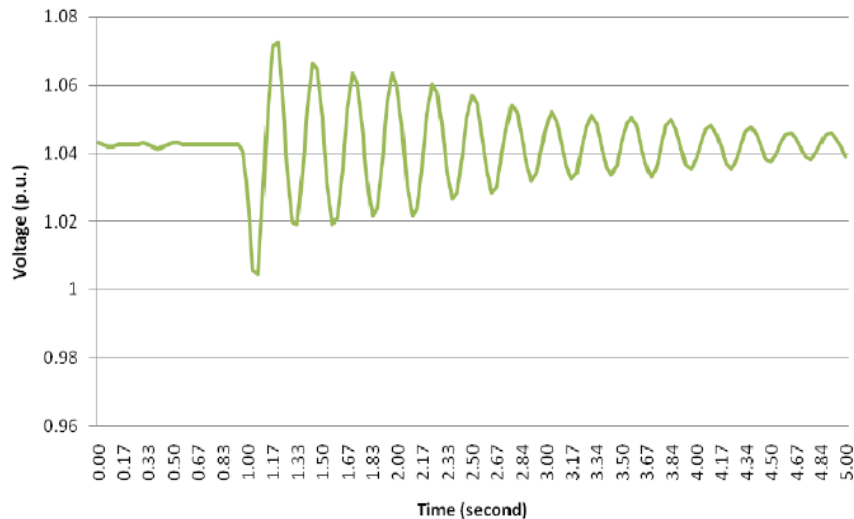
[1] IEEE Std 1204-1997. IEEE Guide for Planning DC Links Terminating at AC Locations Having Low Short-Circuit Capacities

[2] ГОСТ Р 59027-2020 (МЭК 60633:2019) «Передача электроэнергии постоянным током высокого напряжения»

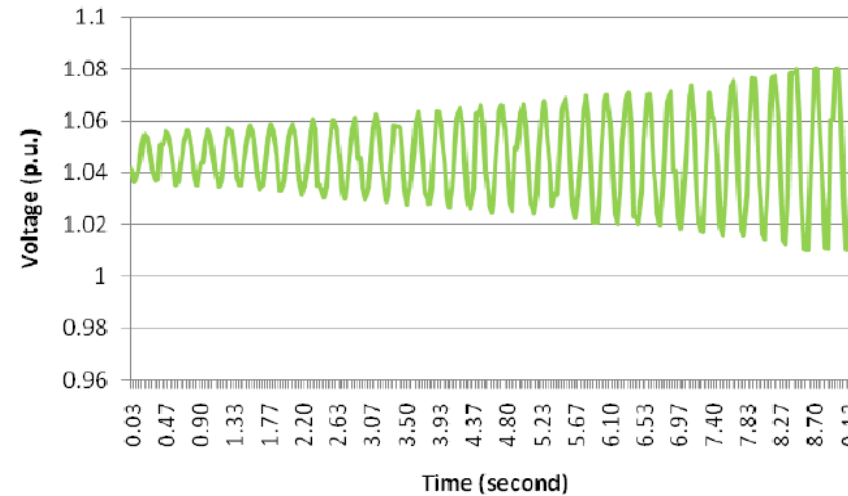
Проблематика. Слабые сети



Энергосистема Техаса - региональная сеть переменного тока, которая охватывает большую часть американского штата Техас. Сетью управляет Совет по надёжности электроснабжения Техаса (ERCOT).



а)

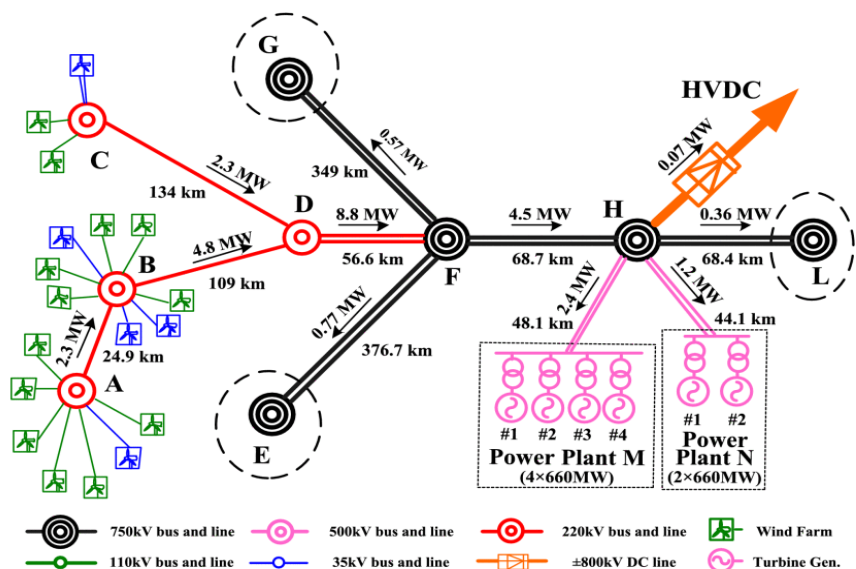


б)

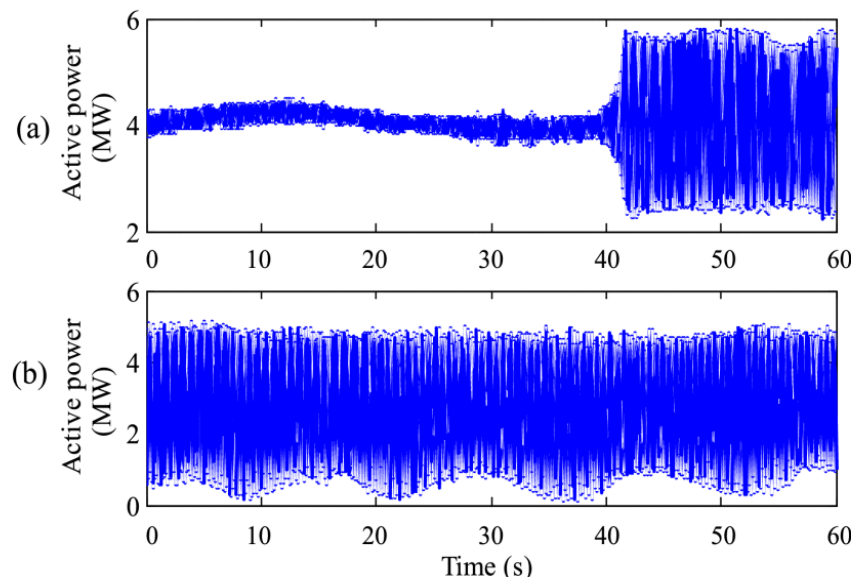
Осциллограммы напряжения в энергосистеме Техаса: а) слабо затухающие колебания при низкой мощности ВИЭ (при снижении скорости ветра); б) незатухающие колебания при большой мощности ВИЭ (при увеличении скорости ветра)[*]

Основной причиной возникновения незатухающих колебаний стало снижение ОКЗ сети, в результате которого сеть стала «слабой».

Проблематика. Слабые сети



Однолинейная схема энергосистемы
Синьцзян-Уйгурского автономного района
Китая [1]



Осциллограммы активной мощности ВИЭ, где
временной интервал (a) с 9:46 до 9:47. (b) с
11:52 до 11:53 [1].

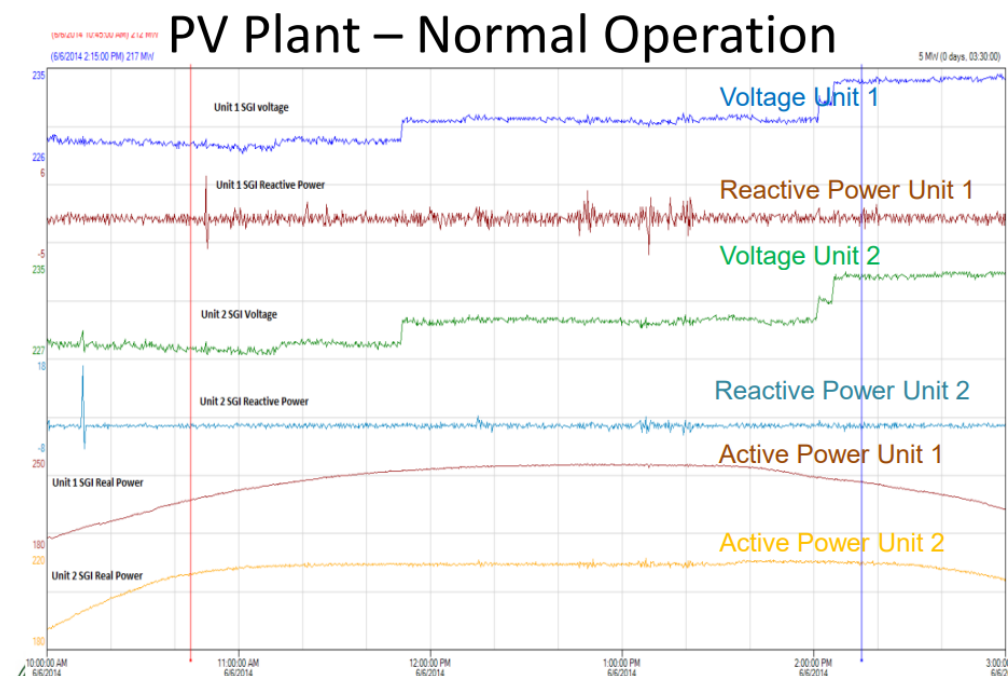
Причиной возникновения субсинхронных колебаний послужило взаимовлияние систем управления сетевыми инверторами, располагающимися в одном районе ВЭС, настройки которых в зависимости от схемно-режимных условий приводили к незатухающим колебаниям режимных параметров различной частоты и амплитуды.

До настоящего времени уже было зафиксировано 19 случаев с аналогичными колебаниями, получивших официальное подтверждение и освещение в научной периодике, которые наблюдались в энергосистемах разных стран со значительной долей возобновляемой генерации (15% и более) с 2007 года (Миннесота (США) 2007 г., Техас (США) 2009 и 2017 гг., северные районы КНР 2012-2013 гг. и др.) [2]. В качестве основных факторов выделяют настройки быстродействующих контуров САУ (преимущественно ФАПЧ) и изменение ОКЗ сети.

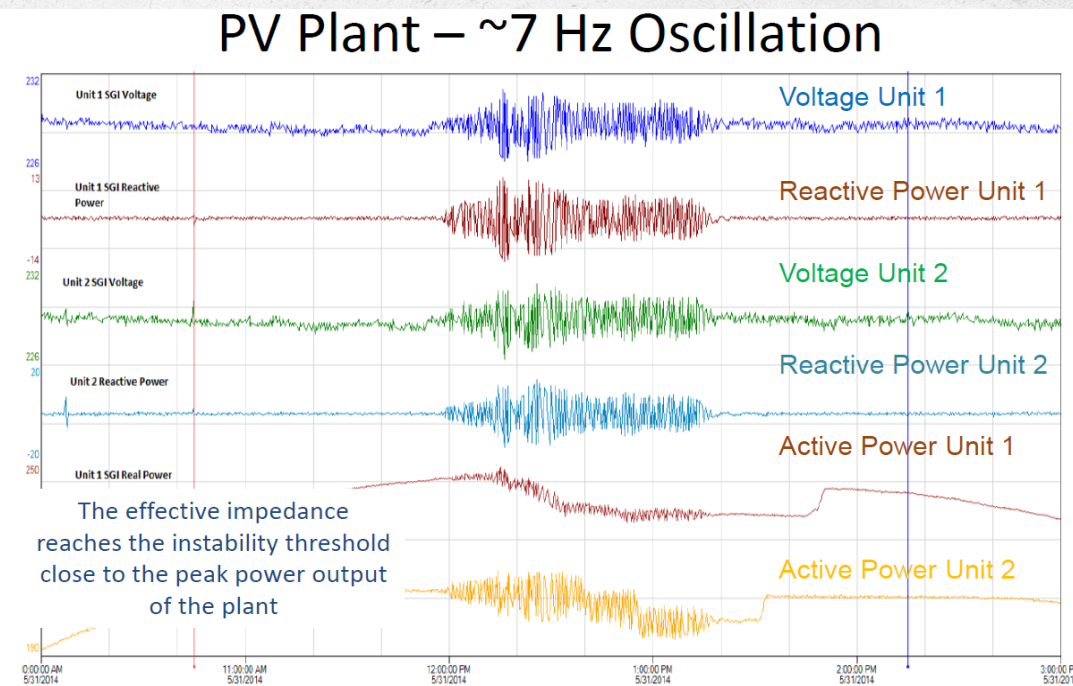
[1] H. Liu et al., "Subsynchronous Interaction Between Direct-Drive PMSG Based Wind Farms and Weak AC Networks," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 32, no. 6, pp. 4708-4720, Nov. 2017, doi: 10.1109/TPWRS.2017.2682197.

[2] Y. Cheng et al., "Real-World Subsynchronous Oscillation Events in Power Grids With High Penetrations of Inverter-Based Resources," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 38, no. 1, pp. 316-330, Jan. 2023, doi: 10.1109/TPWRS.2022.3161418.

Проблематика. Слабые сети



а)

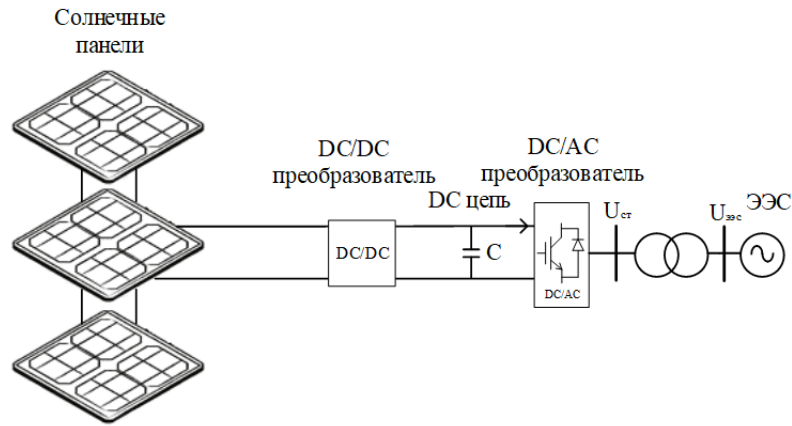


б)

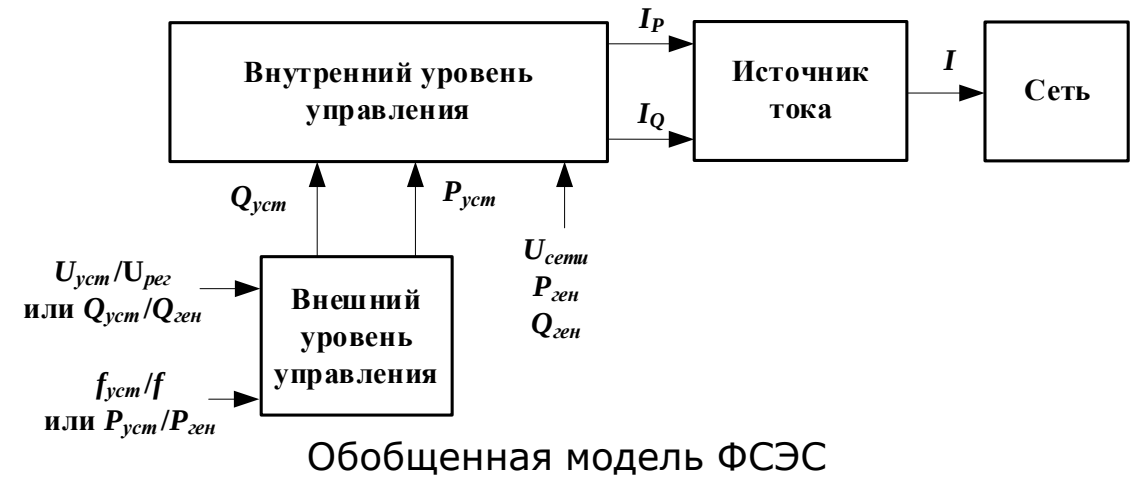
Осциллограммы мощности и напряжения ФЭС (США, штат Калифорния): а) нормальный режим работы, б) колебания режимных параметров [*]

Одним из направлений решения обозначенной проблемы анализа субсинхронных колебаний является математическое моделирование, так как известная специфика и сложность электроэнергетических систем исключают возможность получения всей необходимой информации, особенно аварийного характера, как натурным путем, так и посредством физического моделирования.

