



ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ



ИНЖЕНЕРНАЯ
ШКОЛА
ЭНЕРГЕТИКИ

РАЗВИТИЕ КОНЦЕПЦИИ УПРАВЛЕНИЯ СЕТЕВЫМИ ИНВЕРТОРАМИ ОБЪЕКТОВ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ В РЕЖИМЕ «ВЕДУЩИЙ»

Докладчик:

СУВОРОВ АЛЕКСЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ,

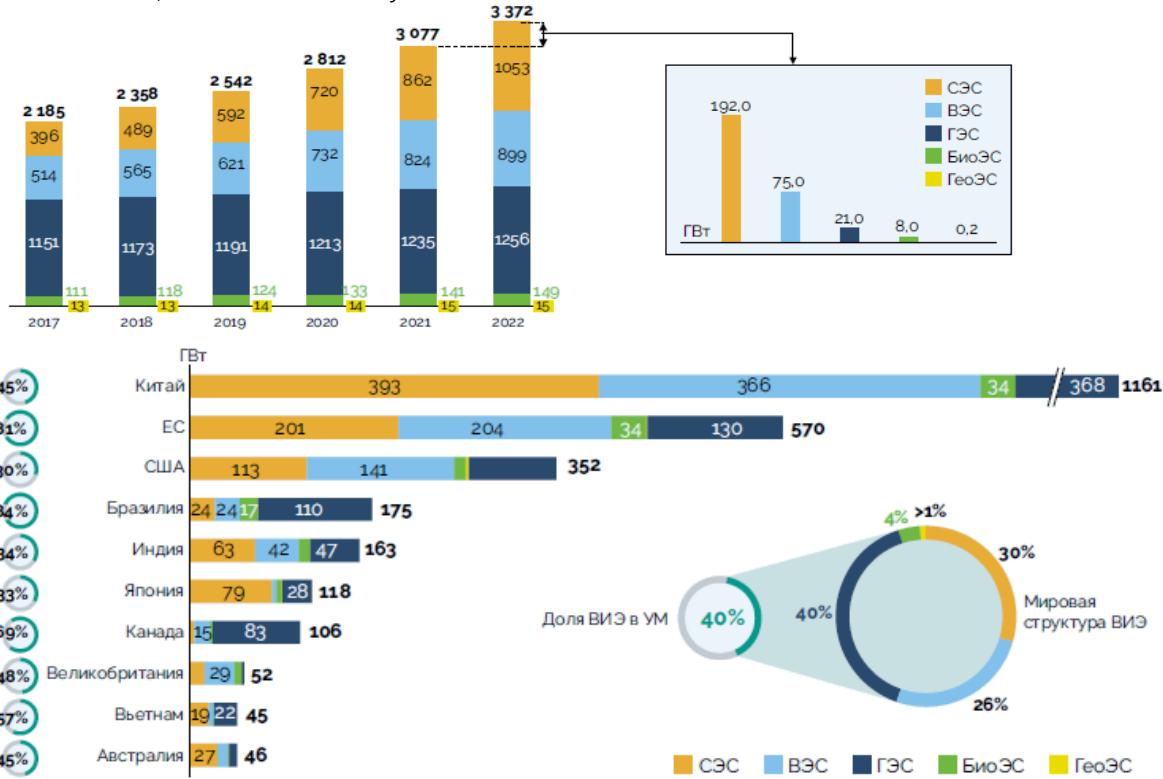
к.т.н., доцент ОЭЭ ИШЭ, НИЛ «Моделирование ЭЭС»

Организация: Томский политехнический университет

19.10.2023

Введение

Установленная мощность ВИЭ-генерации в мире и структура ввода новой мощности в 2022 году, ГВт*



*Источник АРБЭ по данным IRENA, **Источник АРБЭ



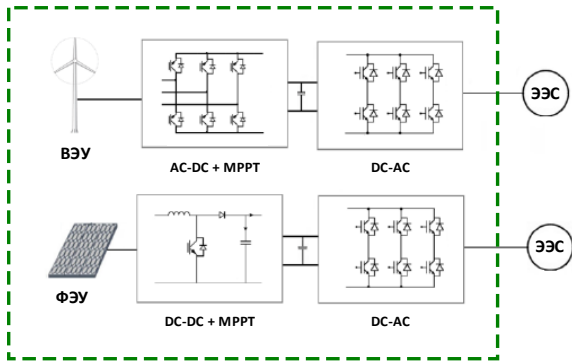
Установленная мощность объектов ВИЭ-генерации в странах-лидерах (по итогам 2022 года)*

Введение

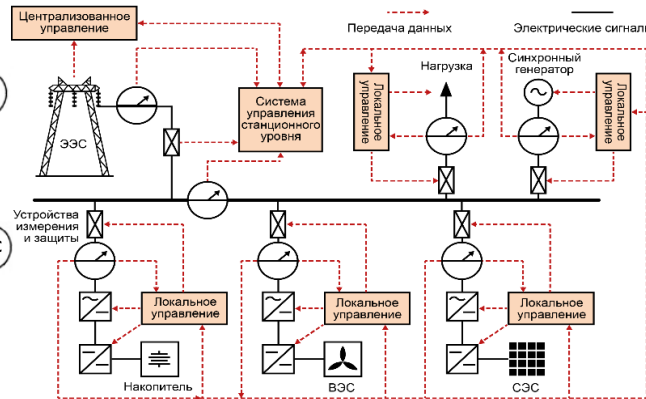
Статистика по ВИЭ на базе ветроэнергетических и фотоэлектрических установок в России*

ВЭС [ГВт]	
2021 г.	2022 г.
2,04	2,3
СЭС на базе ФЭ [ГВт]	
2021 г.	2022 г.
1,96	2,12

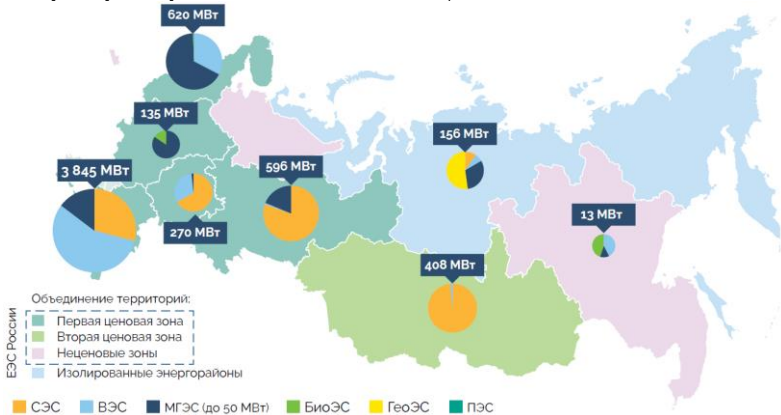
Генерирующие установки с силовым преобразователем



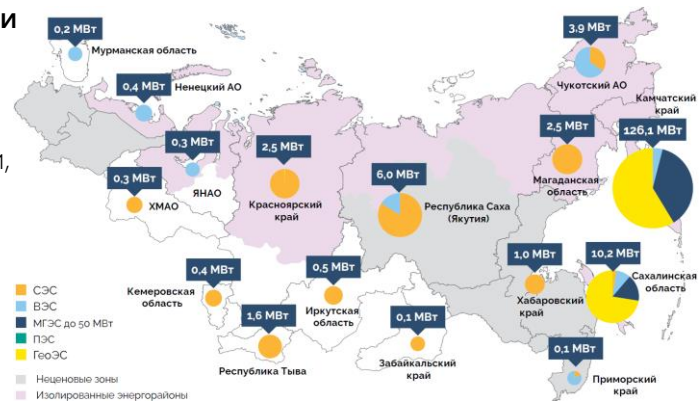
Обобщенная структура автономных ЭЭС



Карта распределения ВИЭ-генерации, МВт**



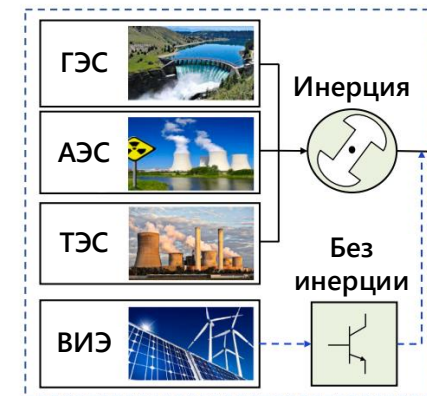
Карта распределения совокупной мощности введенных объектов ВИЭ-генерации по изолированным энергосистемам России, МВт**



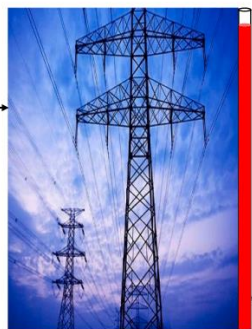
*По данным СО ЭЭС, **Источник АРВЭ

Трансформация ЭЭС

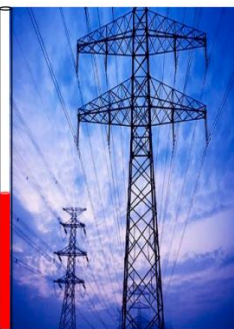
Традиционные ЭЭС



Энергосистема



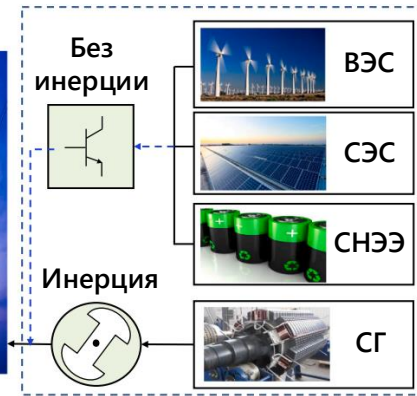
Энергосистема



Инерция

Внедрение большой доли установок с сетевыми инверторами (СИ)

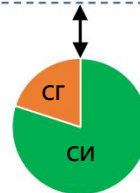
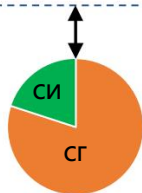
Гибридные ЭЭС



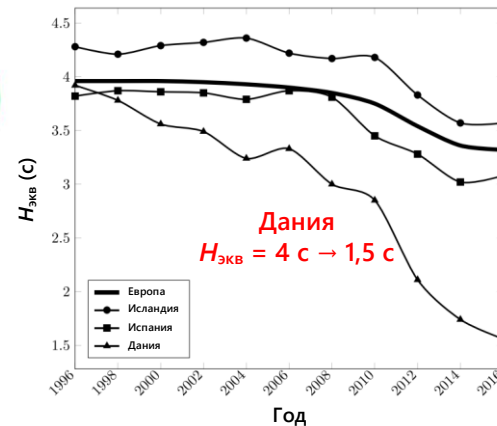
Постоянная инерция

$$T_J = 2H$$

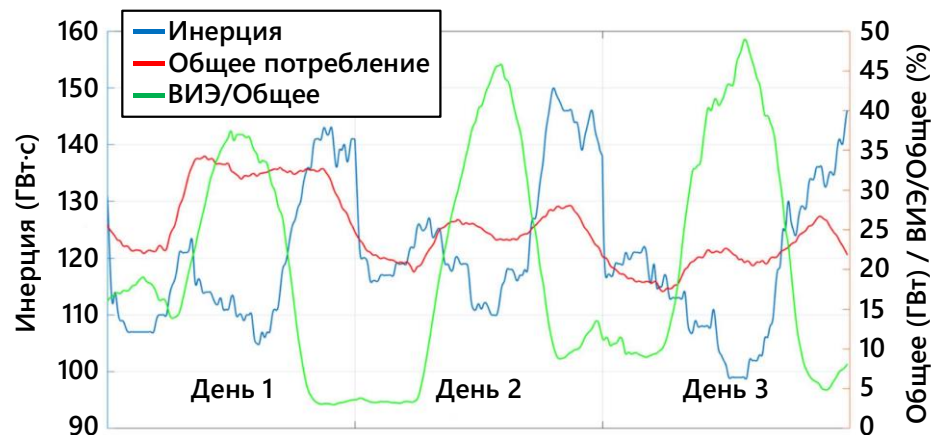
Состав генерирующих установок



Изменение эквивалентной постоянной инерции энергосистемы в разных странах Европы с 1996 по 2016 гг.