Обобщенная модель ФСЭС



Структурная схема ФСЭС

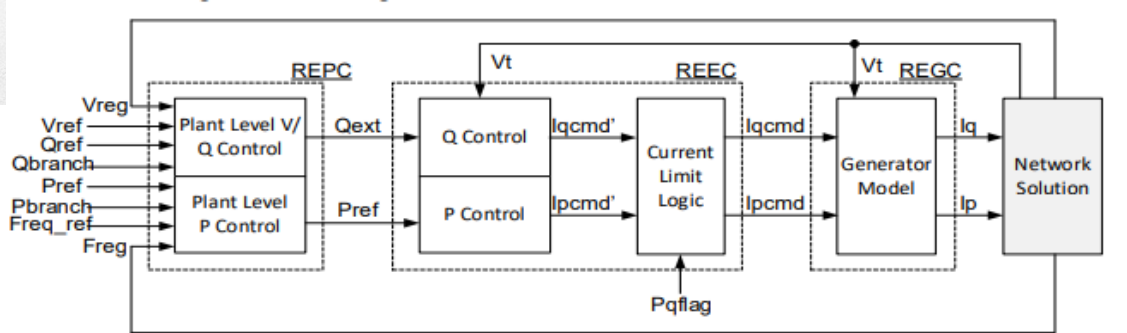


Обобщенная модель ФСЭС

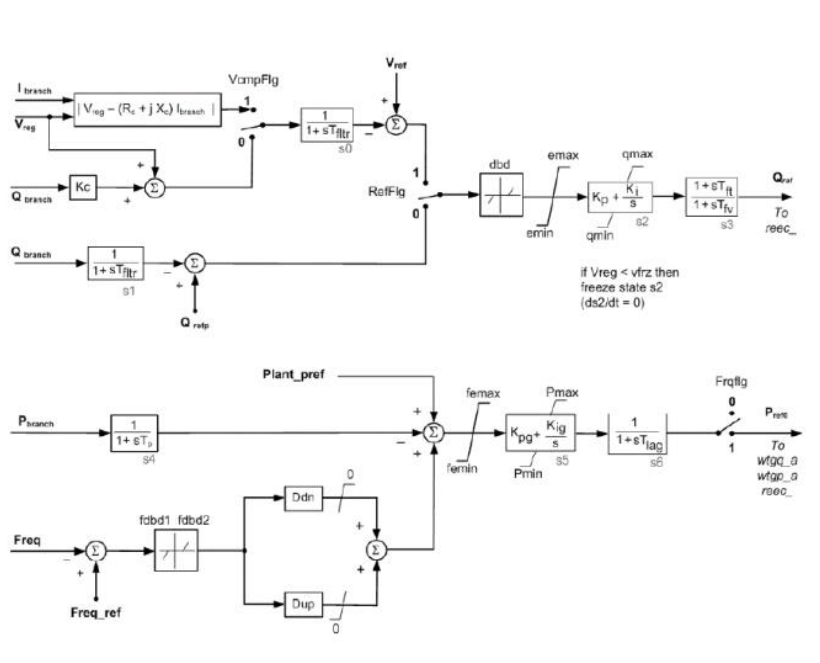
Основные особенности обобщенной модели ФСЭС:

1. Динамика работы блока ФАПЧ не воспроизводится.
2. Контур управления активной мощностью воспроизводится упрощённо без учёта системы управления силовым преобразователем со стороны источника и системы слежения за точкой максимальной мощности.
3. Цепь постоянного тока и её система управления не воспроизводятся.
4. Динамика самого первичного источника генерации также не воспроизводится.
5. Данная модель не подходит для точек соединения слабых сетей, где ОКЗ в точке соединения может составлять от 2 о.е. до 3 о.е. или меньше.

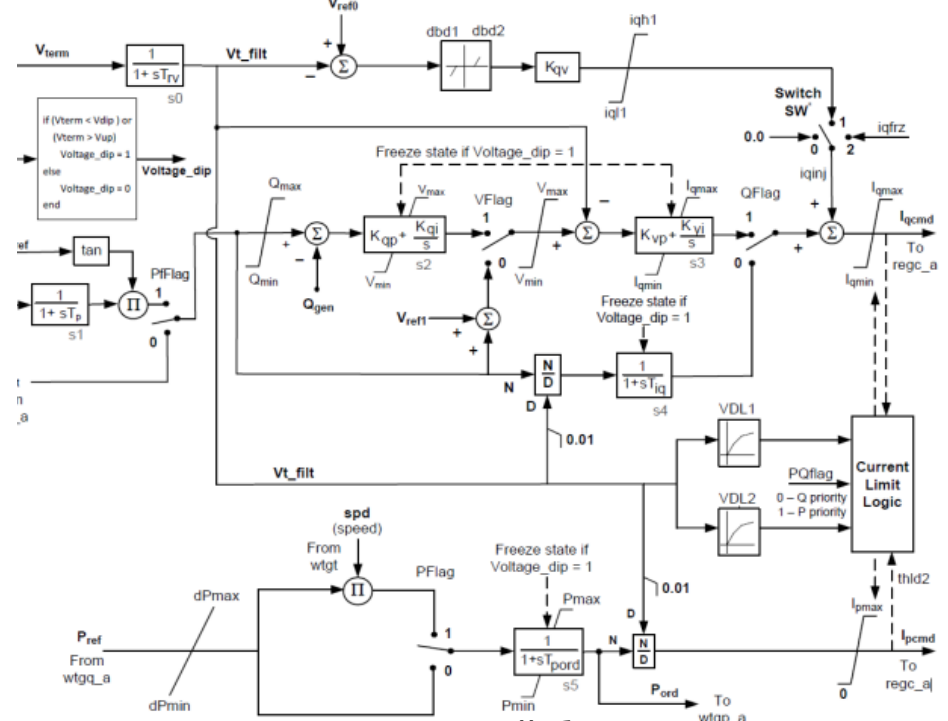
Обобщенная модель ФСЭС



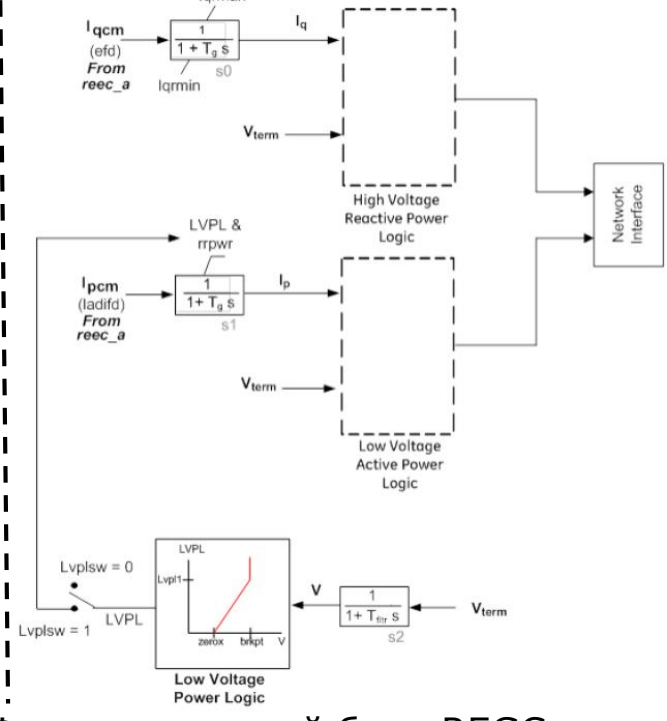
Структура обобщенной модели ФСЭС, предложенная WECC [*]



Функциональный блок REPC



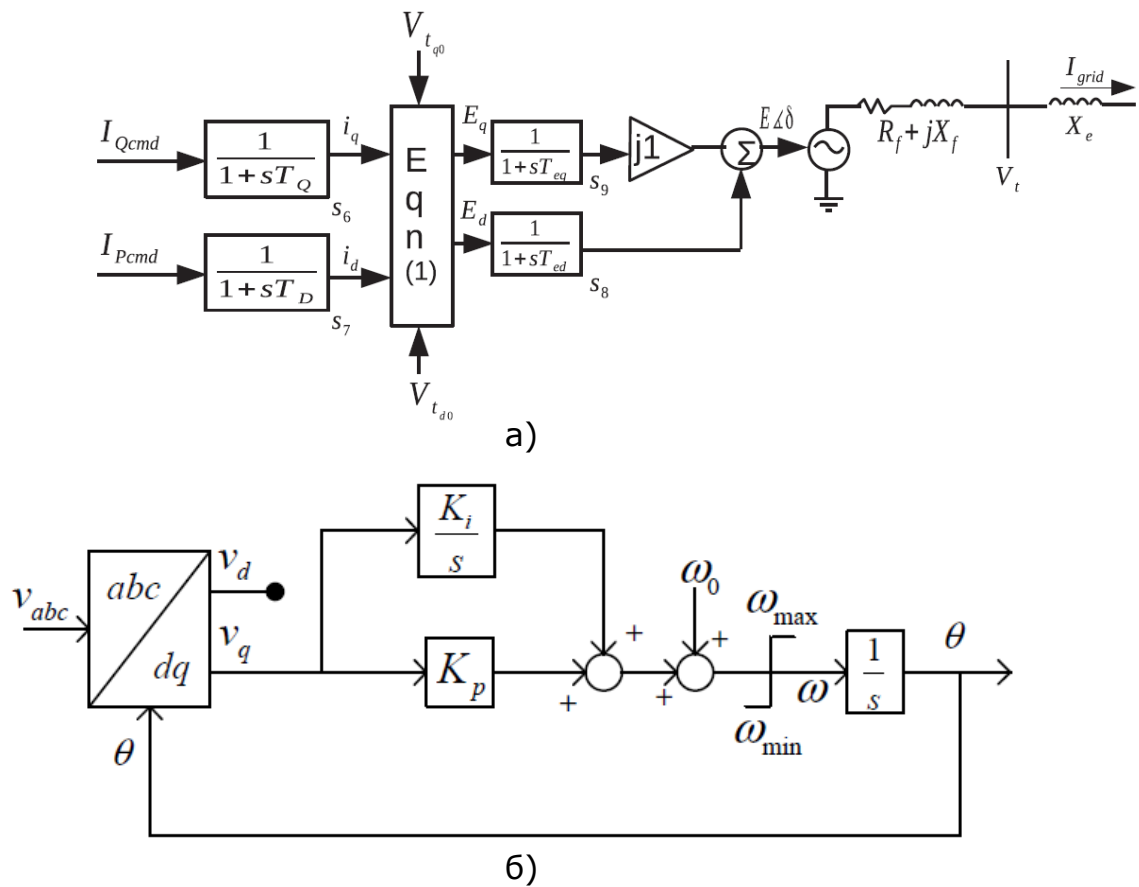
Функциональный блок REEC



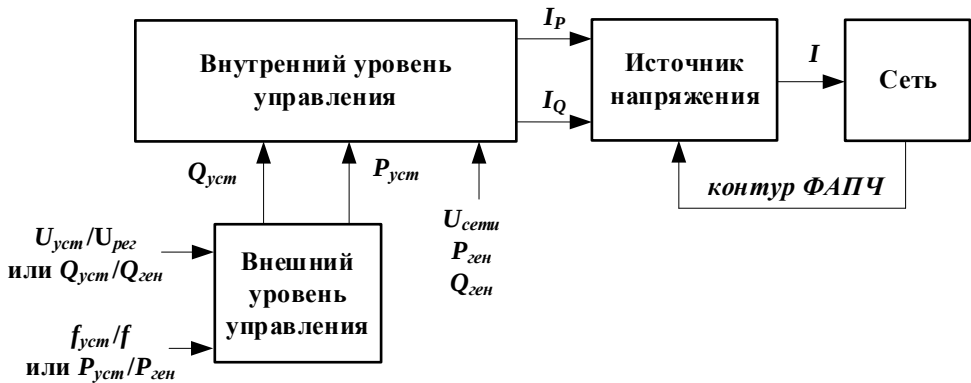
Функциональный блок REGC

[*] WECC REMTF. Solar Photovoltaic Power Plant Modeling and Validation Guideline MWVG.

Модернизация обобщенной модели ФСЭС



Модернизация обобщенной модели ФСЭС [*]: где а) контур управления током, б) блок фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ)



Основные особенности модернизированной обобщенной модели ФСЭС:

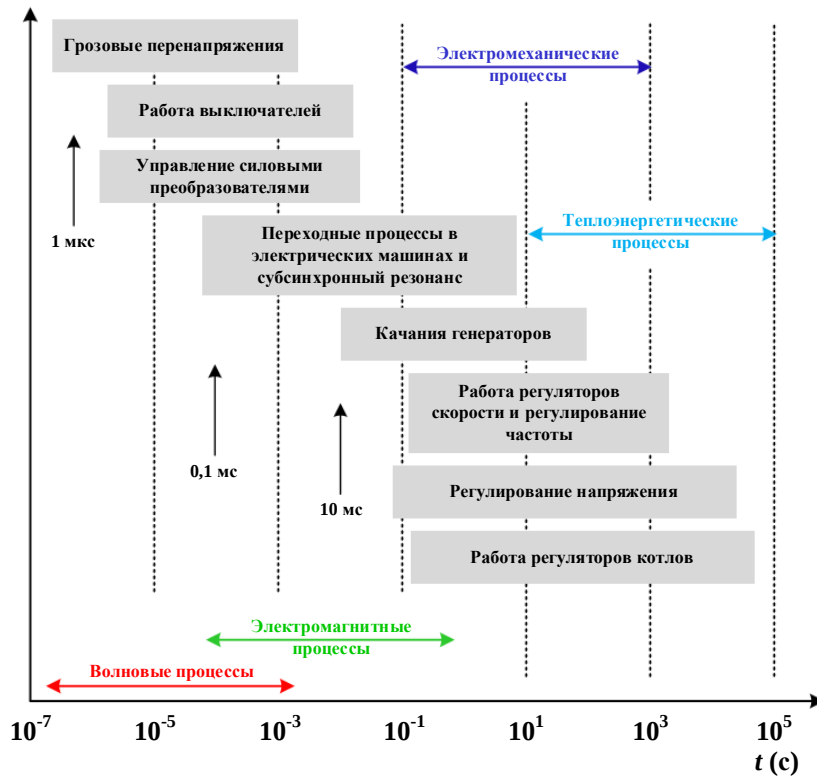
- ФСЭС представляется в виде источника напряжения, вместо источника тока;
- для синхронизации с сетью добавлен блок ФАПЧ;
- внутренний контур управления током аппроксимируется апериодическим звеном первого порядка с постоянной времени от 10 до 20 мс;
- цепь постоянного тока и её система управления не воспроизводятся;
- динамика первичного источника энергии не воспроизводится.

[*] D. Ramasubramanian, Z. Yu, R. Ayyanar, V. Vittal and J. Undrill, "Converter Model for Representing Converter Interfaced Generation in Large Scale Grid Simulations," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 32, no. 1, pp. 765-773, Jan. 2017, doi: 10.1109/TPWRS.2016.2551223.

Трудности детального моделирования ФСЭС



ИНЖЕНЕРНАЯ
ШКОЛА
ЭНЕРГЕТИКИ



Переходные процессы в ЭЭС и их группы

ОСОБЕННОСТИ ПВК:

Наличие в составе ФСЭС модели сетевого инвертора приводит к необходимости использовать относительно малый шаг расчета (от 10 мкс и меньше). В проведенных исследованиях [1] продемонстрировали, что воспроизведение 5 секундного интервала при однофазном коротком замыкании в сети заняло более 4,7 часа в ЭЭС с ВИЭ при шаге интегрирования равном 5 мкс.

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 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 [2].

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 - модули).

[1] Li, Y. A Multi-Rate Co-Simulation of Combined Phasor-Domain and Time-Domain Models for Large-Scale Wind Farms / Y. Li, D. Shu, F. Shi, Z. Yan, Y. Zhu, N. Tai // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2020. – Vol. 35. – P. 324–335

[2] Chen, Y., & Dinavahi, V. (2013). Multi-FPGA digital hardware design for detailed large-scale real-time electromagnetic transient simulation of power systems. *IET Generation, Transmission and Distribution*, 7(5), 451–463. doi:10.1049/iet-gtd.2012.0374

Гибридный подход к моделированию ФСЭС



ИНЖЕНЕРНАЯ
ШКОЛА
ЭНЕРГЕТИКИ

Аспекты проблемы

- декомпозиция режимов и процессов в ЭЭС;
- упрощения математических моделей оборудования и ЭЭС в целом;
- наличие трудно оцениваемой методической ошибки численного интегрирования дифференциальных уравнений;
- ограничение интервала решения

- трудности при воспроизведении коммутационных процессов;
- ограничение оперативности расчетов в ЭЭС

- ограничение информационно-управляющих свойств и возможностей

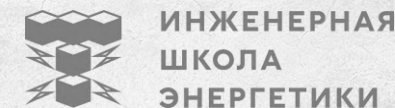
Средства устранения

Применение метода непрерывного параллельного методически точного неявного интегрирования дифференциальных уравнений в реальном времени

Взаимодействие моделируемого оборудования на модельном физическом уровне за счет преобразования входных/выходных математических переменных в соответствующие модельные физические сигналы с реализацией коммутационных процессов посредством цифро-управляемых аналоговых ключей

Применение цифро-аналогового и аналого-цифрового преобразования информации

Цель и задачи диссертационной работы



Цель работы. Целью работы является разработка концепции и средств её реализации для полного и достоверного всережимного моделирования ФСЭС в составе ЭЭС.

Для достижения указанной цели поставлены и решены следующие **задачи**:

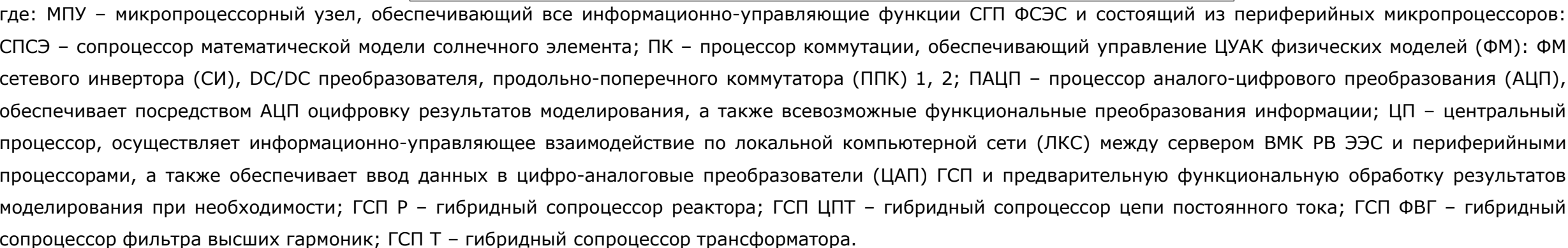
1. Анализ влияния внедрения ФСЭС, подключаемых с помощью силовых преобразователей к электрической сети, в существующие ЭЭС, в том числе в слабые сети, на протекание квазиустановившихся и переходных процессов в ЭЭС.
2. Анализ основных используемых в настоящее время средств моделирования ФСЭС и ЭЭС в целом.
3. Выявление и обоснование факторов, препятствующих решению проблемы детального моделирования ФСЭС в слабых сетях с помощью существующих программных и программно-аппаратных комплексах моделирования ЭЭС.
4. Разработка теоретически и практически обоснованной концепции всережимного моделирования ФСЭС в ЭЭС, а также структуры и принципов построения средств её реализации.
5. Проведение экспериментальных исследований, подтверждающих свойства и возможности разработанной концепции и средств её реализации, необходимые для надежного и эффективного решения задач проектирования, исследования и эксплуатации ФСЭС в ЭЭС.

1. Разработанные концепция всережимного моделирования ФСЭС и гибридные средства её реализации в виде экспериментального образца специализированного гибридного процессора ФСЭС позволяют воспроизводить в реальном времени на неограниченном интервале единый непрерывный спектр квазиустановившихся и переходных процессов в составных элементах и ФСЭС в целом при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах работы ФСЭС в составе ЭЭС.
2. Для наиболее полного и достоверного воспроизведения переходных процессов при функционировании ФСЭС в слабых сетях, особенно связанных с возникновением колебаний режимных параметров различной частоты, необходимо использовать детальную нелинейную модель ФСЭС, учитывающую топологию и спектр коммутационных процессов в повышающем преобразователе постоянного тока и статическом преобразователе напряжения, динамику цепи постоянного тока и их быстродействующие системы управления: блок фазовой автоподстройки частоты и контур управления током.
3. Разработанный экспериментальный образец специализированного гибридного процессора ФСЭС за счёт программной гибкости структуры позволяет выполнять верификацию в составе ЭЭС распространенных в настоящее время обобщенных математических моделей ФСЭС при различных по интенсивности, месту возникновения и типу возмущений, что в совокупности способствует определению областей наиболее и наименее эффективного использования различных модификаций обобщенных математических моделей ФСЭС.

Основные положения концепции всережимного моделирования ФСЭС

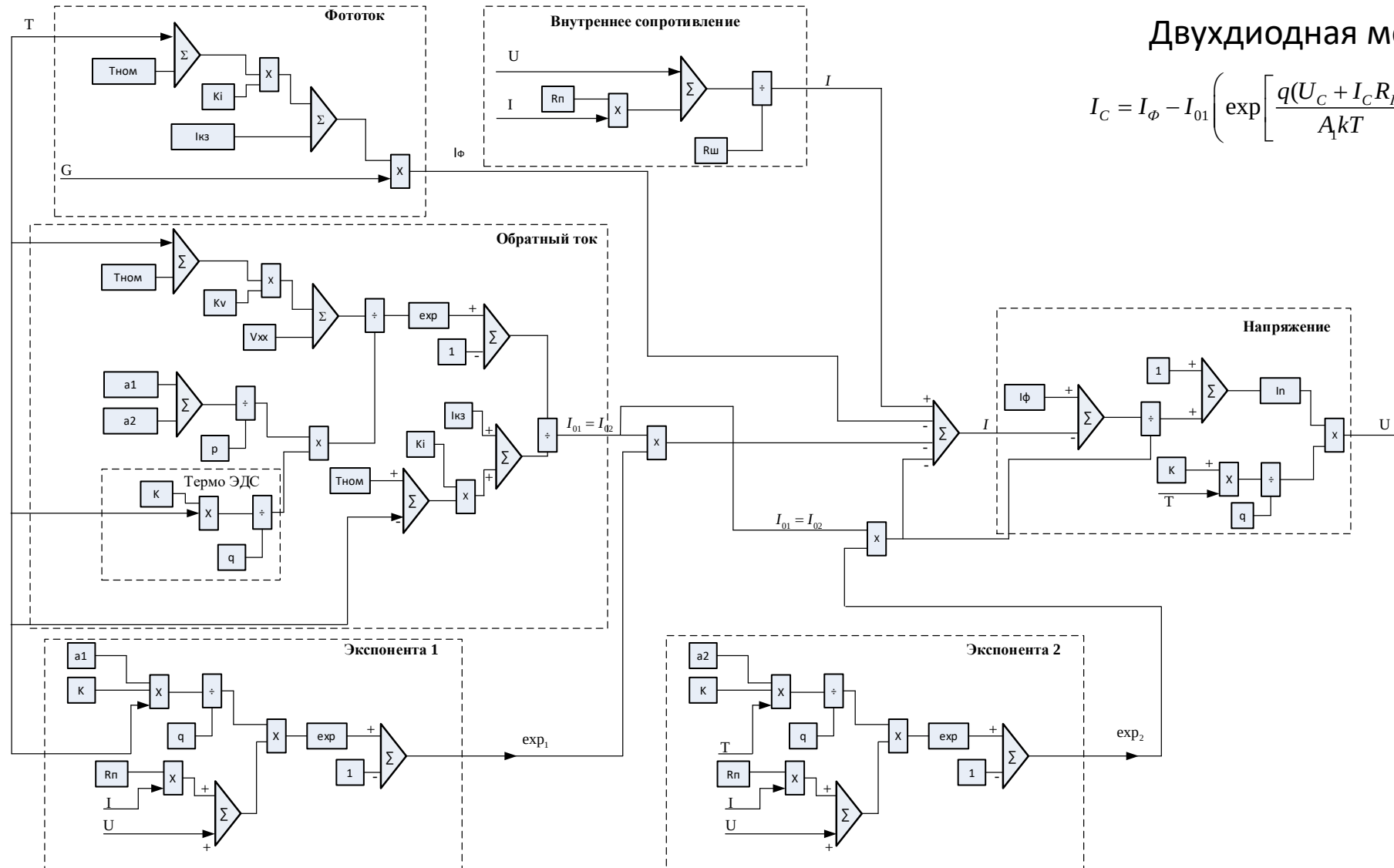
1. Синтезируется и применяется всережимная модель, обеспечивающая непрерывное воспроизведение единого непрерывного спектра квазиустановившихся и переходных процессов при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах функционирования ФСЭС в составе ЭЭС.
2. Для решения систем дифференциальных уравнений математически моделируемого оборудования ФСЭС используется способ методически точного непрерывного неявного интегрирования в реальном времени.
3. Для реализации указанного способа интегрирования разрабатываются и применяются специализированные параллельные цифро-аналоговые структуры – гибридные сопроцессоры (ГСП).
4. Адекватное воспроизведение спектра всевозможных коммутационных процессов повышающего преобразователя постоянного тока и сетевого инвертора ФСЭС обеспечивается с помощью цифроуправляемых физических моделей на базе цифроуправляемых аналоговых ключей (ЦУАК);
5. Взаимодействие ФСЭС с другими специализированными гибридными процессорами (СПП) воспроизводимого оборудования в составе ЭЭС осуществляется на модельном физическом уровне.
6. Управление коэффициентами и параметрами математически моделируемого оборудования ФСЭС, состоянием ЦУАК, отображение и преобразование информации осуществляется с помощью информационно-управляющей системы посредством цифро-аналогового и аналого-цифрового преобразования и специализированного программного обеспечения.

ИНЖЕНЕРНАЯ
ШКОЛА
ЭНЕРGETИКИ



Реализация СГП ФСЭС

Математическая модель солнечного элемента



Двухдиодная модель солнечного элемента

$$I_C = I_\phi - I_{01} \left(\exp \left[\frac{q(U_C + I_C R_{ш})}{A_1 k T} \right] - 1 \right) - I_{02} \left(\exp \left[\frac{q(U_C + I_C R_{ш})}{A_2 k T} \right] - 1 \right) - \frac{U_C + I_C R_{ш}}{R_{ш}}$$

где:

I_ϕ – фототок, А;

I_C – рабочий ток (ток нагрузки), А;

U_C – рабочее напряжение (напряжение нагрузки), В;

q – заряд электрона ($1.602 \cdot 10^{-19}$ кл);

k – постоянная Больцмана ($1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К);

A – постоянная диода – фактор идеализации;

T – температура СЭ.

I_{01} – ток, протекающий через неидеальный р-п переход;

I_{02} – обратный ток насыщения, определяемый рекомбинацией в области объемного заряда р-п-перехода;

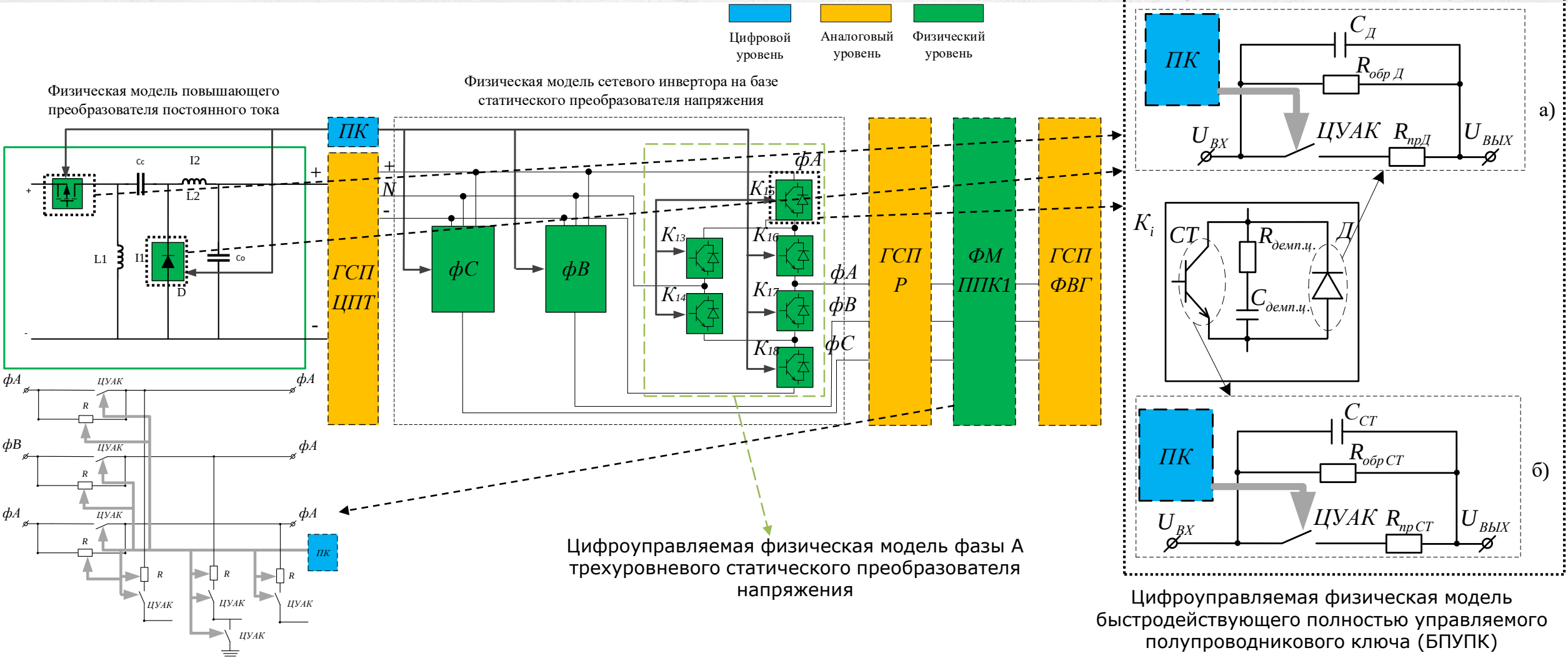
A_1 – фактор идеальности ВАХ диода при I_{01} ;

A_2 – фактор идеальности ВАХ диода при I_{02} .

$R_{ш}$ – шунтирующее сопротивление СЭ,
 R_n – последовательное сопротивление СЭ.

Реализация СГП ФСЭС

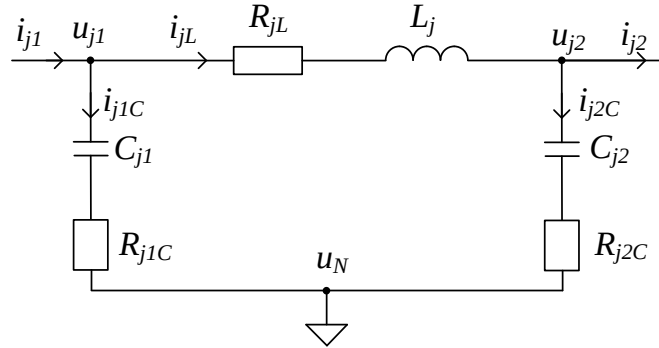
Цифроуправляемые физические модели в структуре ФСЭС



Структурная схема цифроуправляемой физической модели продольно-поперечного коммутатора 1

Гибридный сопроцессор цепи постоянного тока (ГСП ЦПТ)

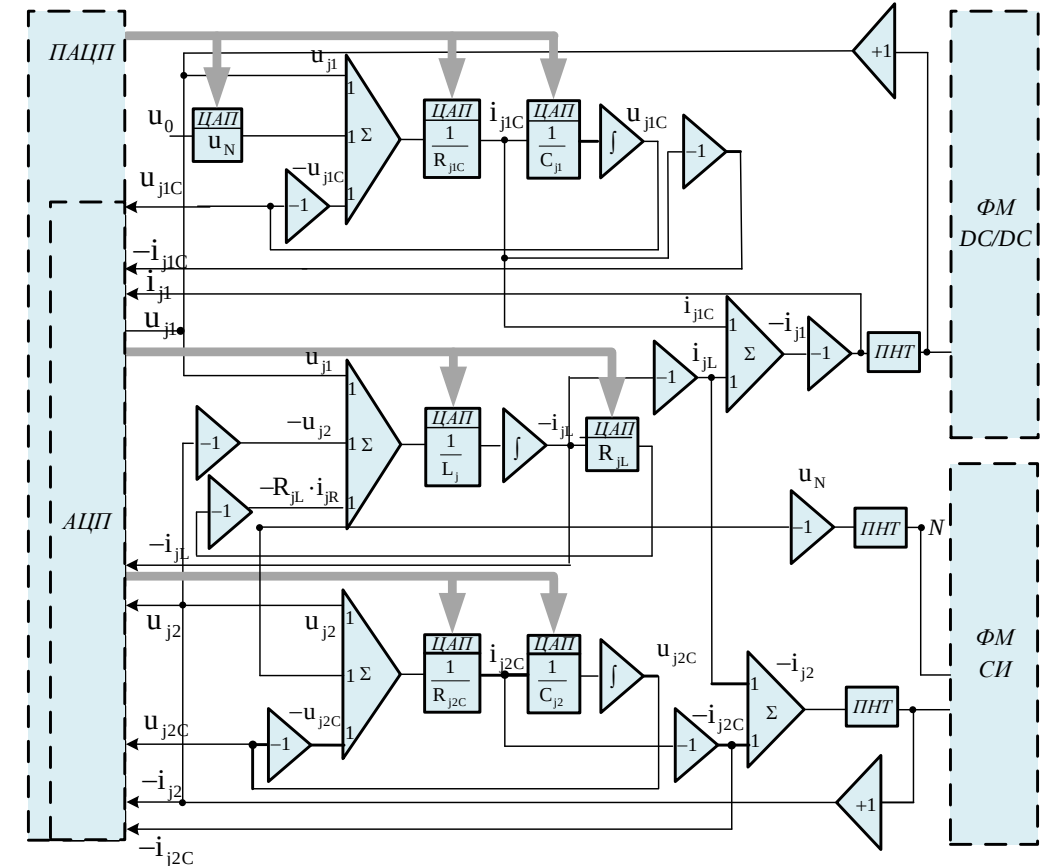
Схема замещения j -го полюса ЦПТ



Математическая модель j -го полюса ЦПТ

$$\begin{cases} i_{j1C} = \frac{1}{R_{j1C}} \cdot (u_{j1} - u_{j1C}); & \frac{du_{j1C}}{dt} = \frac{1}{C_{j1}} \cdot i_{j1C}; \\ \frac{di_{jL}}{dt} = \frac{1}{L_j} (u_{j1} - u_{j2} - R_{jL} \cdot i_{jL}); \\ i_{j1} = i_{jL} + i_{j1C}; & i_{j2} = i_{jL} - i_{j2C}; \\ i_{j2C} = \frac{1}{R_{j2C}} \cdot (u_{j2} - u_{j2C} - u_N); & \frac{du_{j2C}}{dt} = \frac{1}{C_{j2}} \cdot i_{j2C}; \end{cases}$$

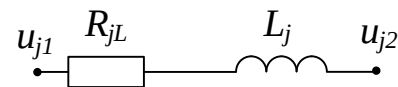
где: j – отрицательный или положительный полюс; R_{jL} и L_j – активное сопротивление и индуктивность сглаживающего реактора j -го полюса; R_{j1C} , R_{j2C} и C_{j1} , C_{j2} – активные сопротивления и емкости конденсаторных батарей j -го полюса; u_N – напряжение нейтрали.