Трансформация ЭЭС



Пример оценки скорости изменения частоты (df/dt) в энергосистеме Италии при изменении доли генерации ВИЭ в течение суток с использованием данных, полученных от SCADA

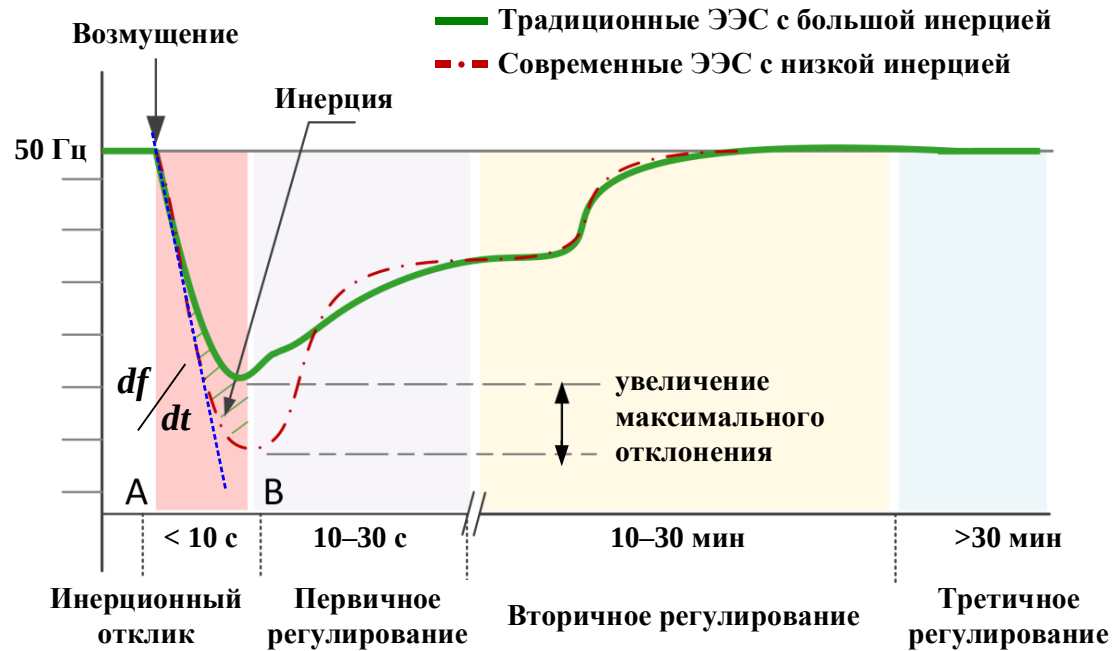
Способ предложен группой европейских системных операторов ENTSO-E

Изменение инерции в энергосистеме Германии (декабрь 2012)

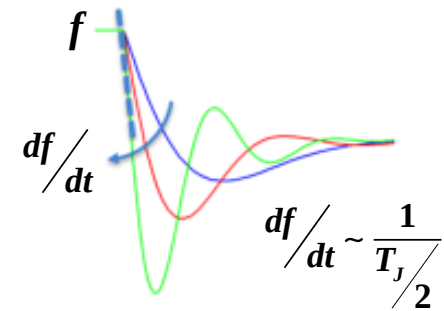


Последствия

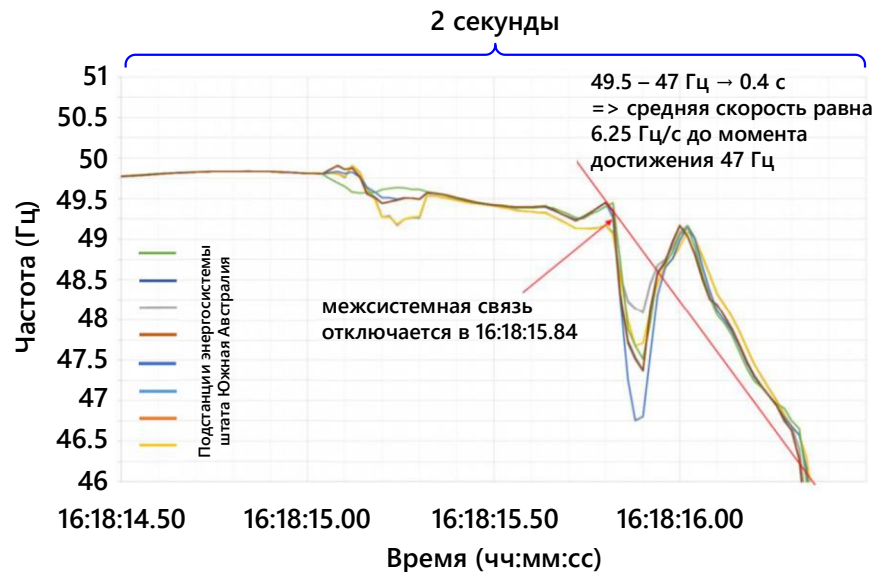
В современных энергосистемах за счет внедрения всё большего количества объектов ВИЭ-генерации остро встает вопрос регулирования частоты, поскольку для данных установок в целом несвойственно наличие инерционного отклика и значительного резерва по активной мощности.



Увеличение % несинхронной генерации приводит к увеличению скорости изменения частоты:

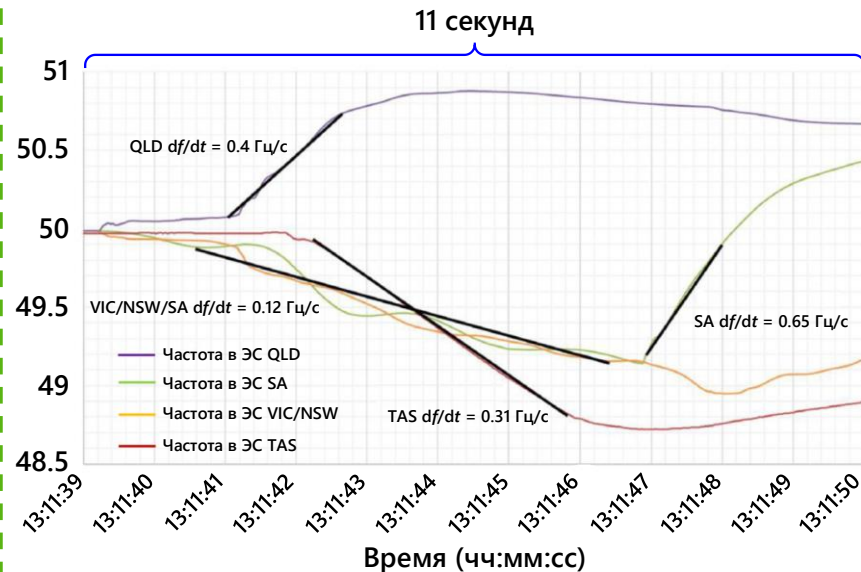


Мировой опыт



Авария в энергосистеме Австралии 28.09.2016

Причина – потеря синхронизма ЭС штата Южная Австралия с остальной частью энергосистемы Австралии из-за многочисленных аварийных отключений по причине плохих погодных условий (торнадо)



Авария в энергосистеме Австралии 25.08.2018

Причина – удар молнии в двухцепную межсистемную связь 330 кВ

Трансформация ЭЭС

Параметром, характеризующим **плотность** ЭЭС, является **отношение короткого замыкания (ОКЗ)***:

$$ОКЗ = \frac{S_{\min}}{S_{ВИЭ}} \approx \frac{S_{\min}}{P_{ВИЭ}} \approx \frac{R_{сети}}{X_{сети}},$$

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

ОКЗ > 3 – сильная сеть;

ОКЗ < 3 – слабая сеть.

Причины изменения ОКЗ:

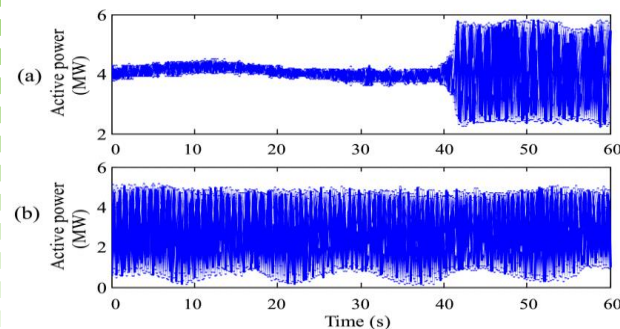
- отключение линий электропередачи по различным причинам;
- изменение состава и мощности нагрузки;
- изменение состава и мощности генерирующих установок;
- возможное непостоянство выработки электроэнергии за счёт объектов ВИЭ.

Как показывает мировой опыт, традиционная система управления СИ к такому не приспособлена.

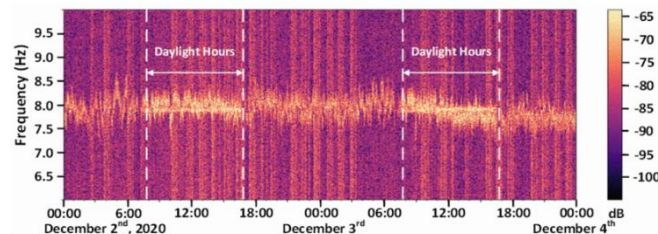
*IEEE Std 1204-1997. IEEE Guide for Planning DC Links Terminating at AC Locations Having Low Short-Circuit Capacities

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

Мировой опыт



Осциллограммы колебаний активной мощности ВЭУ в энергосистеме Китая

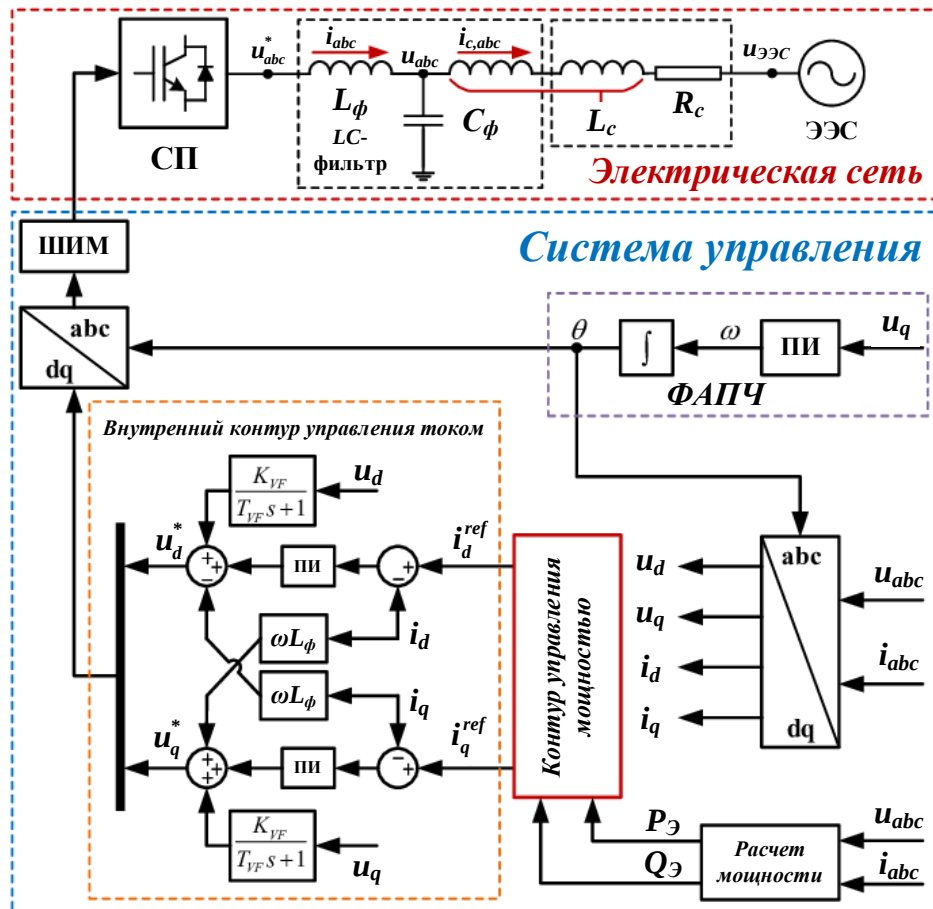


Спектрограмма при колебаниях 8 Гц в энергосистеме США с СЭС

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.

В качестве основных факторов выделяют **настройки быстросействующих контуров САУ** и **изменение ОКЗ сети.**

Проблематика



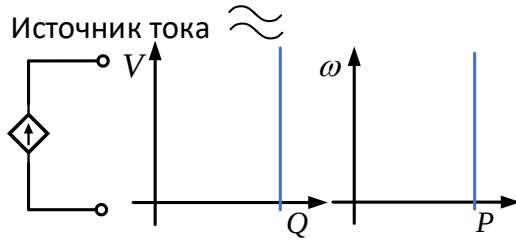
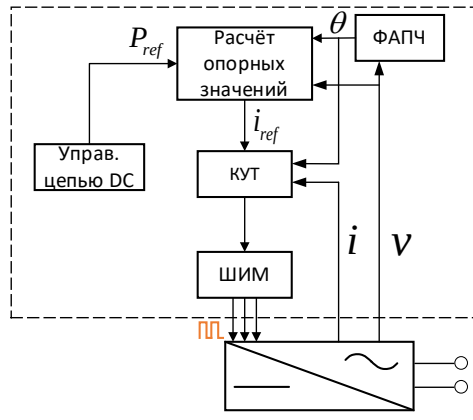
Классическая система управления
сетевым инвертором

Блок фазовой автоподстройки
частоты (ФАПЧ)

Применение подобной системы управления
подразумевает, что **сетевой инвертор**
является «ведомым» сетью.

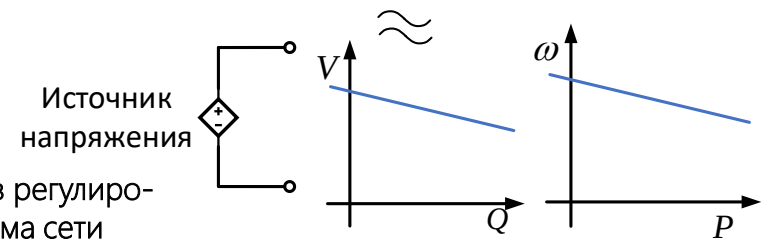
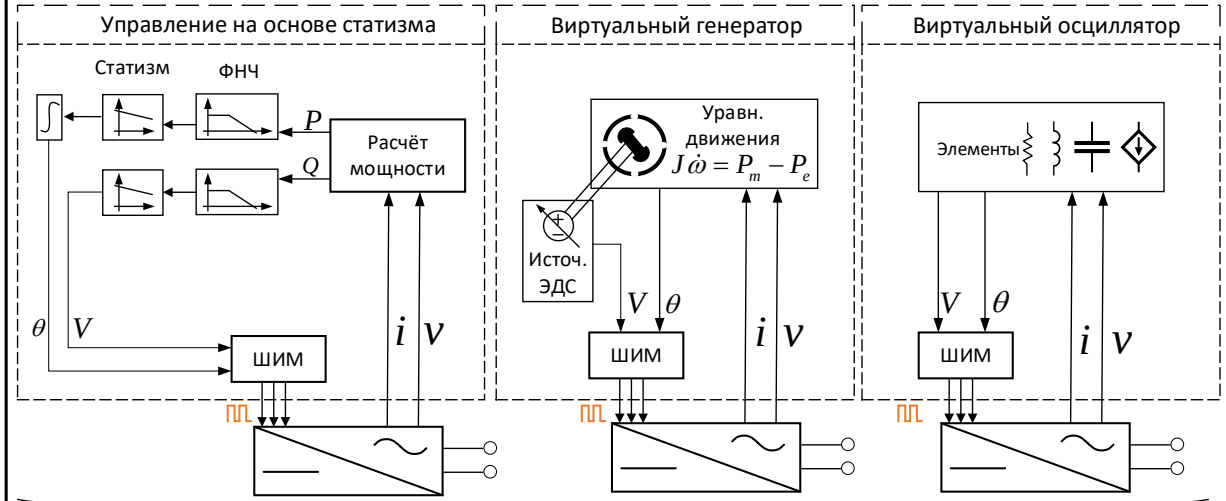
Смена парадигмы управления СИ с «ведомого» на «ведущий»

Ведомый



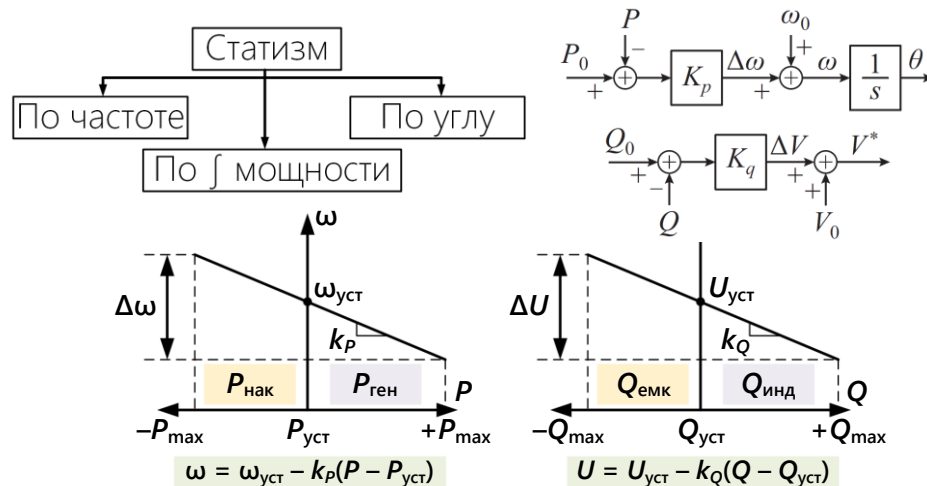
Не участвует в регулировании режима сети

Ведущий



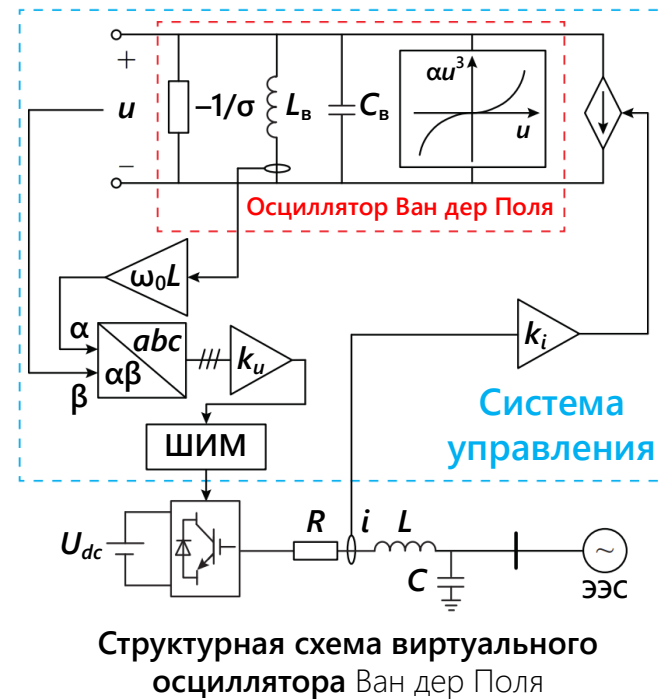
Участвует в регулировании режима сети

Управление на основе статизма и виртуального осциллятора



Основные недостатки:

- необходимость поиска компромисса между распределением мощности среди генерирующих объектов и эффективностью регулирования;
- неудовлетворительный инерционный отклик;
- не подходит для работы с нелинейной нагрузкой;
- снижение областей устойчивости при увеличении коэффициентов статизма;
- низкое качество электроэнергии;
- снижение качества регулирования в распределительных сетях из-за появления зависимостей $P-U$ и $Q-f$.



Структурная схема виртуального осциллятора Ван дер Поля

Основные недостатки:

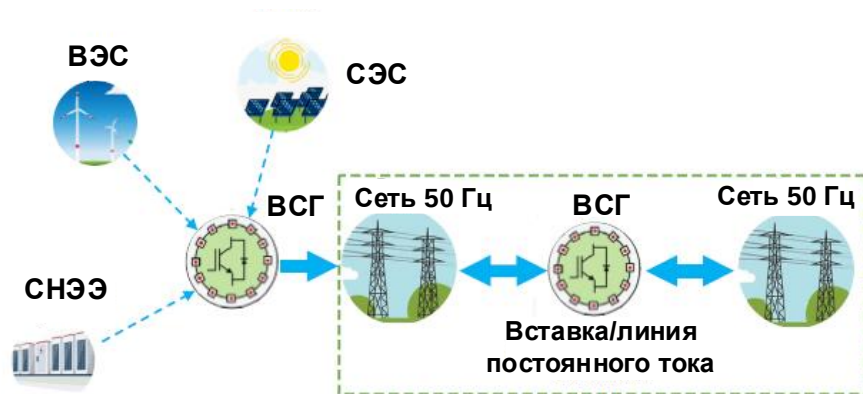
- сложность настройки;
- возникновение паразитных шумов;
- сложность контроля выдаваемой мощности.