Функциональная схема j -го полюса ГСП ЦПТ

Гибридный сопроцессор реактора (ГСП Р)

Схема замещения j -ой фазы Р

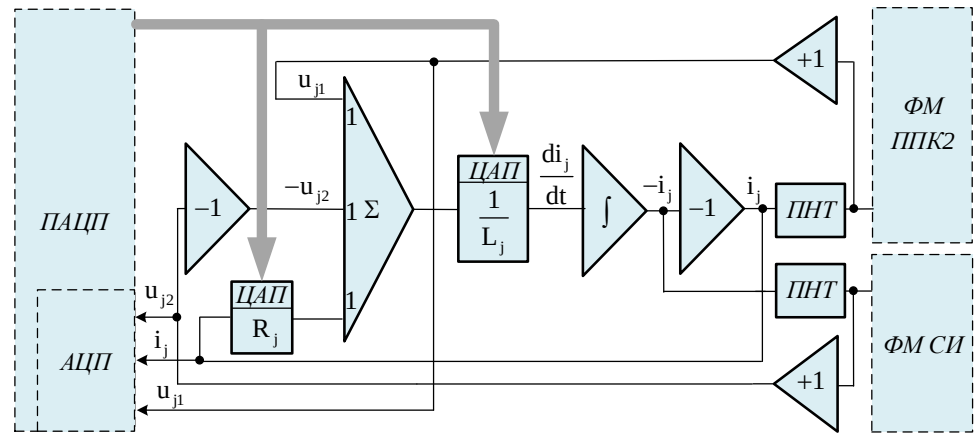


Математическая модель j -ой фазы Р

$$\frac{di_j}{dt} = \frac{1}{L_j} \cdot (u_{j1} - u_{j2} - i_j \cdot R_{jL}),$$

где: u_{j1} и u_{j2} – напряжения на входе/выходе j -ой фазы Р; i_j – ток j -ой фазы Р; R_{jL} и L_j – активное сопротивление и индуктивность j -ой фазы Р.

Функциональная схема j -ой фазы ГСП Р

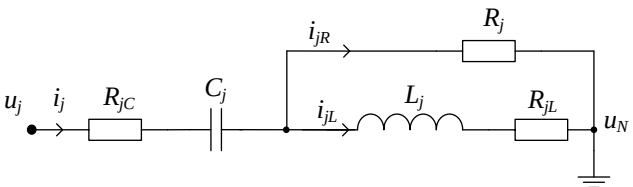


Гибридный сопроцессор фильтра высших гармоник (ГСП ФВГ)

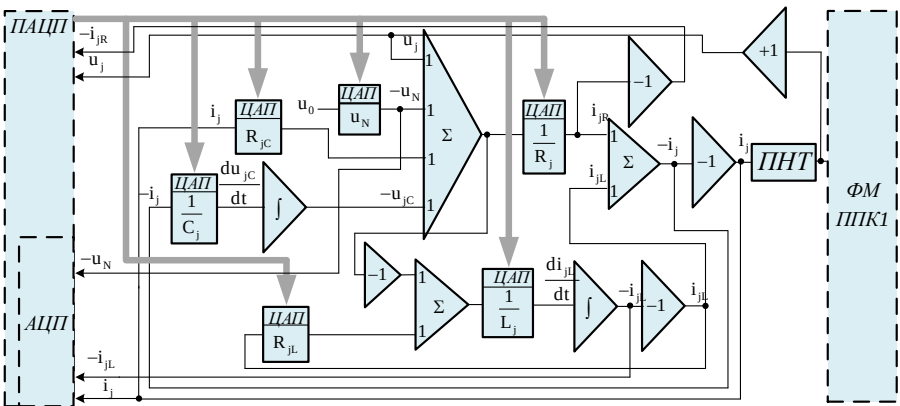
Математическая модель j -ой фазы ФВГ:

$$\begin{cases} i_{jR} = \frac{1}{R_j} \cdot (u_j - i_j \cdot R_{jC} - u_{jC} - u_N) \\ \frac{di_{jL}}{dt} = \frac{1}{L_j} \cdot (i_{jR} \cdot R_j - i_{jL} \cdot R_{jL}) \\ i_j = i_{jL} + i_{jR} \\ \frac{du_{jC}}{dt} = \frac{1}{C_j} \cdot i_j \end{cases}$$

Схема замещения j -ой фазы ФВГ:



Функциональная схема j -ой фазы ГСП ФВГ:



где: R_{jC} и C_j – активное сопротивление и емкость конденсаторной батареи j -ой фазы; R_{jL} и L_j – активное сопротивление и индуктивность катушки j -ой фазы; R_j – сопротивление резистора j -ой фазы; u_{jC} – напряжение на реактивном сопротивлении конденсаторной батареи j -ой фазы ФВГ.

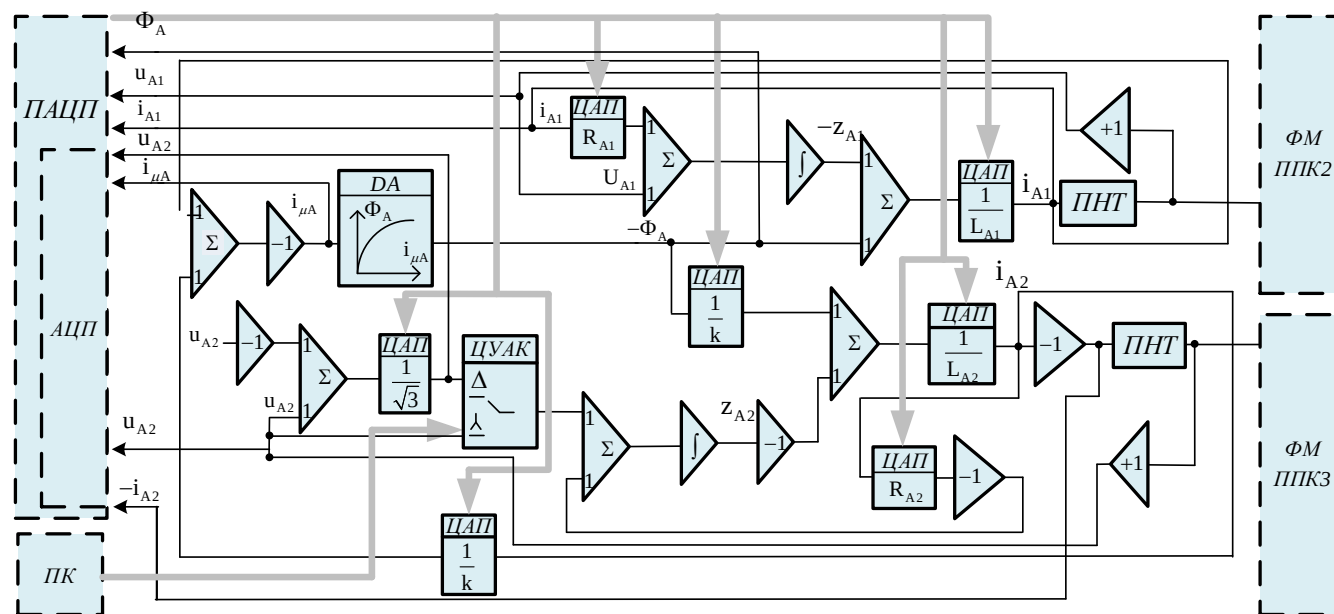
Гибридный сопроцессор трансформатора (ГСП Т)

Всережимная математическая модель j -ой фазы Т:

$$\begin{cases} \frac{di_{j1}}{dt} = \frac{1}{L_{j1}} \cdot \left(u_{j1} - W_{j1} \cdot \frac{d\Phi_j}{dt} - R_{j1} \cdot i_{j1} \right) \\ \frac{di_{j2}}{dt} = \frac{1}{L_{j2}} \cdot \left(W_{j2} \cdot \frac{d\Phi_j}{dt} - u_{j2} - R_{j2} \cdot i_{j2} \right) \\ W_{j1} \cdot i_{\mu j} = W_{j1} \cdot i_{j1} - W_{j2} \cdot i_{j2} \\ \Phi_j \equiv f(i_{\mu j}) \end{cases}$$

где: u_{j1} – напряжение j -ой фазы первичной обмотки Т; u_{j2} – напряжение j -фазы вторичной обмотки Т, которое при схеме соединения обмоток в звезду равно фазному, а в треугольник – линейному; i_{j1} и i_{j2} – токи первичной и вторичной обмоток j -ой фазы Т; W_{j1} и W_{j2} – число витков первичной и вторичной обмоток j -ой фазы Т; Φ_j – основной магнитный поток j -ой фазы Т; $i_{\mu j}$ – ток намагничивания j -ой фазы Т; R_{j1} и L_{j1} , R_{j2} и L_{j2} – активные сопротивления и индуктивности рассеивания первичной и вторичной обмоток j -ой фазы Т.

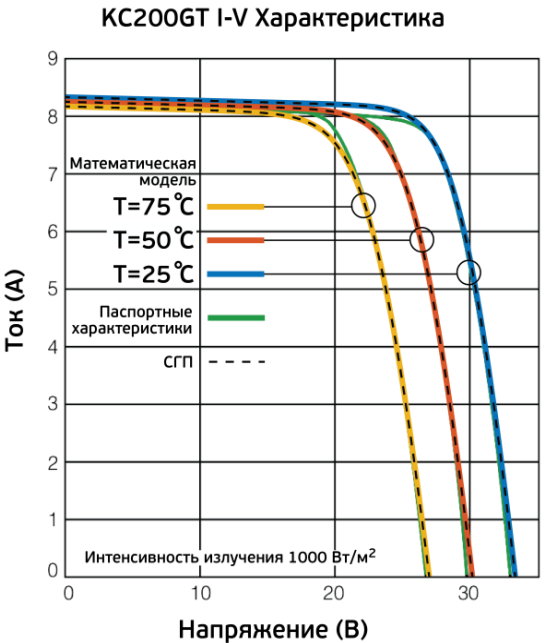
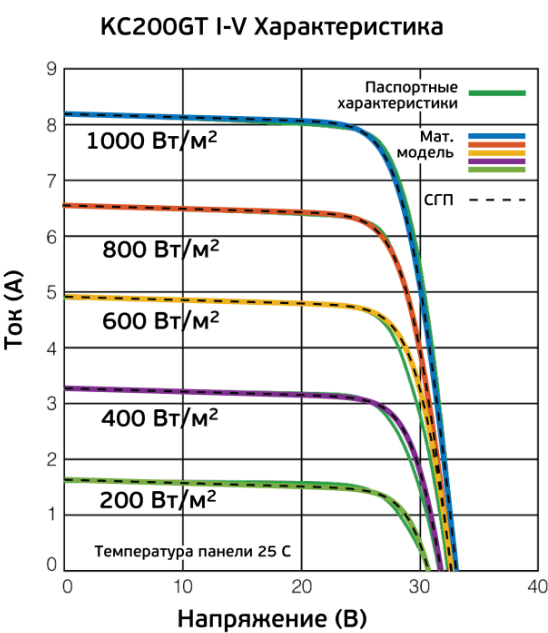
Функциональная схема фазы А ГСП Т



Тестовые исследования СГП ФСЭС

Тестовые исследования математической модели солнечных элементов

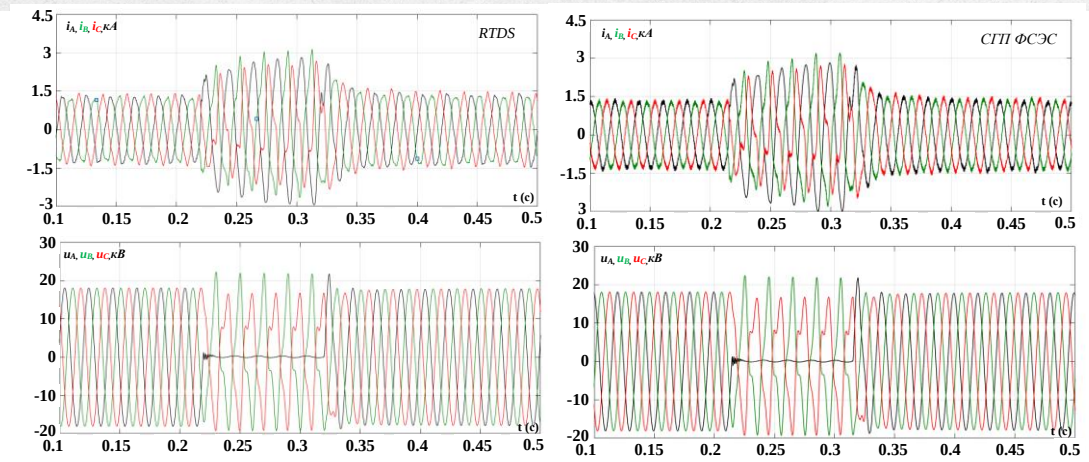
Multi-Crystalline	
Параметр	Kyocera KG200GT
I_{sc} , А	8,21
V_{oc} , В	32,9
q , К	$1,602 \cdot 10^{-19}$
K , Дж/К	$1,381 \cdot 10^{-23}$
K_i , мА/°С	3,18
K_v , мВ/°С	-123
A_1	1
A_2	1,2
p	2,2
N_{sr} , шт	54
R_{sr} , Ом	0,32
R_p , Ом	145



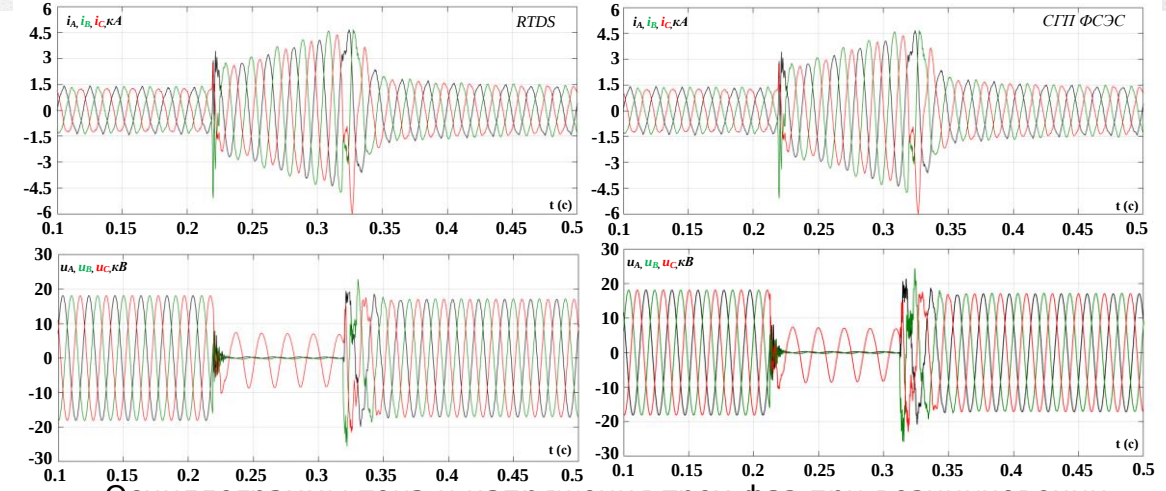
Сравнение ВАХ двух-диодной модели СЭ воспроизводимой в СПСЭ с экспериментальными данными Multi-Crystalline Kyocera KG200GT

Тестовые исследования СГП ФСЭС

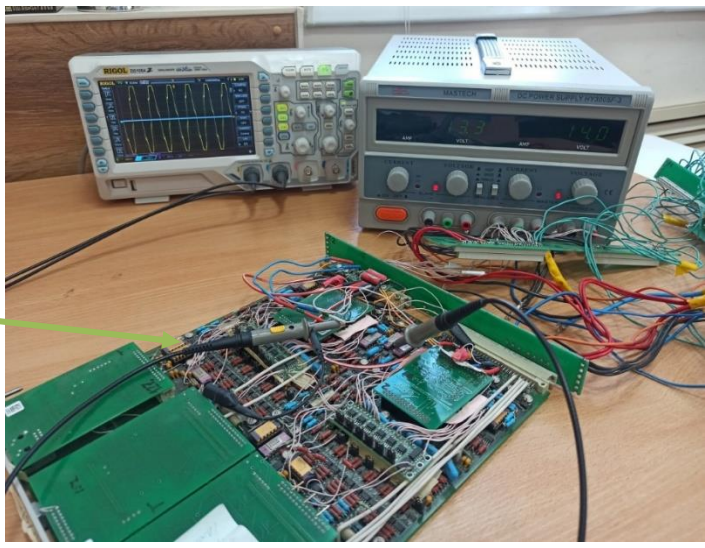
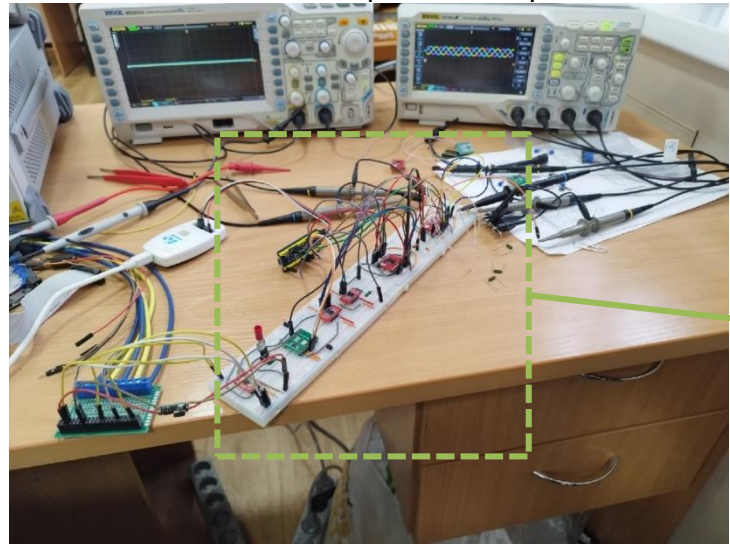
Сравнение СГП ФСЭС с моделью ФСЭС реализованной в ПАК RTDS