Виртуальный синхронный генератор (ВСГ)

Предлагаемая технология управления сетевыми инверторами основана на особом алгоритме управления, который получил название «**виртуальный синхронный генератор**» (ВСГ), и позволяет имитировать статические и динамические характеристики традиционных синхронных генераторов.

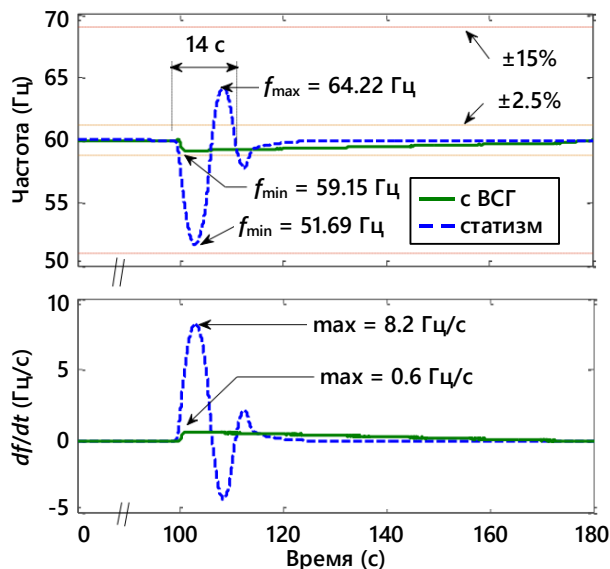
В результате за счет непосредственно самих объектов ВИЭ и СНЭЭ **становится возможным реализовать все функции**, которые обеспечивали традиционные синхронные генераторы для надежной работы энергосистем (инерционный, регуляторный отклик и др.) и даже улучшить их.

Применение концепции виртуального синхронного генератора подразумевает, что преобразователь является **ведущим**, по аналогии с традиционной синхронной генерацией.

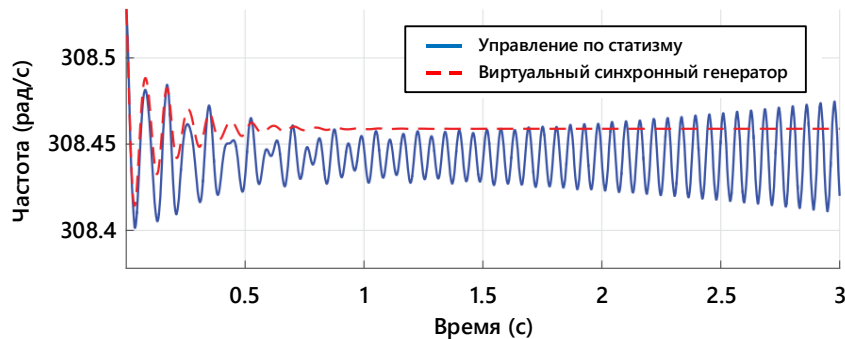


Сравнение ВСГ и управления по статизму

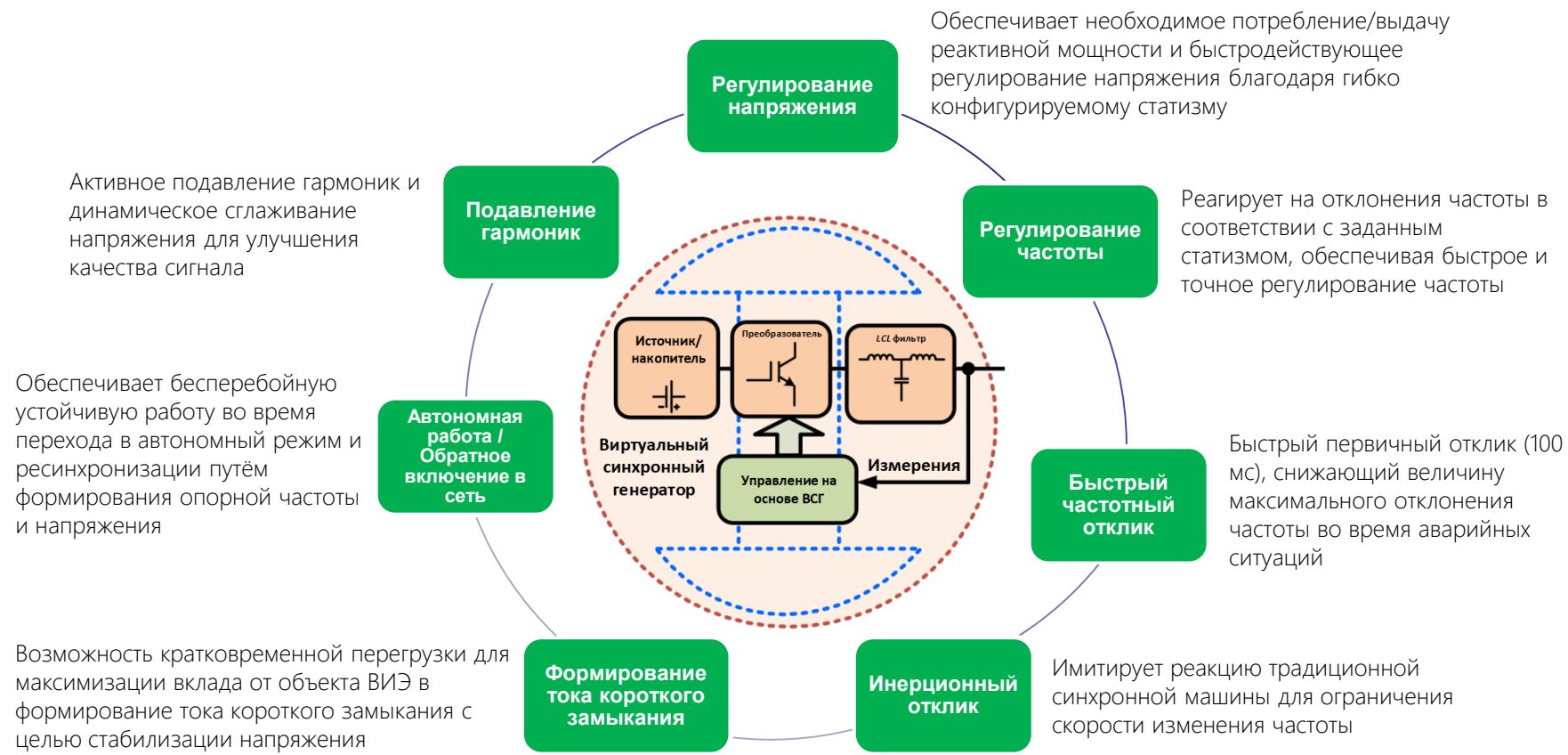
При рассмотрении изолированных ЭЭС с помощью **внедрения алгоритмов управления на основе ВСГ** для гибридных комплексов «ДГУ+ВИЭ+СНЭЭ» становится возможным значительное **улучшение характера изменения частоты** при возмущениях, т.е. уменьшить как скорость изменения частоты, так и ее максимальное отклонение, благодаря которому улучшаются условия работы ДГУ и, как следствие, **увеличивается ресурс работы данных установок**.



В случае **работы сетевого инвертора в условиях слабой сети** применение **управления по статизму может приводить к нарушению устойчивости** установки и возникновению колебаний с увеличивающейся амплитудой. Аналогичный характер нарушения устойчивости имеет место при задании больших значений для коэффициентов усиления пропорциональных каналов регуляторов. В то же время **за счет алгоритмов управления на основе ВСГ становится возможным устойчивое и надежное функционирование установок** в различных условиях работы электрической сети.



Возможности виртуального синхронного генератора

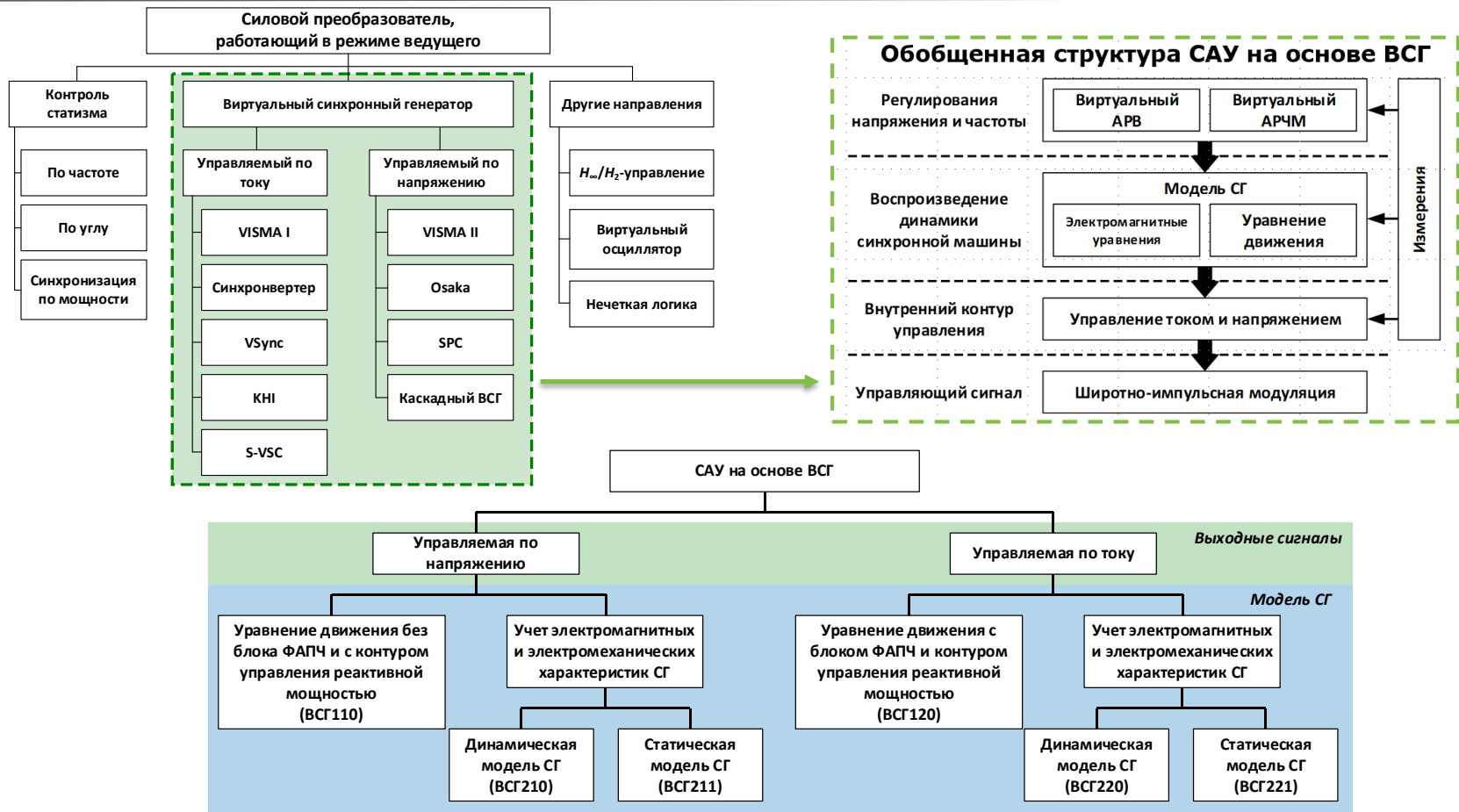


Сравнительный анализ ВСГ

Решение Возможность	Предлагаемая технология на базе ВСГ	Синхронный генератор	Традиционные ВИЭ	Статический тиристорный компенсатор	Синхронный компенсатор	СТАТКОМ
Регулирование напряжения	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Регулирование частоты	✓	✓	✓	✗	✗	✗
Быстрый частотный отклик	✓	✗	✓/✗	✗	✗	✗
Инерционный отклик	✓	✓	✓/✗	✗	✓	✗
Формирование тока короткого замыкания	✓	✓	✗	✗	✓	✓
Изолированная работа / Обратное включение в сеть	✓	✓	✓/✗	✗	✗	✗
Подавление гармоник	✓	✗	✗	✓/✗	✗	✓

✓/✗ – означает возможность реализации за счет введения дополнительных алгоритмов

Концепция виртуальный синхронный генератор

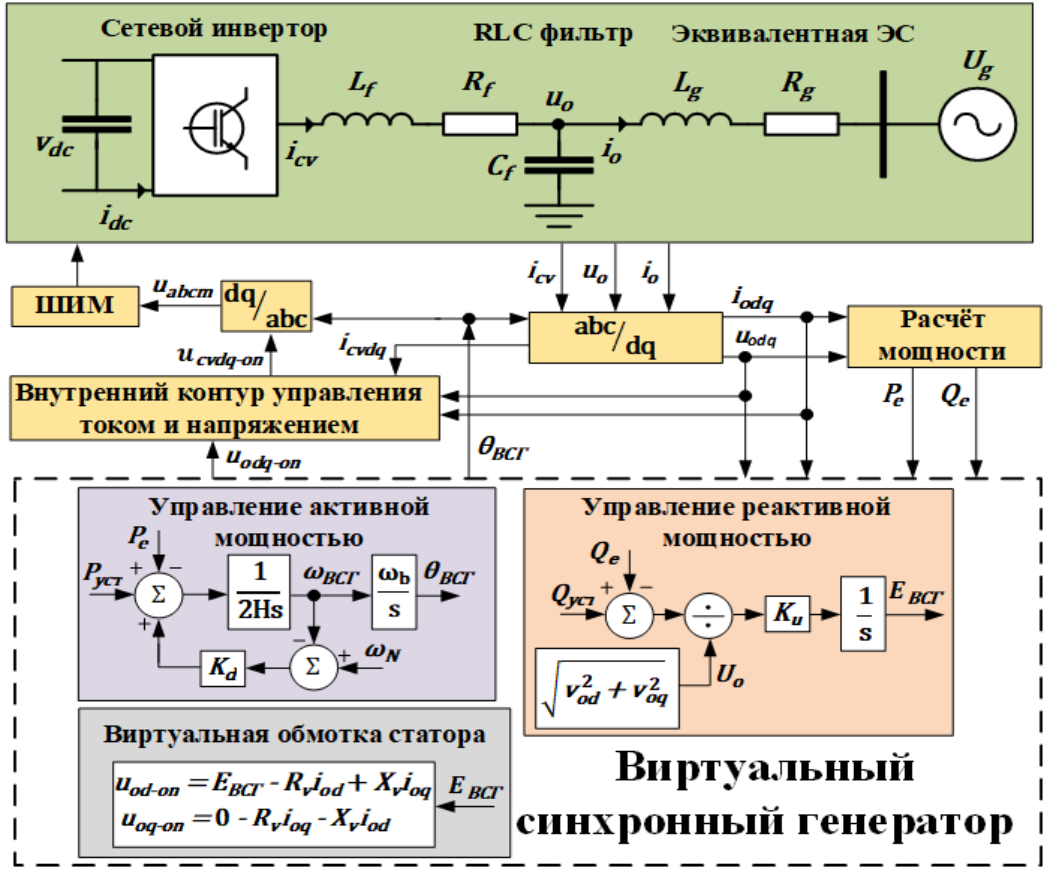


Анализ полученных результатов исследований

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.**

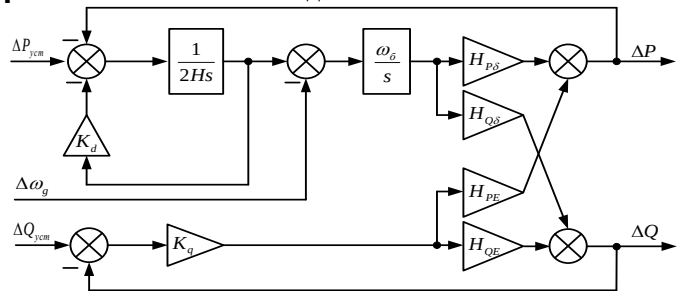
Проверяемое свойство	ВСГ110	ВСГ120	ВСГ210	ВСГ211	ВСГ220	ВСГ221
Функционирование в слабых сетях	+	+	+	+	+	+
Качество электрической энергии	+	+	+	+	+	+
Характер первичного отклика	+/-	-	+	+	+	+
Взаимозависимость активной и реактивной мощностей	+	+/-	+/-	+/-	+	+
Инерционный отклик и первичное быстродействующее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

Классический алгоритм ВСГ управляемого по напряжению (ВСГ-Н)



Принципиальная проблема ВСГ-Н

Структура линейризованной упрощенной модели ВСГ-Н



$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{dP/d\delta} & H_{dP/dE} \\ H_{dQ/d\delta} & H_{dQ/dE} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta E \end{bmatrix} \quad \text{Выходная мощность ВСГ-Н}$$

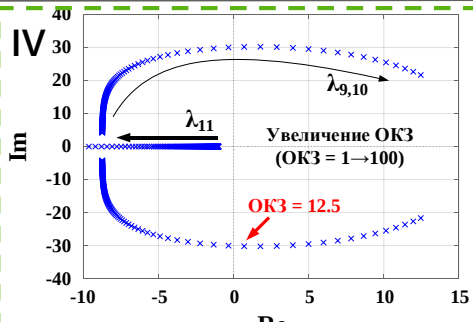
$$H_{dP/d\delta} = \frac{E_0 \cdot R \cdot U \cdot \sin \delta_0 - 2 \cdot E_0 \cdot R_v \cdot U \cdot \sin \delta_0 + E_0 \cdot U \cdot X \cdot \cos \delta_0}{R^2 + X^2}$$

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

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

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

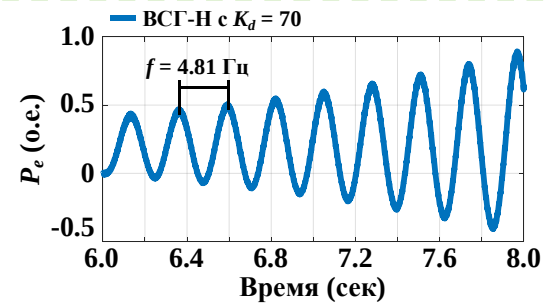
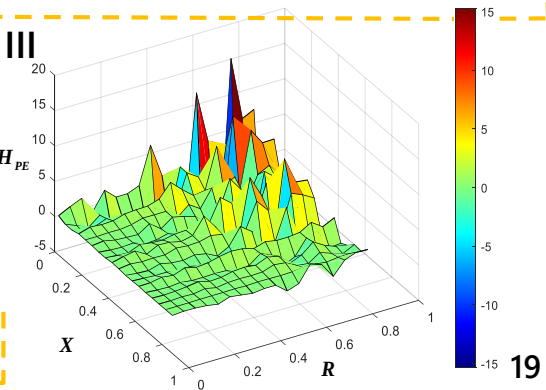
В итоге необходим поиск компромисса между обеспечением устойчивого функционирования и эффективной скоростью работы при изменении ОКЗ ($\approx R/X$) сети.



Корневой годограф
линейризованной детальной модели
ВСГ-Н в пространстве состояний

$$\begin{cases} \frac{d\Delta\omega_{BCr}}{dt} = \frac{1}{2H} [P_{уст,BCr} - (P_0 - H_{dP/d\delta}\Delta\delta) - H_{dP/dE}\Delta E + K_d\Delta\omega_{BCr}] ; \\ \frac{d\Delta\delta_{BCr}}{dt} = \Delta\omega_{BCr}\omega_6. \end{cases}$$

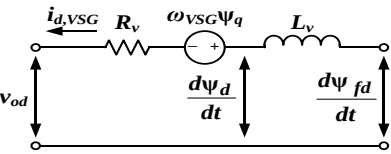
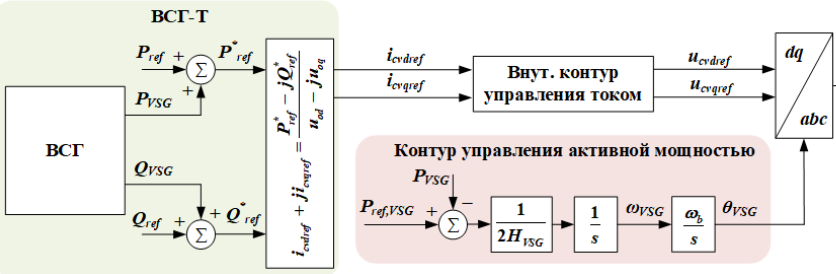
Величина взаимовлияния мощностей при изменении отношения сопротивлений R/X сети



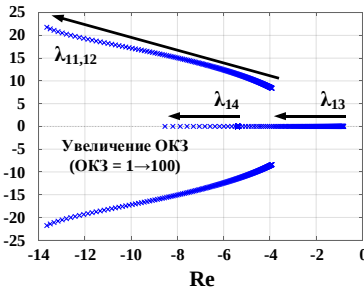
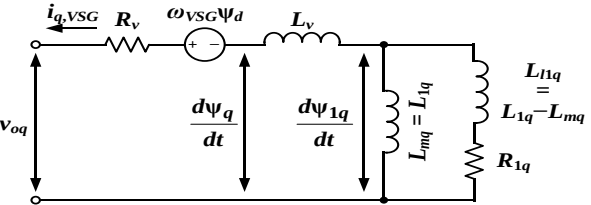
Результаты моделирования для
модели ВСГ-Н при ОКЗ=12,5