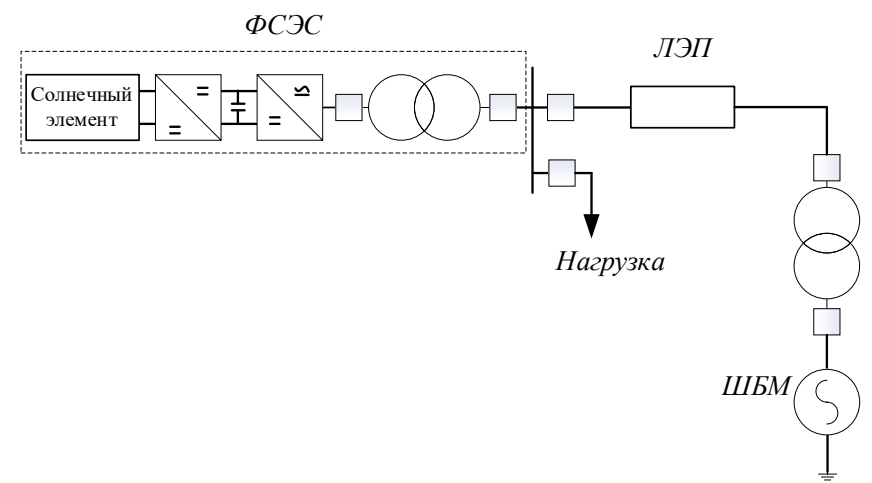
Осциллограммы тока и напряжения трех фаз при возникновении однофазного короткого замыкания



Осциллограммы тока и напряжения трех фаз при возникновении междуфазного короткого замыкания



СГП ФСЭС

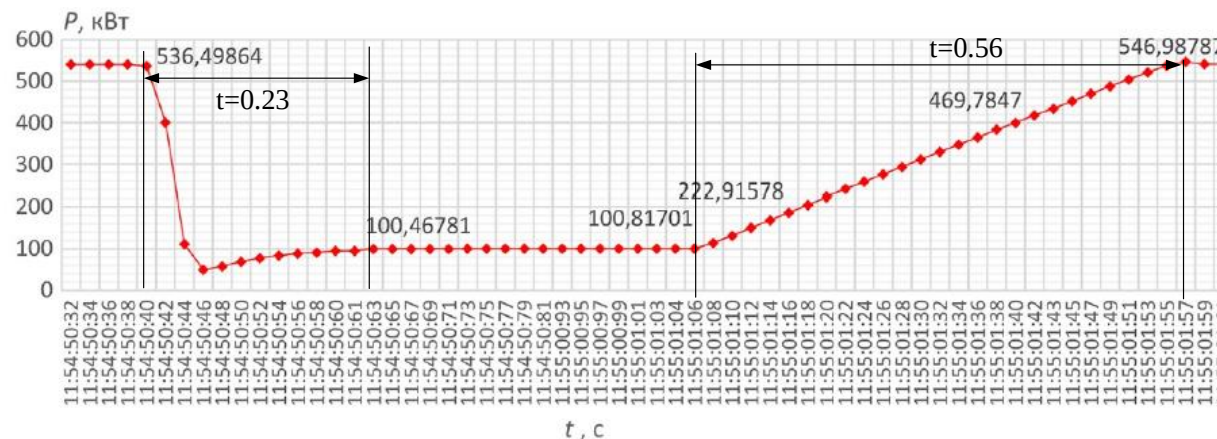
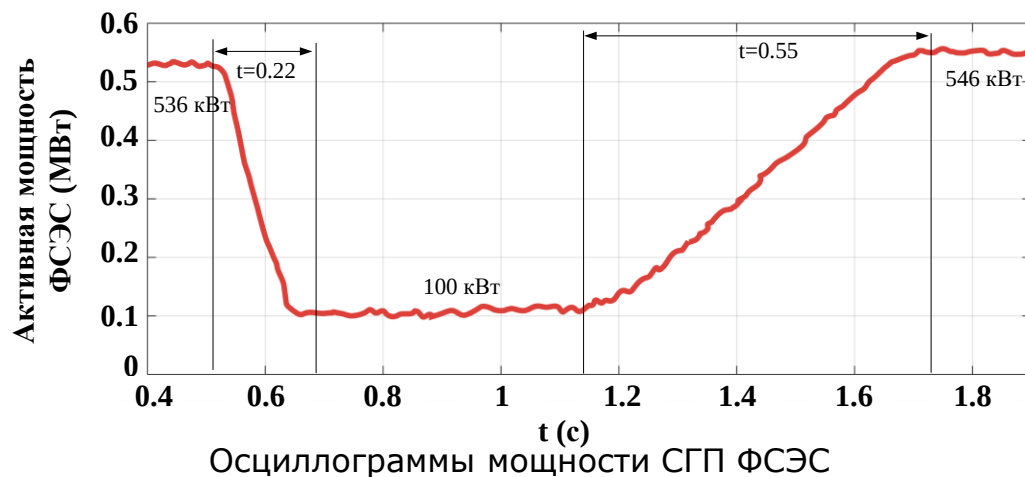


Исследуемая схема ЭЭС с ФСЭС

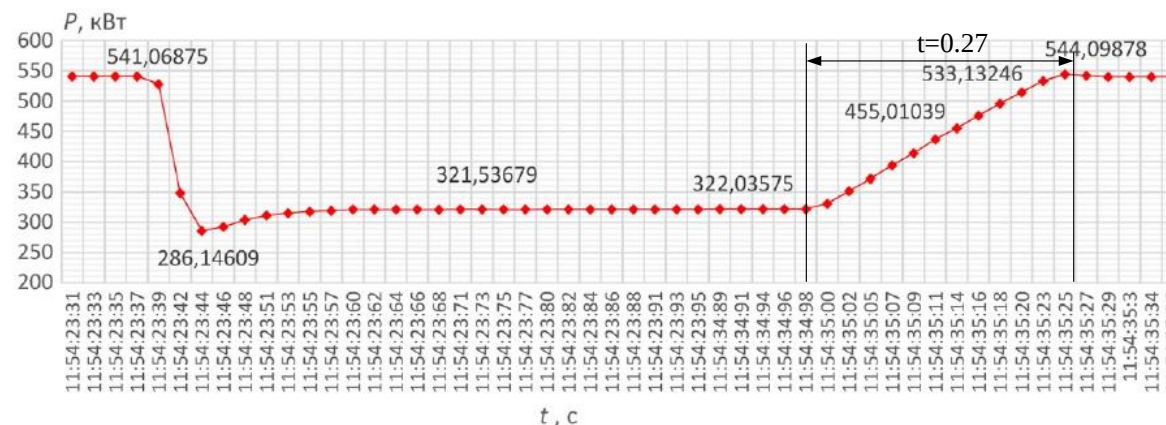
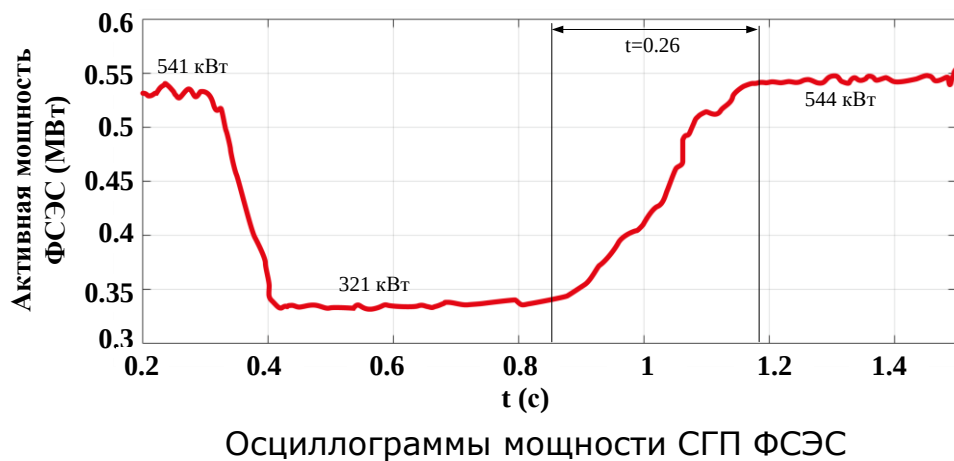
Тестовые исследования СГП ФСЭС

Сравнение СГП ФСЭС с натурными данными

Опыт №1

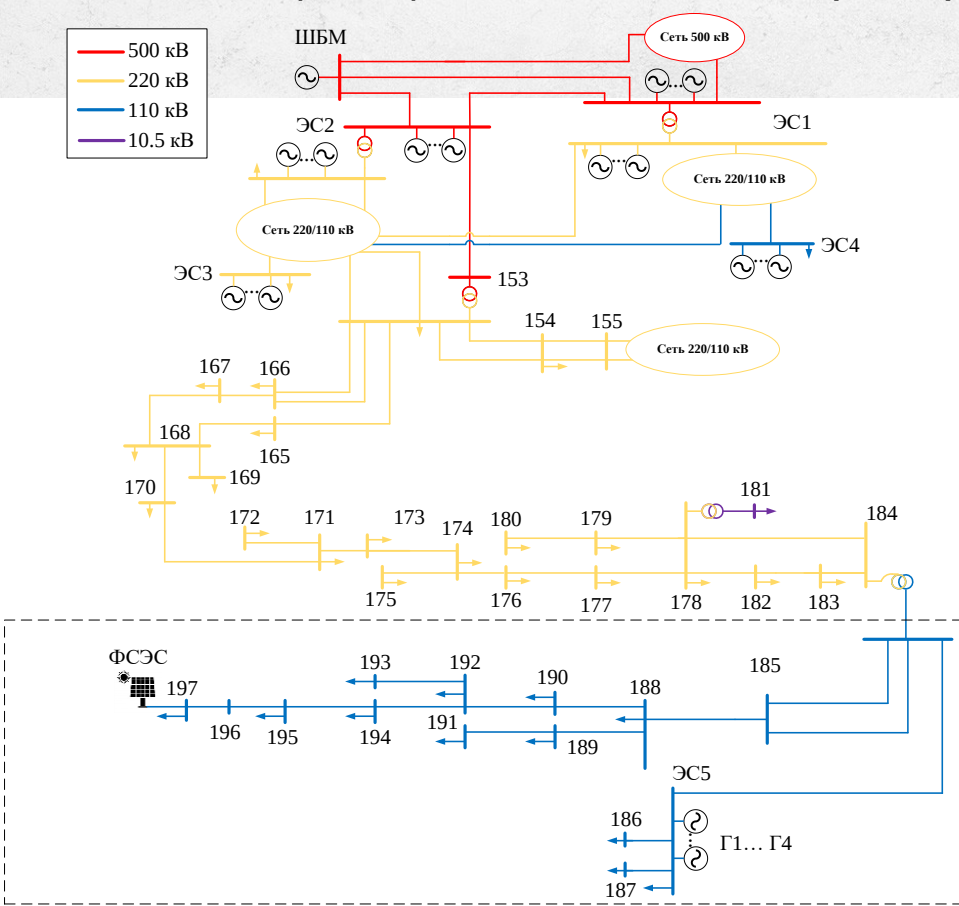


Опыт №2

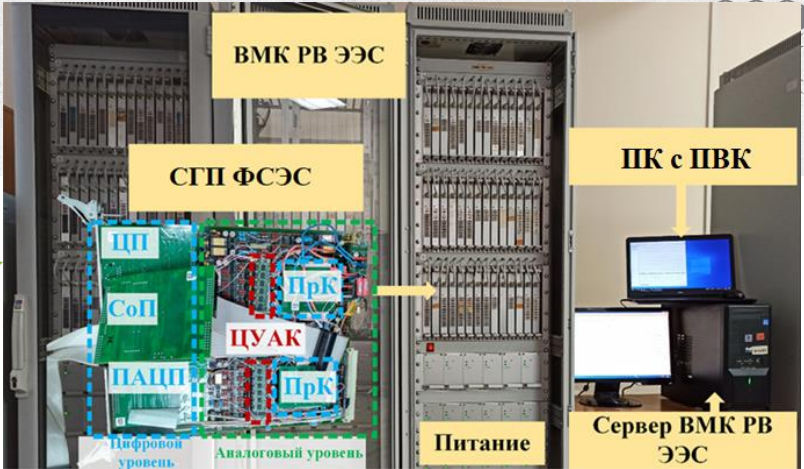


Тестовые исследования СГП ФСЭС

Тестовая электроэнергетическая система (ТЭЭС)



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



Экспериментальная установка ВМК РВ ЭЭС с СГП ФСЭС и персональный компьютер (ПК) с программно-вычислительным комплексом (ПВК) в котором реализуется модернизированная обобщенная модель ФСЭС

Реализуются два направления исследований:

1. Верификация модернизированной обобщенной модели ФСЭС.
2. Возможность воспроизведения колебаний режимных параметров при функционировании ФСЭС в слабых сетях и средств их демпфирования.

В рамках первого направления рассмотрены следующие сценарии:

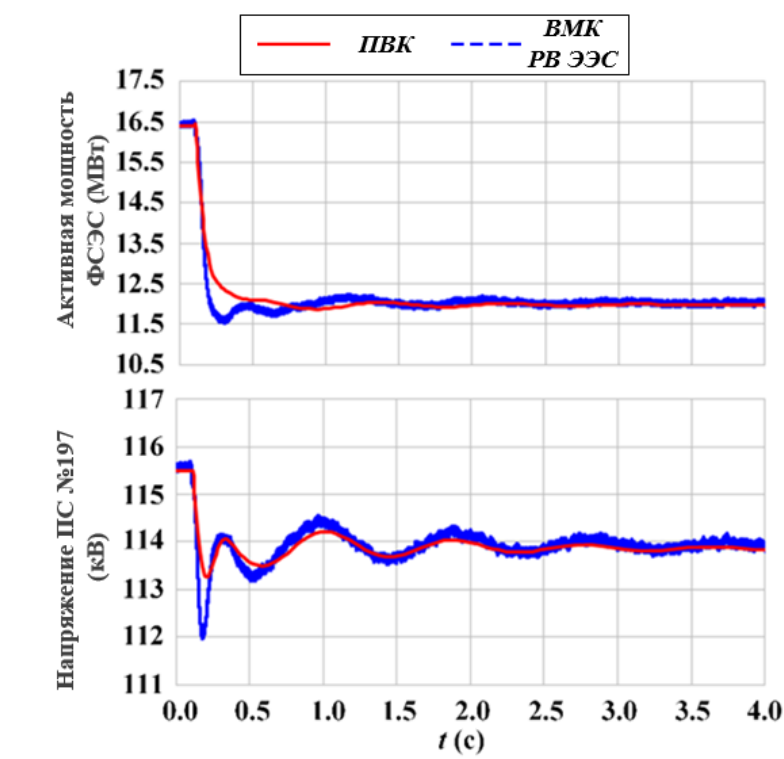
1. Изменение мощности, выдаваемой ФСЭС, в качестве внутреннего малого возмущения и наброс нагрузки в точке подключения ФСЭС в качестве внешнего малого возмущения.
2. Плавное увеличение мощности ФСЭС и трехфазное короткое замыкание (КЗ). КЗ воспроизводятся на ПС 196 и ПС 153 шины 220 кВ.
3. Трехфазное КЗ для оценки определения с помощью модернизированной обобщенной модели предельного времени отключения КЗ.

В рамках второго направления рассмотрены следующие сценарии:

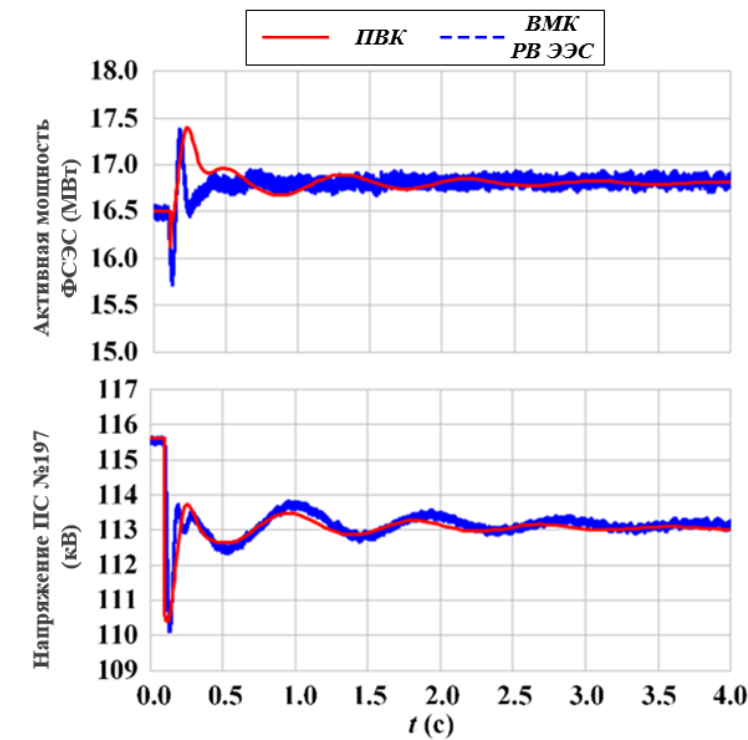
1. Отключение ЛЭП 184-185.
2. Увеличение солнечной инсоляции.