Разработанная альтернативная структура ВСГ-Т

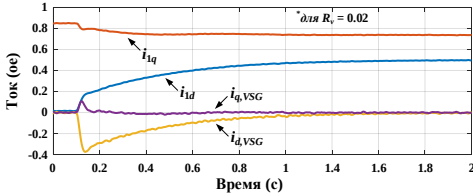
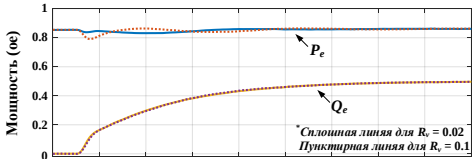
Разработанный алгоритм управления СИ на основе ВСГ,
управляемого током (ВСГ-Т)



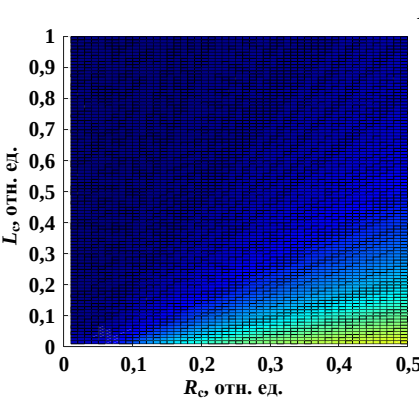
$$K_{P-Q} = \frac{\Delta P_{\max}^2}{\Delta P_{\max}^2 + \Delta Q_{\max}^2 + 1}$$



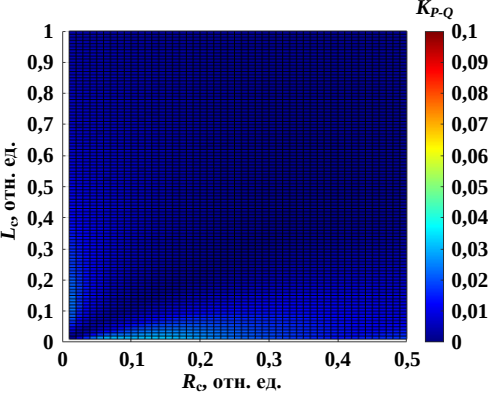
Корневой годограф,
демонстрирующий устойчивое
функционирование при любом
ОКЗ



При изменении уставки по
Q отсутствует влияние на P



ВСГ-Н



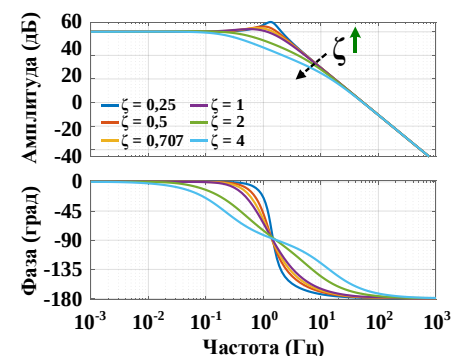
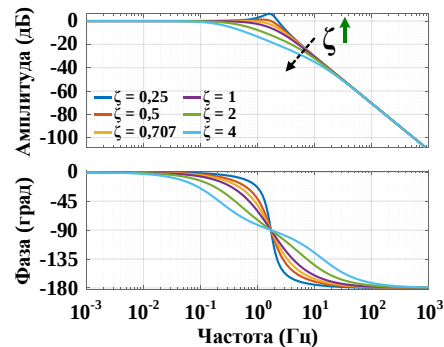
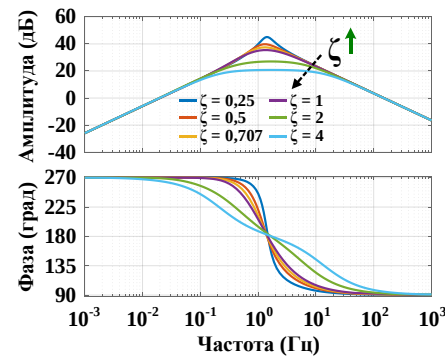
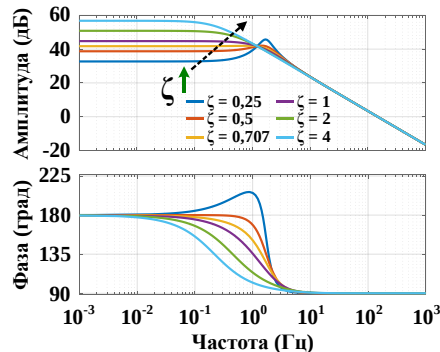
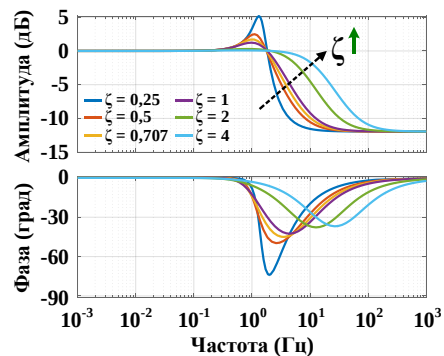
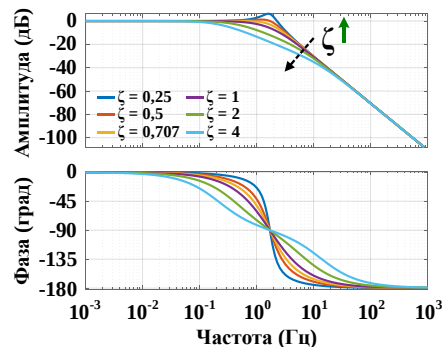
ВСГ-Т

Сравнение динамических характеристик ВСГ-Н и ВСГ-Т

Усиление демпфирующих свойств ВСГ-Н для решения проблемы взаимовлияния мощностей при изменении ОКЗ сети приводит к возникновению трёх противоречий:

- уменьшение скорости отклика по АМ
- изменение статизма по частоте
- несоответствие целей управления по Р и f

ВСГ-Н

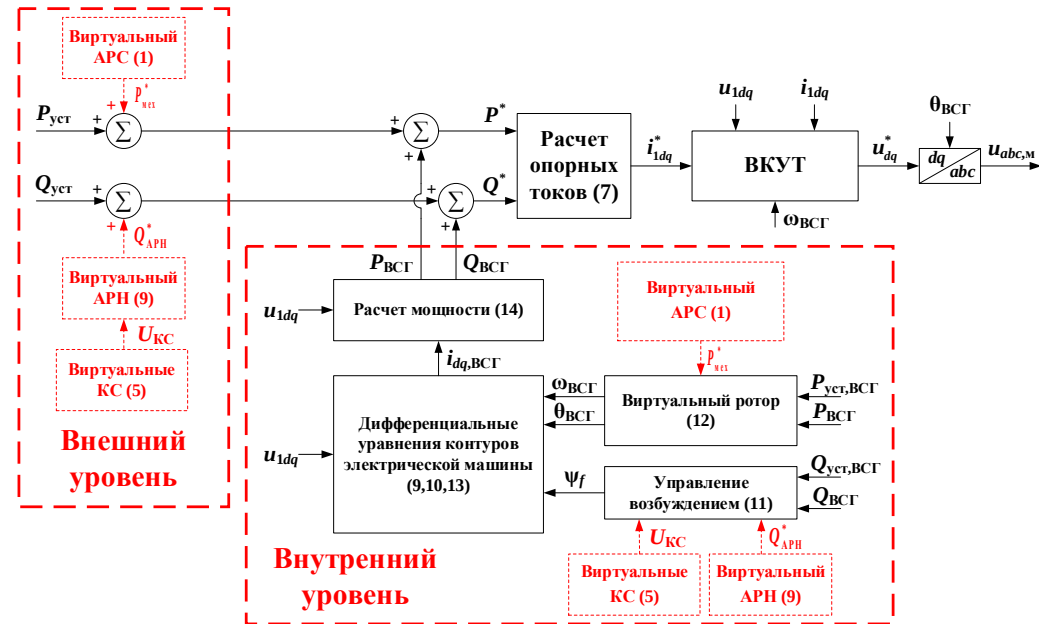


ЛАФЧХ зависимости выходной от входной активной мощности ($W(p) = \Delta P_{\text{вых}} / \Delta P_{\text{вх}}$):

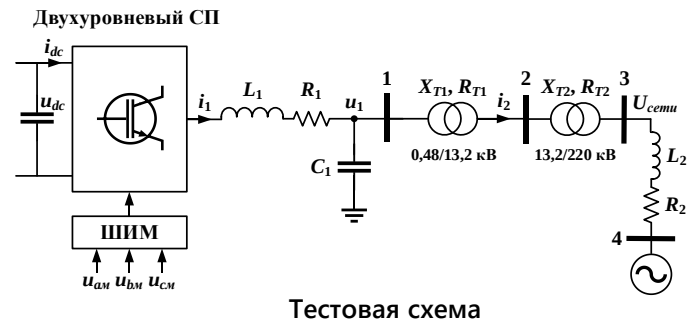
ЛАФЧХ зависимости выходной активной мощности от частоты сети ($W(p) = \Delta P_{\text{вых}} / \Delta \omega_{\text{сет}} \mu$)

ЛАФЧХ зависимости частоты ВСГ от частоты сети ($W(p) = \Delta \omega_{\text{ВСГ}} / \Delta \omega_{\text{сет}} \mu$)

Анализ конфигурации ВСГ-Т



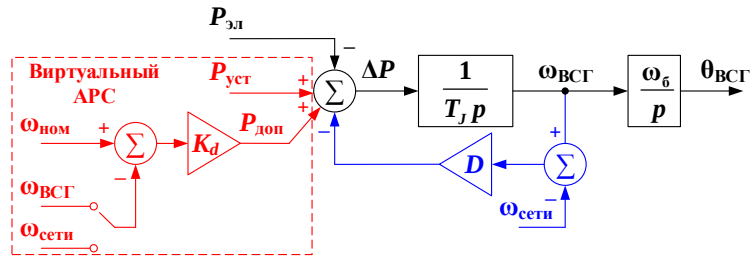
Различные варианты конфигурации ВСГ-Т



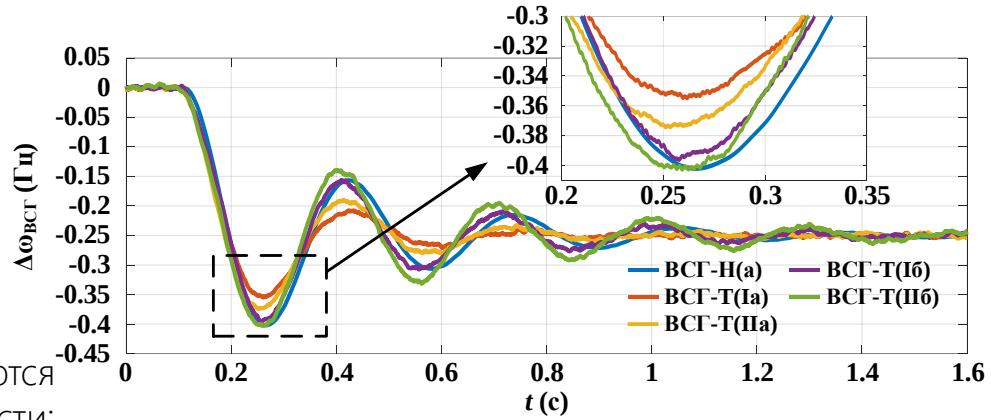
Тестовая схема

Изменение конфигурации ВСГ-Т

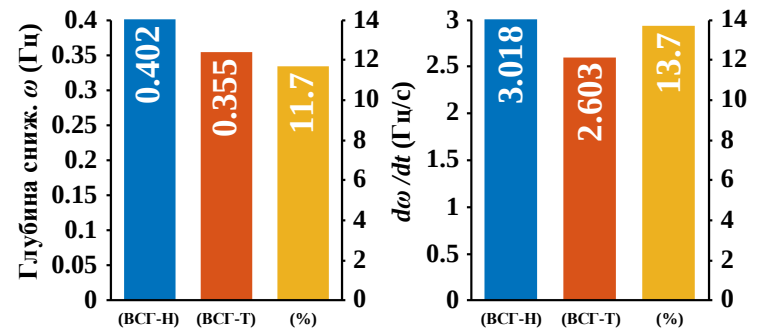
Тест 1. Изменение частоты сети



Для исследуемых структур ВСГ рассматриваются два варианта реализации регулятора скорости: первый вариант – основанный на сравнении $\omega_{ном}$ с $\omega_{ВСГ}$ (обозначается при исследованиях индексом «а»), второй – на сравнении с $\omega_{сети}$, получаемой с помощью ФАПЧ (индекс «б»). В структуре ВСГ-Т также учитывается установка регулятора скорости на внутреннем и внешнем уровне (индексы «I» и «II», соответственно). Наилучшая реакция при объединении инерционного и регуляторного отклика для ВСГ-Т.



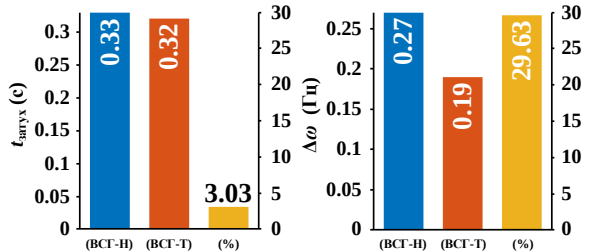
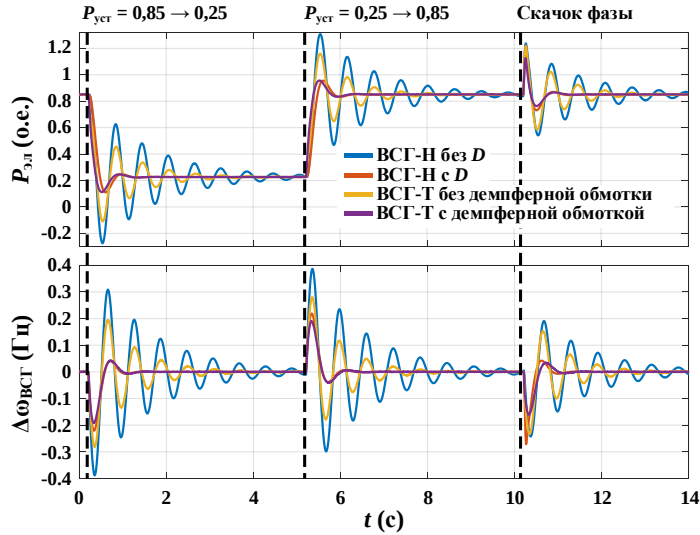
Сравнение характера изменения частоты ВСГ для разных структур САУ при скачкообразном снижении частоты сети



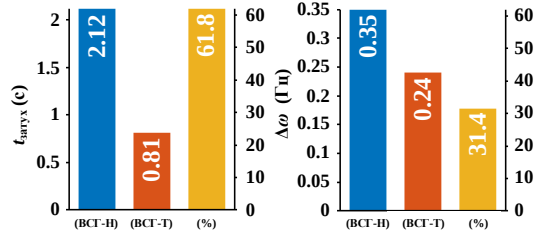
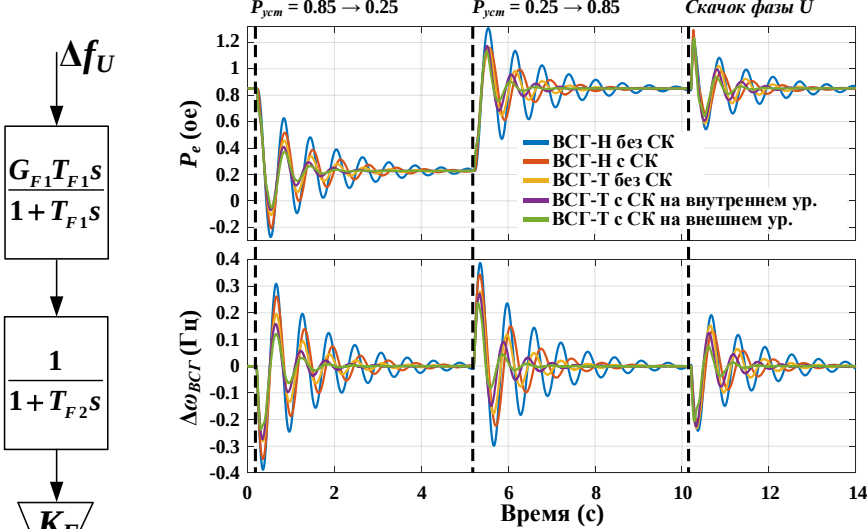
Изменение конфигурации ВСТ-Т

Тест 2. Демпфирование колебаний:

1) С помощью контура по активной мощности

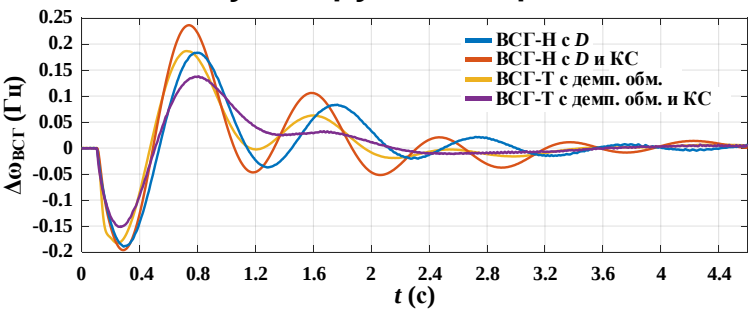


2) С помощью контура по реактивной мощности (демп. коэф. и демп. обмотка исключаются и добавляются каналы стабилизации)

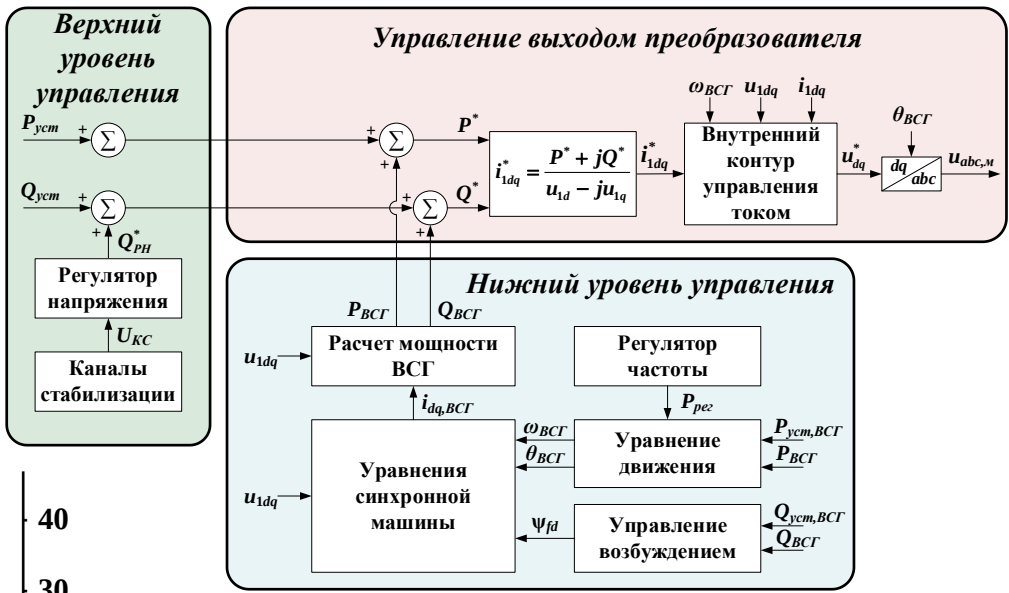
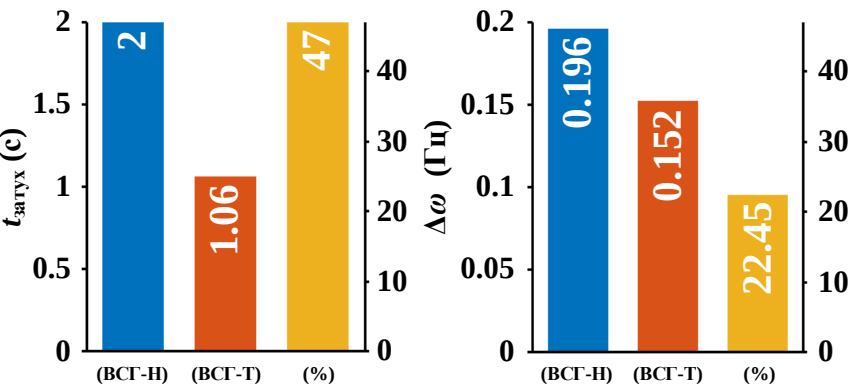