Тестовые исследования СГП ФСЭС

1.1. «Малые» возмущения: уменьшение уставки по мощности ФСЭС на 5 МВт, увеличение нагрузки на 5 МВт в точке подключения. Сильная сеть $OKЗ = 4,23$.



Уменьшение мощности ФСЭС



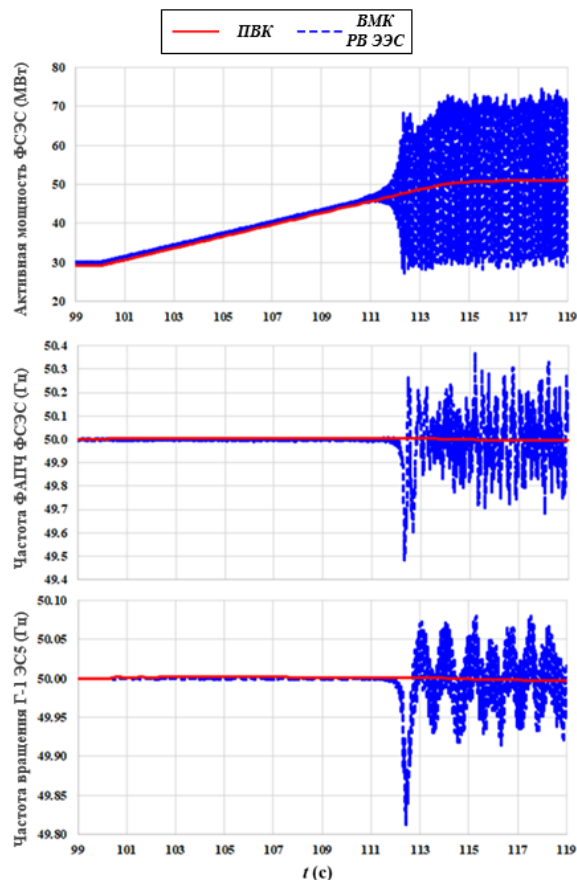
Увеличение нагрузки в узле подключения
ФСЭС

Модель	Параметры	
Модернизированная обобщенная модель ФСЭС	$K_{p_ФАПЧ}$ (oe)	0,1
	$K_{i_ФАПЧ}$ (oe/c)	1,0
	T_{PC} (c)	0,04
	T_g (c)	0,02
	$K_{p_КУН}$ (oe)	20,0
	$K_{i_КУН}$ (oe/c)	5,0
СГП ФСЭС	$K_{p_ФАПЧ}$ (oe)	10,0
	$K_{i_ФАПЧ}$ (oe/c)	350,0
	$K_{p_КУТ}$ (oe)	2,0
	$K_{i_КУТ}$ (oe/c)	20,0
	$K_{p_КУН}$ (oe)	20,0
	$K_{i_КУН}$ (oe/c)	5,0

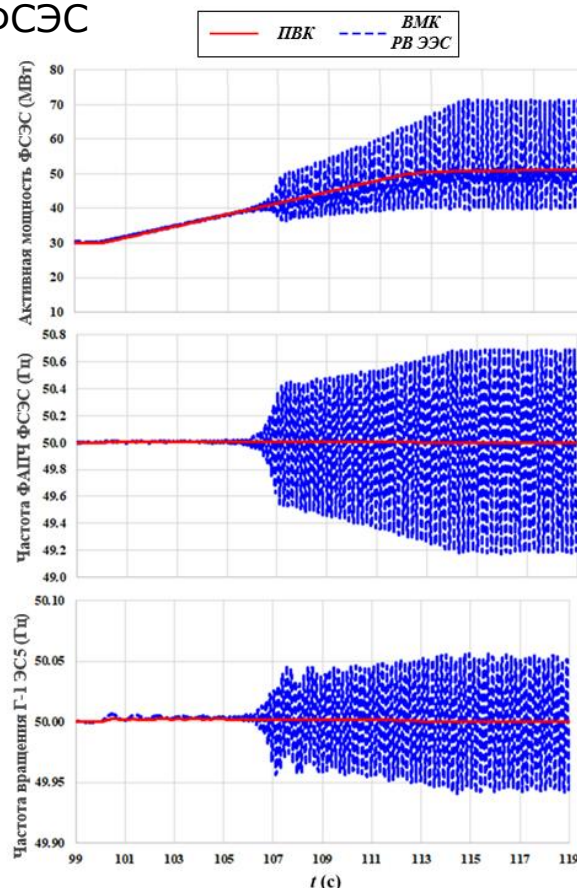
Вывод: результаты практически
совпадают для обоих случаев.

Тестовые исследования СГП ФСЭС

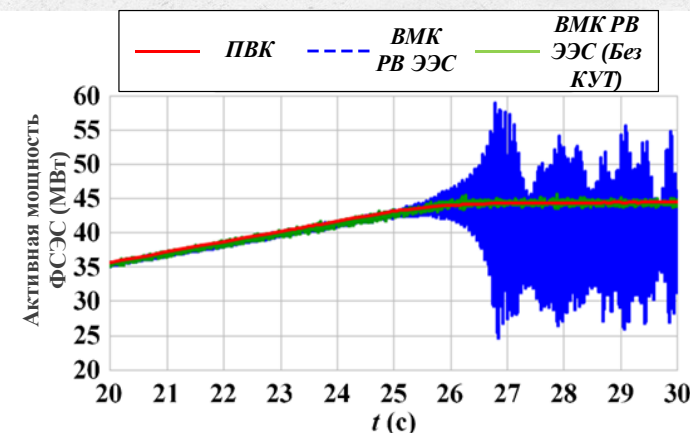
1.2. Плавное увеличение мощности ФСЭС



Осциллограммы переходных процессов при интеграции ФСЭС с увеличением установленной мощности (пропорциональное увеличение нагрузки в узле подключения ФСЭС)



Осциллограммы переходных процессов при интеграции ФСЭС с увеличением установленной мощности (пропорциональное уменьшение мощности традиционной генерации)

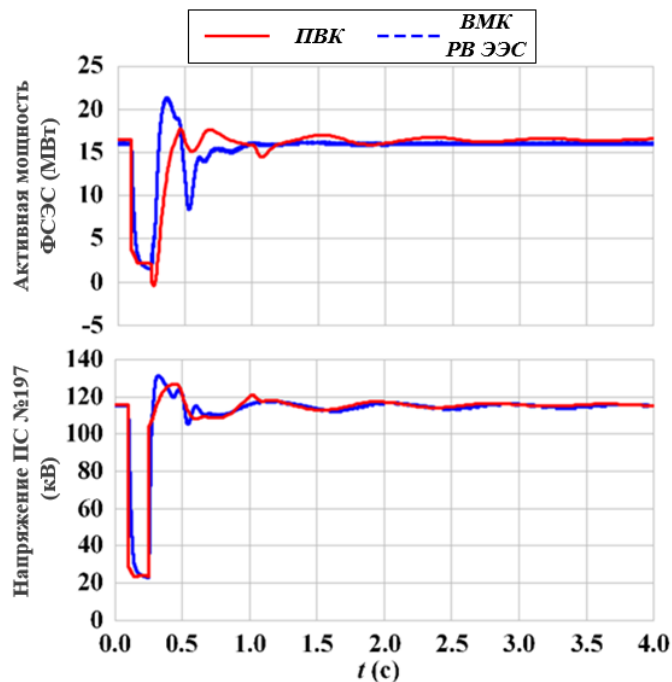


Осциллограммы переходных процессов при интеграции ФСЭС с увеличением установленной мощности (пропорциональное увеличение нагрузки в узле подключения ФСЭС)

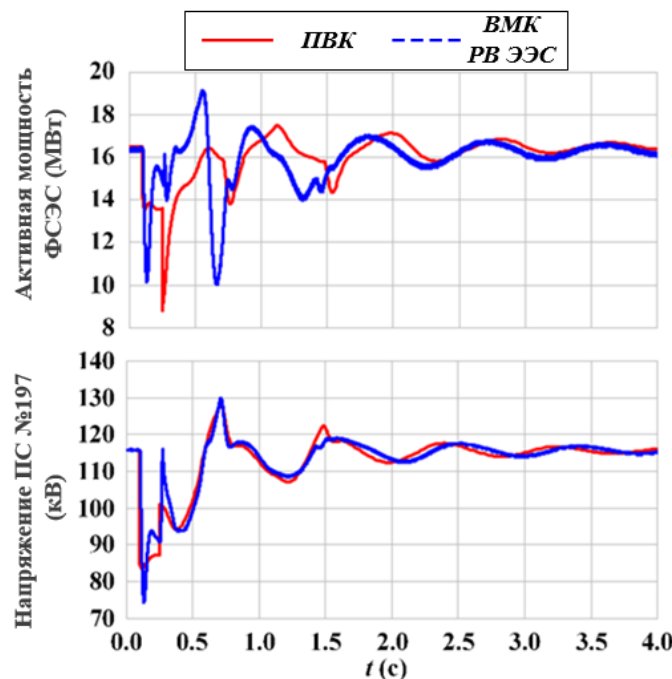
Вывод: увеличение установленной мощности ФСЭС при использовании модернизированной обобщенной модели оказывается практически безграничным и не приводит к нарушению устойчивости, в то время как при использовании СГП ФСЭС наблюдается обратная ситуация – увеличение выдаваемой мощности ФСЭС до 50 МВт приводит к возникновению незатухающих колебаний с частотой около 13 Гц и увеличивающейся амплитудой, которые также распространяются на внешнюю сеть. Быстродействующий КУТ играет важную роль, его отсутствие в обобщенной модели и соответственно игнорирование динамики его взаимодействия с ФАПЧ приводит к радикальной разнице в результатах моделирования. В случае его исключения в СГП ФСЭС полученные результаты совпадают с обобщенной моделью, что подтверждает сданный вывод.

Тестовые исследования СГП ФСЭС

1.3. Близкое КЗ на шинах соседней подстанции (ПС 196) и удалённое КЗ на шинах питающей подстанции (ПС 153 шины 220 кВ) длительностью 150 мс. Сильная сеть $OK3 = 4,23$.

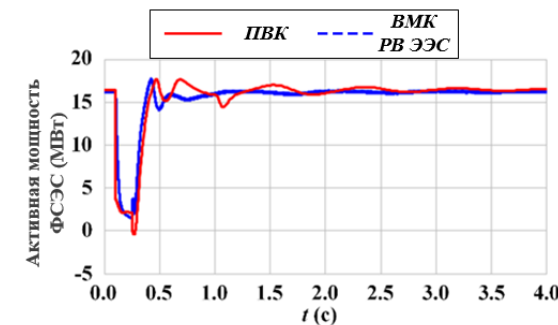


Близкое КЗ



Удалённое КЗ

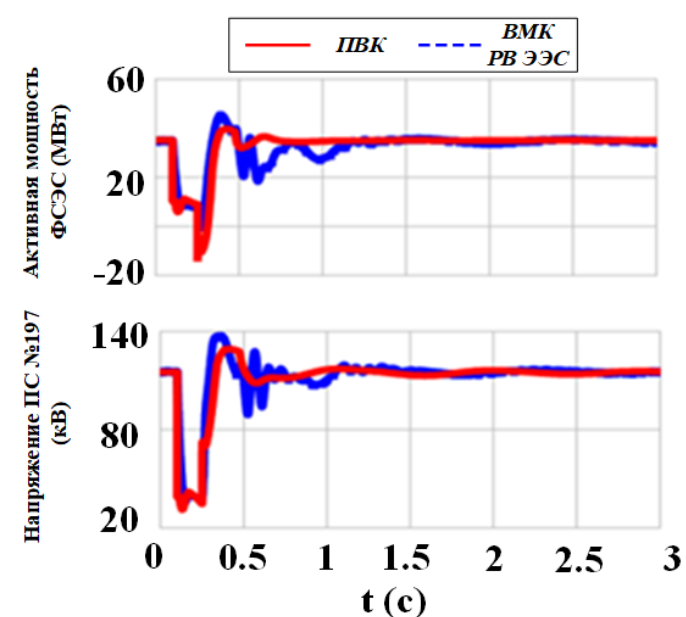
Вывод: Основные различия возникают в осциллограммах активной мощности для обоих случаев КЗ. В результатах, полученных с помощью СГП ФСЭС, после ликвидации КЗ наблюдается всплеск активной мощности, который обусловлен процессом разряда конденсатора цепи постоянного тока (ЦПТ). Данный процесс в модернизированной обобщенной модели отсутствует. При исключении ЦПТ в СГП ФСЭС совпадение результатов улучшилось.



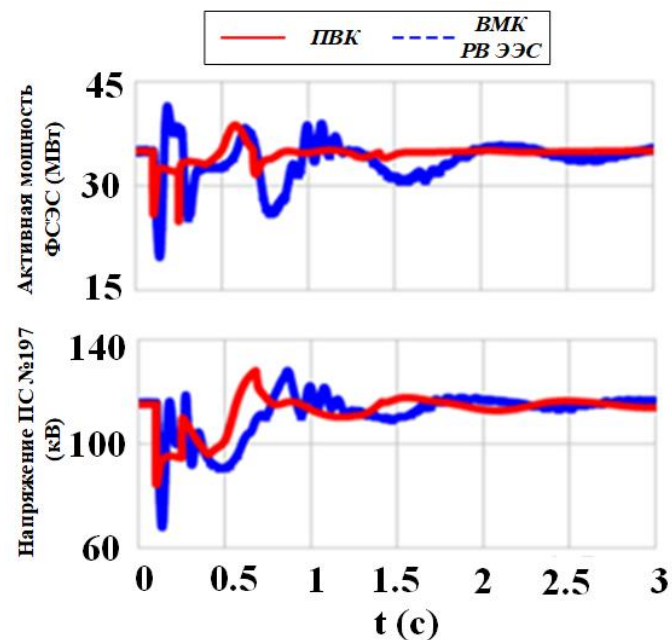
ЦПТ исключена

Тестовые исследования СГП ФСЭС

1.4. Близкое КЗ на шинах соседней подстанции (ПС 196) и удалённое КЗ на шинах питающей подстанции (ПС 153 шины 220 кВ) длительностью 150 мс. Слабая сеть $OKЗ = 1,99$.

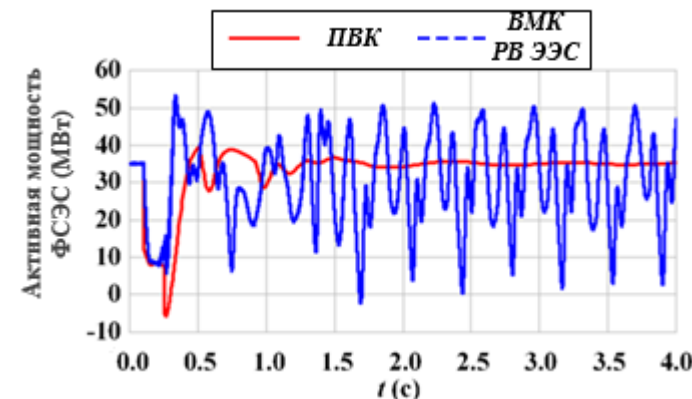


Близкое КЗ



Удалённое КЗ

Вывод: При низком ОКЗ формируется большая погрешность по сравнению с предыдущим случаем. Величина погрешности также зависит от динамики ЦПТ. При ее исключении погрешность снижается, но все равно остается большей по сравнению со случаем сильной сети. Увеличенная величина погрешности связана с преобладающим влиянием на достоверность результатов динамики САУ. Добавление ФАПЧ в обобщенную модель является недостаточным. Также спектр процессов, на которые реагирует ФАПЧ, ограничен при использовании модернизированной обобщенной модели.



Увеличенные коэффициенты ФАПЧ

1.5. Для анализа достоверности расчетов предельного времени КЗ выполнены аналогичные предыдущему эксперименту близкое и далекое КЗ. Предельное время определяется по факту потери синхронизма ФАПЧ с сетью.

Место КЗ	Предельное время КЗ (мс)					
	Сильная сеть			Слабая сеть		
	ПВК	ВМК	$\Delta t_{\text{пред}}$	ПВК	ВМК	$\Delta t_{\text{пред}}$
Близкое	330	350	20	300	230	-70
	(530)	(400)	(-130)	(550)	(250)	(-300)
Удаленное	250	270	20	240	200	-40
	(220)	(210)	(-10)	(200)	(160)	(-40)

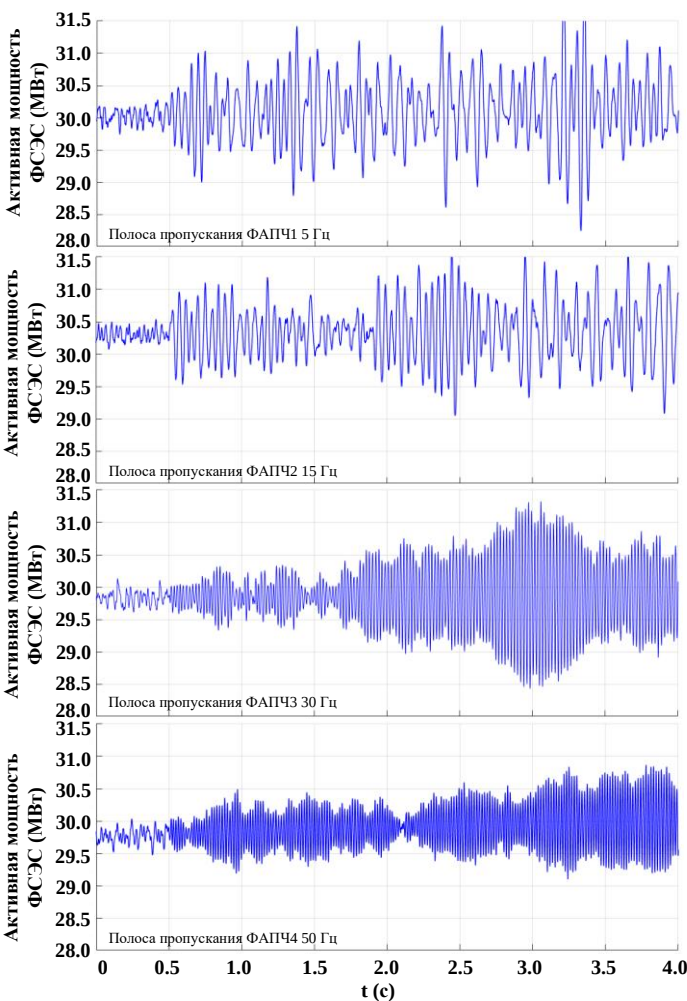
Вывод: в сильной сети для обоих случаев КЗ значения предельного времени практически совпадают. В слабой сети для обоих случаев КЗ погрешность расчета увеличилась, что связано с существенной зависимостью отклика САУ сетевого инвертора от адекватности воспроизведения быстрых контуров САУ, которые в модернизированной обобщённой модели упрощены. Значения предельного времени КЗ для второго подхода к внедрению приведены в скобках. При удаленном КЗ изменения предельного времени аналогичные. Однако при близком КЗ для обоих ОКЗ происходит увеличение величины погрешности в предельном времени по отношению к предыдущему способу внедрения. Рост погрешности обусловлен упрощенным воспроизведением быстрых контуров САУ сетевого инвертора. При использовании СГП ФСЭС устойчивость продолжает зависеть от динамики быстрых контуров и при разных подходах к внедрению предельное время КЗ практически не меняется.

Тестовые исследования СГП ФСЭС

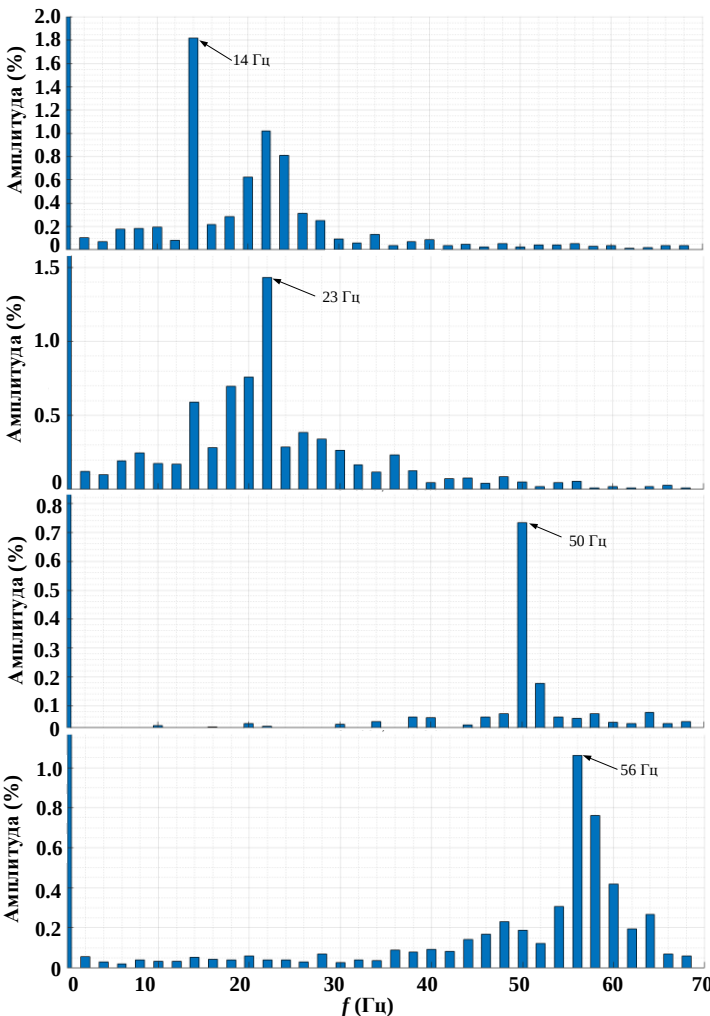


ИНЖЕНЕРНАЯ
ШКОЛА
ЭНЕРГЕТИКИ

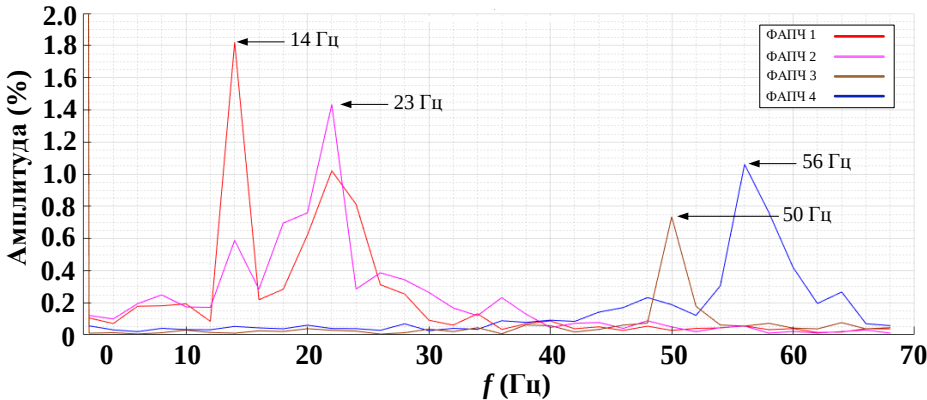
2.1. Отключение ЛЭП 184-185 в 0,5 секунд.



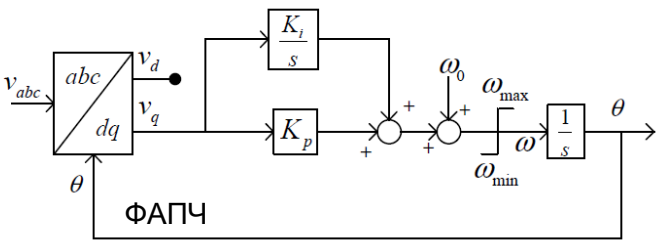
Осциллограммы активной мощности
ФСЭС при разных полосах
пропускания ФАПЧ



Гармонический спектр мощности
ФСЭС при разных полосах
пропускания ФАПЧ



Гармонический спектр мощности ФСЭС при
разных полосах пропускания ФАПЧ

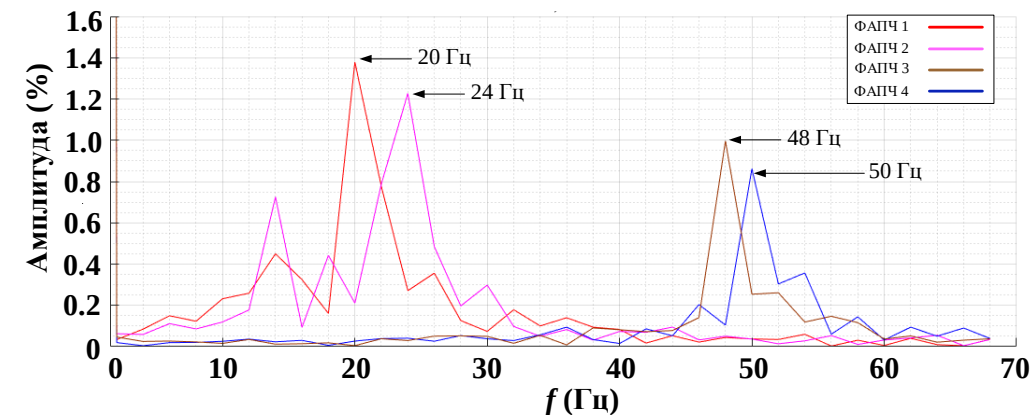
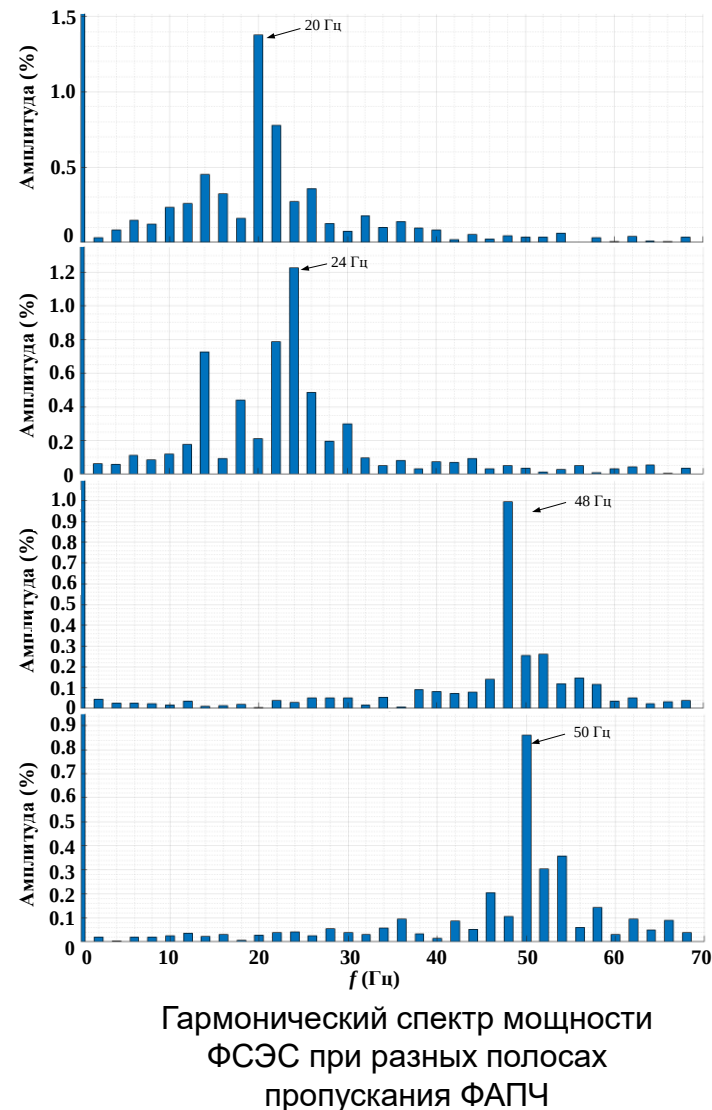
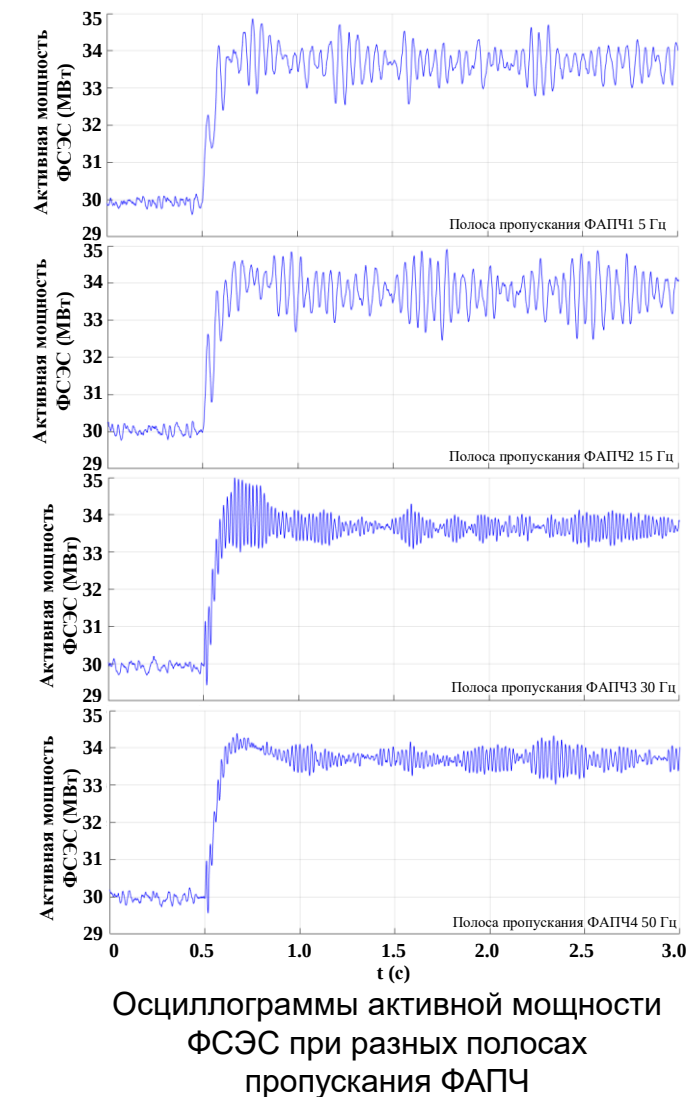


$$\begin{aligned} f_{III} &= 15 \\ \omega_{III} &= 2 \cdot \pi \cdot f_{III} = 94.248 \\ K_{i_{FAPC}} &= \frac{\omega_{III}^2}{2 + \sqrt{5}} = 2096.9 \\ K_{p_{FAPC}} &= \sqrt{2 \cdot K_{i_{FAPC}}} = 64.76 \end{aligned}$$

Пример расчета коэффициентов блока ФАПЧ, при
полосе пропускания 15 Гц

Тестовые исследования СГП ФСЭС

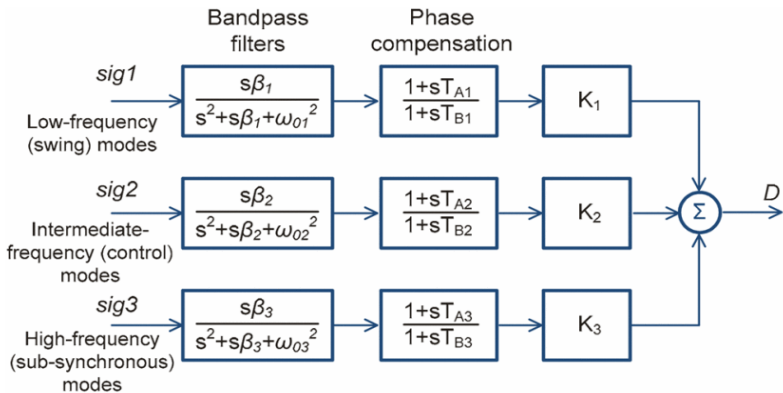
2.2. Увеличение солнечной инсоляции.



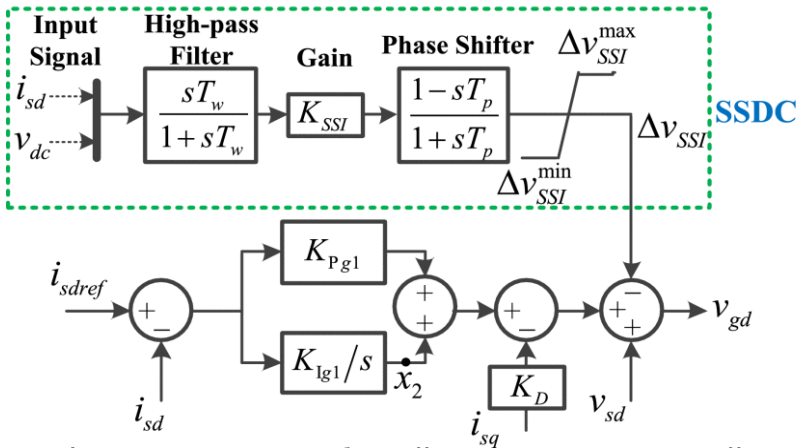
Гармонический спектр мощности ФЭС при разных полосах пропускания ФАПЧ

Выводы: Экспериментально доказано, что с помощью разработанного СГП ФСЭС могут быть воспроизведены субсинхронные колебания режимных параметров различной частоты и амплитуды при изменении основных, влияющих на них факторов: настройка блока ФАПЧ и изменение ОКЗ сети.

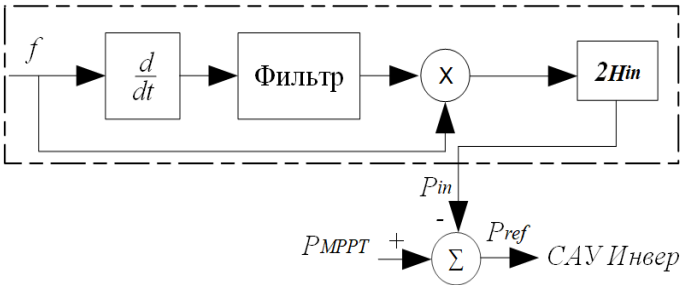
Подходы к демпфированию колебаний



Комбинированная система регулятора демпфирования колебаний [1]

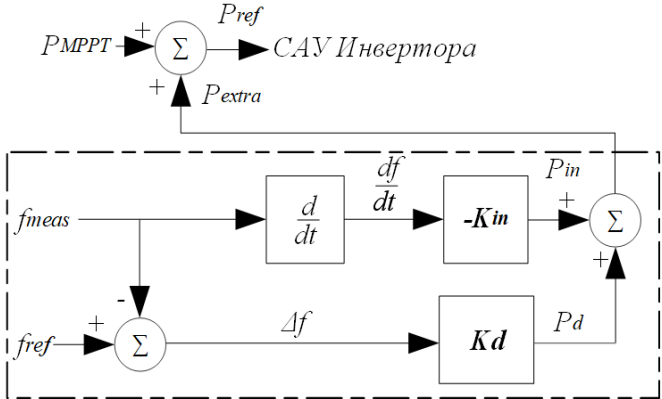


Регулятора демпфирования колебаний предназначенный для смягчения последствий, связанных с субсинхронными колебаниями [2]

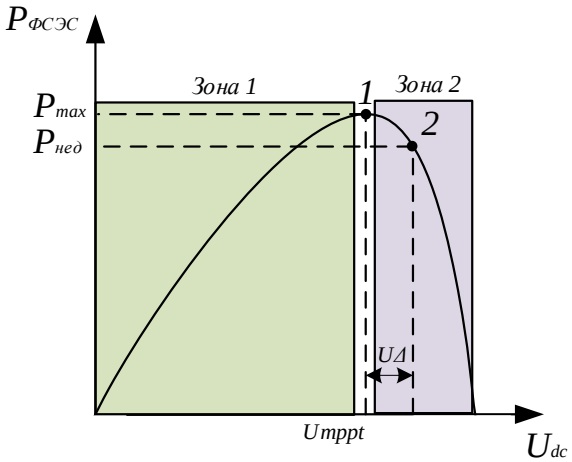


а)

Схема блока синтетической инерции: а) одноконтурное управление, б) двухконтурное управление [3]



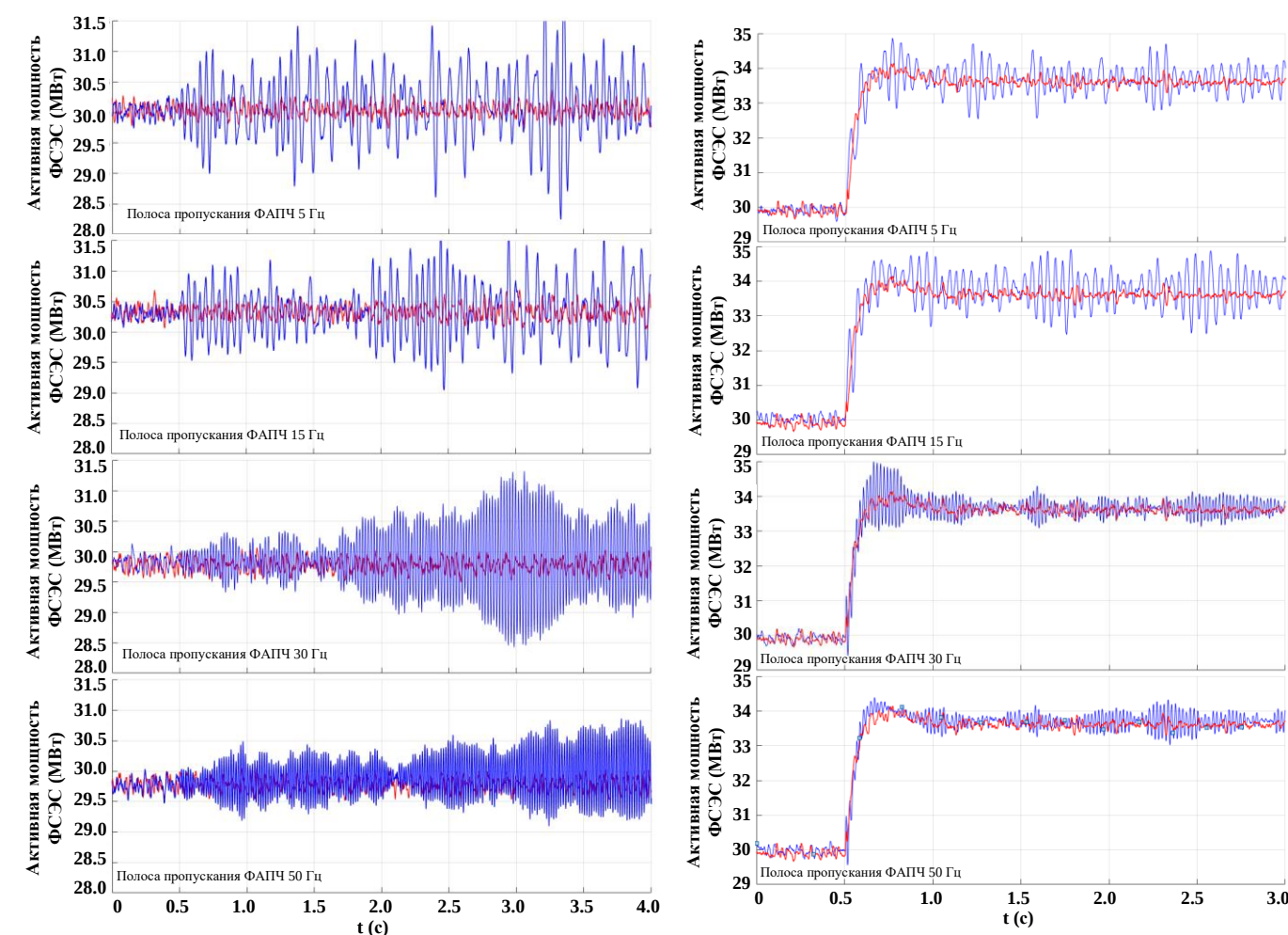
б)



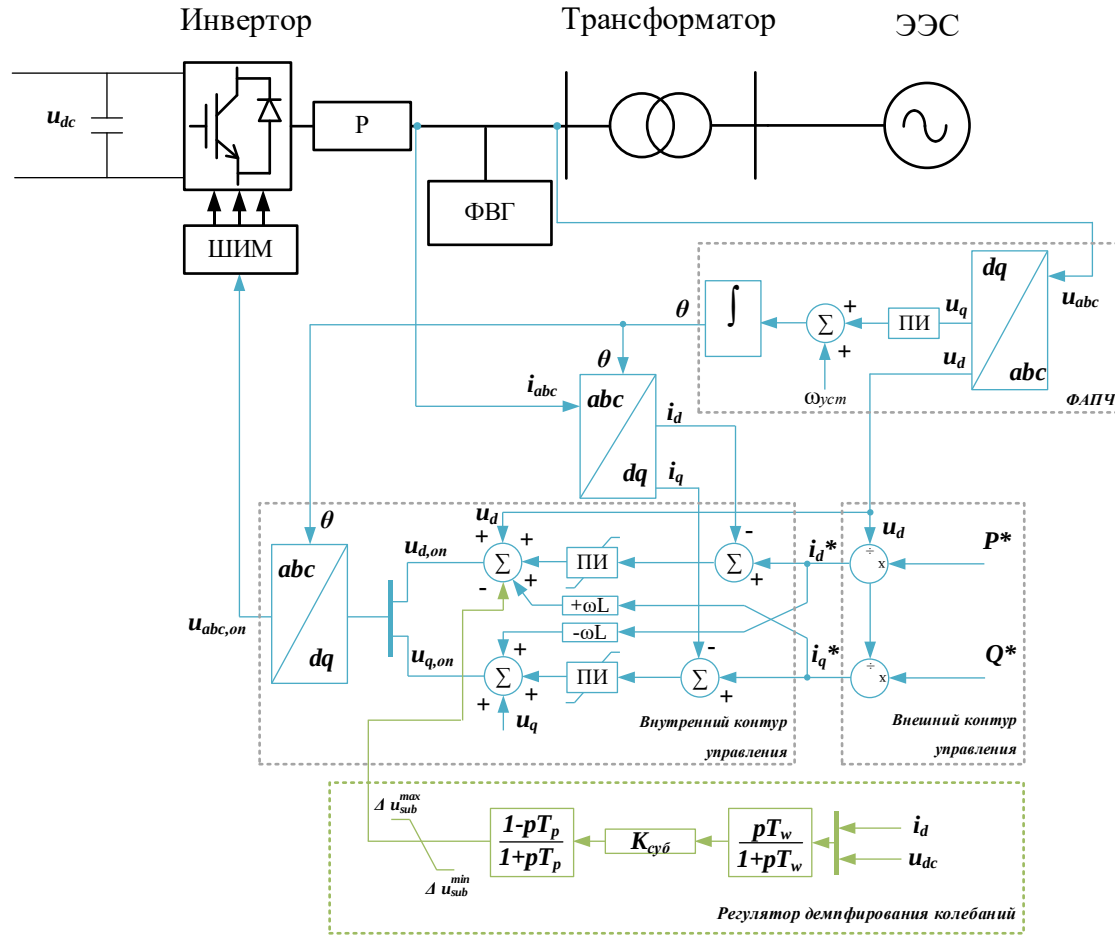
Зависимость мощности от напряжения цепи постоянного тока ФЭС [4]

[1] <https://doi.org/10.1109/PTC.2011.6019421>
[2] <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2017.2682197>
[3] <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115798>
[4] <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106645>

2.3. Оценка влияния регулятора демпфирования колебаний



Осциллограммы активной мощности ФЭС при разных полосах пропускания ФАПЧ, где синяя кривая – ФЭС без регулятора демпфирования колебаний, красная кривая – ФЭС с регулятором демпфирования колебаний



САУ СП ФЭС дополненная регулятором демпфирования колебаний

1. Широкомасштабное внедрение ФСЭС на базе СП существенно изменяет динамику протекания переходных процессов в ЭЭС из-за особенностей функционирования СП и их систем управления. Вследствие этого в ЭЭС, особенно в слабых сетях, могут наблюдаться явления, связанные с возникновением слаботухающих и незатухающих колебаний режимных параметров различной частоты и амплитуды, которые возникают по причине неподходящей настройки САУ СП ФСЭС для разных ОКЗ сети.
2. Для решения возникающих проблем, необходима полная и достоверная информация о процессах в ФСЭС и ЭЭС в целом. Основным способ получения такой информации – математическое моделирование. Ввиду ряда ограничений в программно-вычислительных и программно-аппаратных комплексах, предложен альтернативный гибридный вариант моделирования ФСЭС в составе ЭЭС.
3. Разработана теоретически и практически обоснованная концепция всережимного моделирования ФСЭС в составе ЭЭС, а также структура и принцип построения средств ее реализации.
4. Проведённые экспериментальные исследования подтверждают свойства и возможности разработанной концепции и средств её реализации, необходимые для надежного и эффективного решения задач проектирования, исследования и эксплуатации ФСЭС в составе ЭЭС, особенно в слабых сетях.



1. Обоснована оригинальная концепция всережимного моделирования ФСЭС в составе ЭЭС, согласно которой предполагается использование физических моделей для повышающего преобразователя постоянного тока и статического преобразователя напряжения, что позволяет полно и достоверно воспроизводить динамику цепи постоянного тока и функционирование быстродействующих систем управления ФСЭС: блока фазовой автоподстройки частоты и внутреннего контура управления током.
2. Доказано, что модернизация обобщенной математической модели ФСЭС путём добавления только блока фазовой автоподстройки частоты является недостаточной для полного и достоверного воспроизведения колебаний режимных параметров различной частоты, возникающих по различным причинам при функционировании ФСЭС в слабых сетях. Необходимым в данном случае является также учёт в обобщенной математической модели ФСЭС всей структуры внутреннего контура управления током, основу которого, как правило, составляют ПИ-регуляторы во вращающихся с частотой сети осях d, q .

1. Разработанная концепция всережимного моделирования ФСЭС в составе ЭЭС, в частности использование физического моделирования для воспроизведения повышающего преобразователя постоянного тока и статического преобразователя напряжения, вносит определенный вклад в дальнейшее развитие подходов к моделированию устройств с аналогичной топологией силовых преобразователей, например, систем накопления электроэнергии на основе аккумуляторных батарей, в составе ЭЭС.
2. Определены основные причины существования проблемы моделирования ФСЭС в составе ЭЭС с помощью обобщенных математических моделей, особенно в случае их функционирования в слабых сетях, на основе которых сделаны рекомендации по возможным направлениям модернизации таких математических моделей в зависимости от решаемых задач, схемно-режимных условий и возмущений.
3. Обоснованы факторы, влияющие на возникновение колебательных процессов в ЭЭС с ФСЭС, среди которых основными являются отношение короткого замыкания в точке подключения ФСЭС к ЭЭС, в случае его уменьшения вероятность колебаний режимных параметров возрастает, вторым является полоса пропускания блока фазовой автоподстройки частоты.



Результаты диссертационной работы реализованы и используются:

1. В рамках гранта Российского научного фонда, Договор № 21-79-00275 от 27.07.21 г. «Разработка методов и средств повышения колебательной устойчивости электроэнергетических систем с помощью объектов возобновляемой генерации», сроки выполнения: 27.07.21 – 30.06.23 гг.
2. В рамках гранта Российского научного фонда, Договор № 21-79-00129 от 27.07.2021 «Разработка технологии управления силовыми преобразователями генерирующих установок на базе возобновляемых источников энергии для обеспечения всережимной устойчивости современных энергообъединений», сроки выполнения: 27.07.21 – 30.06.23 гг.
3. В рамках гранта Российского научного фонда, Договор № 18-79-10006 от 02.08.2018 «Исследование проблемы достоверности расчетов режимов и процессов в электроэнергетических системах с активно-адаптивными сетями и распределенной генерацией и разработка методики их всережимной верификации», сроки выполнения: 02.08.18 – 31.12.21 гг.
4. В рамках образовательных и научных программ при подготовке бакалавров и магистрантов по направлению «Электроэнергетика и электротехника» в ОЭЭ ИШЭ ФГАОУ ВО НИ ТПУ.



По теме диссертационной работы опубликовано 26 печатных работ, в том числе 6 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 6 статей в журналах, индексируемых в базах данных Web of Science/Scopus. Основные положения диссертационной работы докладывались, обсуждались и демонстрировались на 14 международных и всероссийских научно-технических конференциях и конкурсах. Получены 1 патент РФ на изобретение и 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

1. **Рудник В.Е.**, Суворов А.А., Рубан Н.Ю., Андреев М.В., Бай Ю.Д. Исследование функционирования алгоритма синтетической инерции в электроэнергетических системах разной плотности. iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 3. С. 465-486.
2. Суворов А.А., Аскарлов А.Б., **Рудник В.Е.**, Разживин И.А., Андреев М.В., Бай Ю.Д. Верификация численных расчётов электромеханических переходных процессов при оценке устойчивости электроэнергетических систем с генерирующими объектами, использующими ВИЭ. Электрические станции. 2022. № 1 (1086). С. 25-37.
3. Суворов А.А., Аскарлов А.Б., **Рудник В.Е.**, Андреев М.В., Бай Ю.Д. Синтез и тестирование типовых структур систем автоматического управления на основе виртуального синхронного генератора для генерирующих установок с силовым преобразователем. Электрические станции. 2022. № 3 (1088). С. 43-57.
4. Круглыхин П.И., Уфа Р.А., **Рудник В.Е.**, Васильев А.С. Оценка влияния объектов солнечной генерации на устойчивость энергорайона со слабыми связями. Интеллектуальная электротехника. 2022. № 3 (19). С. 79-99.
5. Разживин И.А., Суворов А.А., Андреев М.В., **Рудник В.Е.**, Гусев А.С. Исследование влияния синтетической инерции на динамическую устойчивость электроэнергетических систем. Электричество. 2022. № 8. С. 16-26.
6. Рубан Н.Ю., Аскарлов А.Б., Андреев М.В., Киевец А.В., **Рудник В.Е.** Анализ влияния возобновляемых источников энергии с силовыми преобразователями на процессы в современных энергосистемах. Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2020. № 36. С. 7-30.

1. **Rudnik, V.E.**, Ufa, R.A., Malkova, Y.Y. Analysis of low-frequency oscillation in power system with renewable energy sources. Energy Reports, 2022, 8, pp. 394–405.
2. **Rudnik, V.E.**, Suworov, A.A., Razzhivin, I.A., Ruban, N.Yu., Andreev, M.V. Study of algorithm synthetic inertia functioning in electric networks of different density. Eurasian Physical Technical Journal, 2022, 19(2), pp. 75–85
3. Ufa, R.A., **Rudnik, V.E.**, Malkova, Y.Y., Bay, Y.D., Kosmynina, N.M. Impact of renewable generation unit on stability of power systems. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(46), pp. 19947–19954.
4. Ruban, N., **Rudnik, V.**, Razzhivin, I., Kievec, A. A Hybrid Model of Photovoltaic Power Stations for Model Ling Tasks of Large Power Systems. EEA - Electrotehnica, Electronica, Automatica, 2021, 69(4), pp. 43–49
5. Ufa, R.A., Malkova, Y.Y., **Rudnik, V.E.**, Andreev, M.V., Borisov, V.A.A review on distributed generation impacts on electric power system. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(47), pp. 20347–20361.
6. Razzhivin, I., Suworov, A., Andreev, M., **Rudnik, V.** Study of the influence of synthetic inertia on transient stability of electric power systems. Electrical Engineering, 2022.



ИНЖЕНЕРНАЯ
ШКОЛА
ЭНЕРГЕТИКИ

Особенности и преимущества всережимного моделирования режимов работы фотоэлектрических установок в составе электроэнергетических систем

— СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

Докладчик: Рудник Владимир Евгеньевич
ассистент ОЭЭ, НИЛ «Моделирование ЭЭС» ИШЭ

Организация: Томский политехнический
университет

E-mail: ver3@tpu.ru

Научный руководитель: Суворов Алексей
Александрович

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

Томск, 2023