Изменение конфигурации ВСГ-Т

Тест 3. Результирующее сравнение

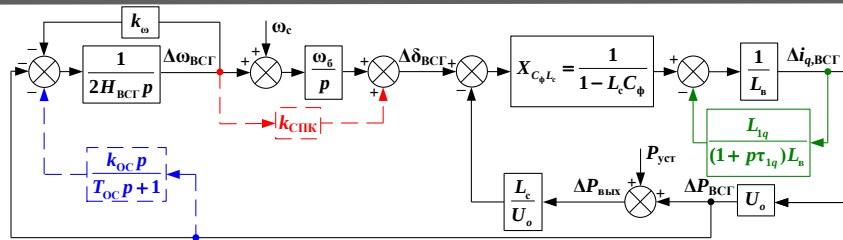


Сравнение динамического отклика разных моделей ВСГ при изменении X/R сети

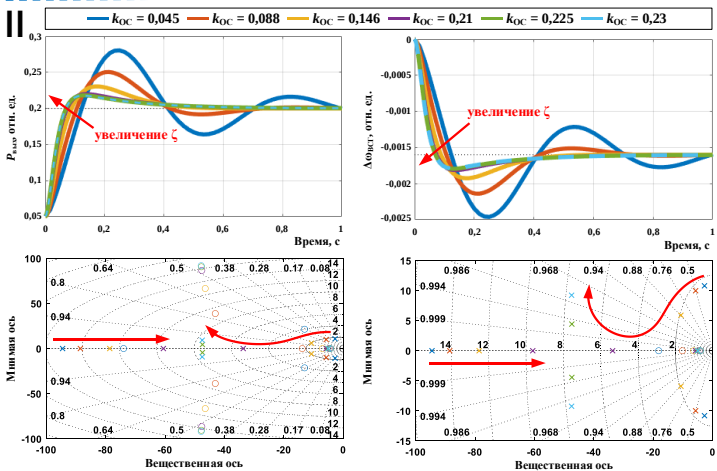


Итоговая структура ВСГ-Т

Улучшение демпфирующих свойств ВСГ-Т

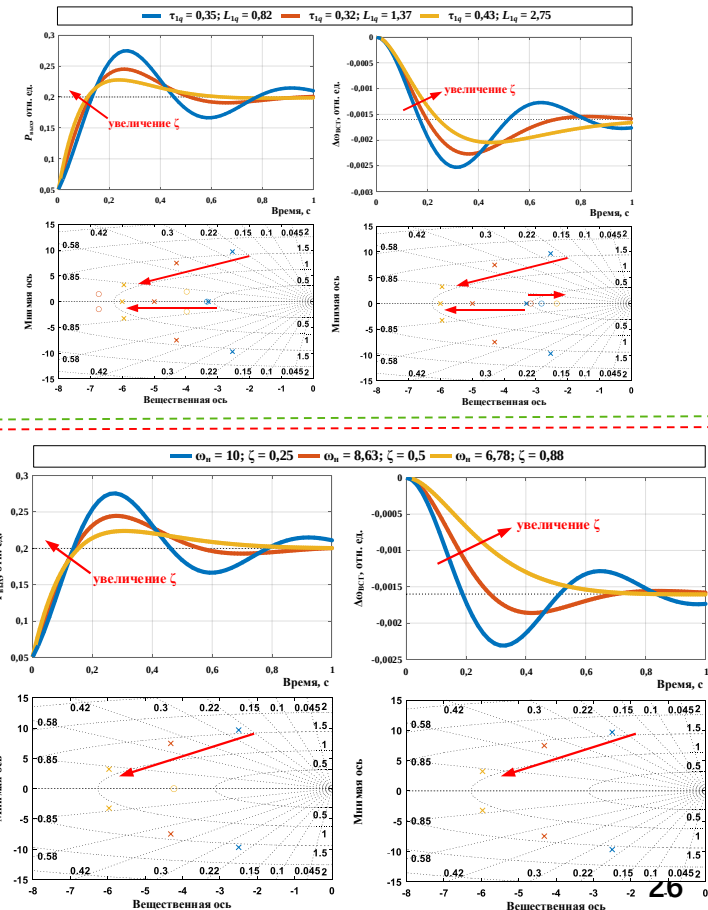


$$G_{P/P}(p) = \frac{\Delta P_{\text{ВЫХ}}}{\Delta P_{\text{УСТ}}} = \frac{2H_{\text{ВСТ}}L_B\tau_{1q}p^3 + 2H_{\text{ВСТ}}(L_B + L_{1q})p^2 + U_0\omega_6 X_{C_\phi L_C}\tau_{1q}p + U_0\omega_6 X_{C_\phi L_C}}{2H_{\text{ВСТ}}\tau_{1q}(L_B + X_{C_\phi L_C}L_C)p^3 + 2H_{\text{ВСТ}}(L_B + L_{1q} + X_{C_\phi L_C}L_C)p^2 + U_0\omega_6 X_{C_\phi L_C}\tau_{1q}p + U_0\omega_6 X_{C_\phi L_C}}$$



$$\omega_n = \sqrt{\frac{U_0\omega_6 X_{C_\phi L_C}}{2H_{\text{ВСТ}}(L_B + L_C X_{C_\phi L_C})}}$$

$$\zeta = \frac{L_B k_\omega + L_C X_{C_\phi L_C} k_\omega + k_{\text{СПК}} U_0 X_{C_\phi L_C}}{2\sqrt{2H_{\text{ВСТ}} U_0 \omega_6 X_{C_\phi L_C}} \cdot (L_B + L_C X_{C_\phi L_C})}$$

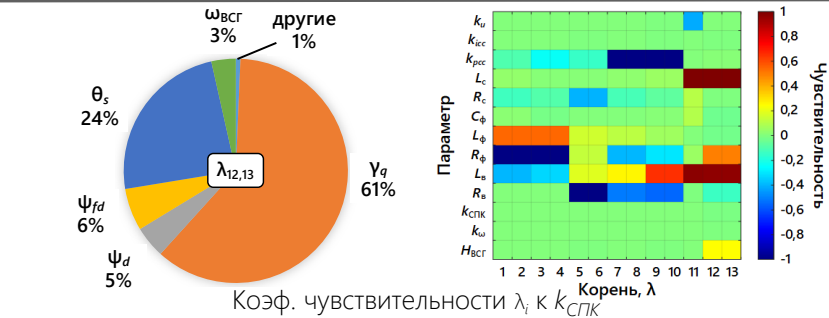


Анализ коэффициентов участия и чувствительности

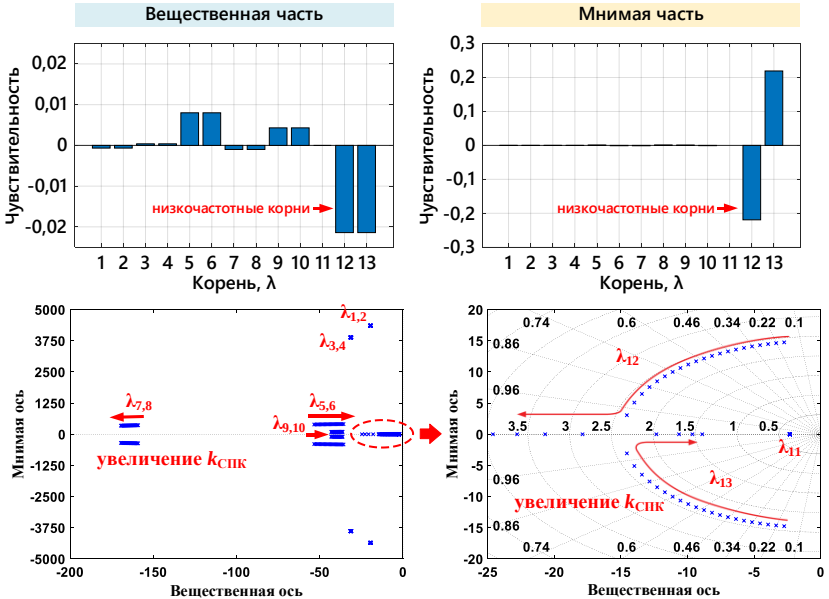
$\Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(\mathbf{x}_0) \Delta \mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x}_0) \Delta \mathbf{u}$ Модель в пространстве состояний

$$\Delta \mathbf{x} = \left[\Delta u_{od} \ \Delta u_{oq} \ \Delta i_{cvd} \ \Delta i_{cvq} \ \Delta \xi_d \ \Delta \xi_q \ \Delta i_{od} \ \Delta i_{oq} \ \Delta \psi_d \ \Delta \psi_q \ \Delta \psi_{fd} \ \Delta \theta_s \ \Delta \omega_{BCF} \right]^T$$

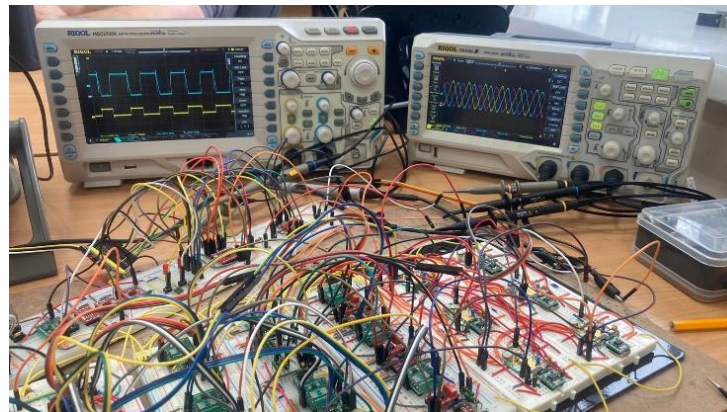
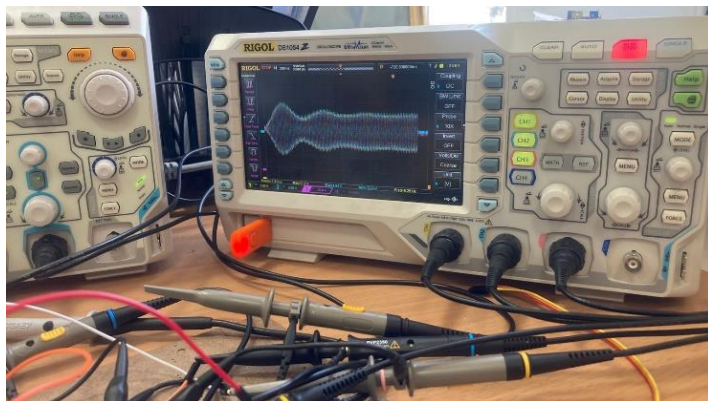
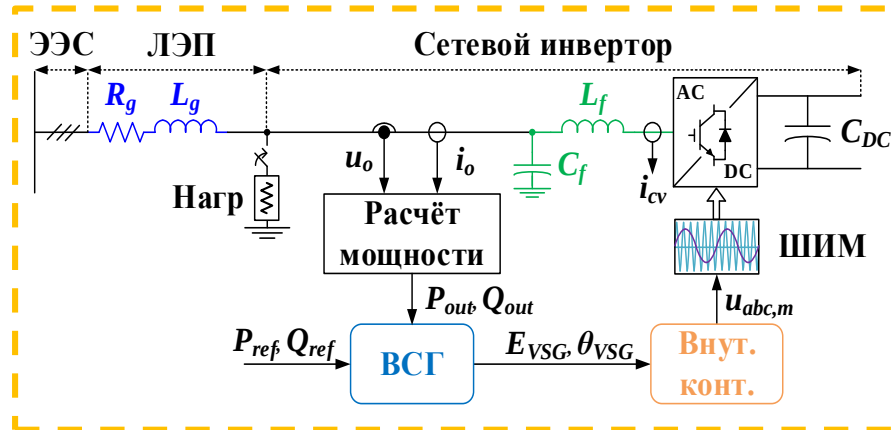
$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial k_{СПК}} = \frac{v_i^T \frac{\partial A(k_{СПК})}{\partial k_{СПК}} u_i}{v_i^T u_i} \quad \text{коэф. чувствит-ти} \quad p_{ki} = \frac{\partial \lambda_i}{\partial a_{kk}} \quad \text{коэф. участия}$$



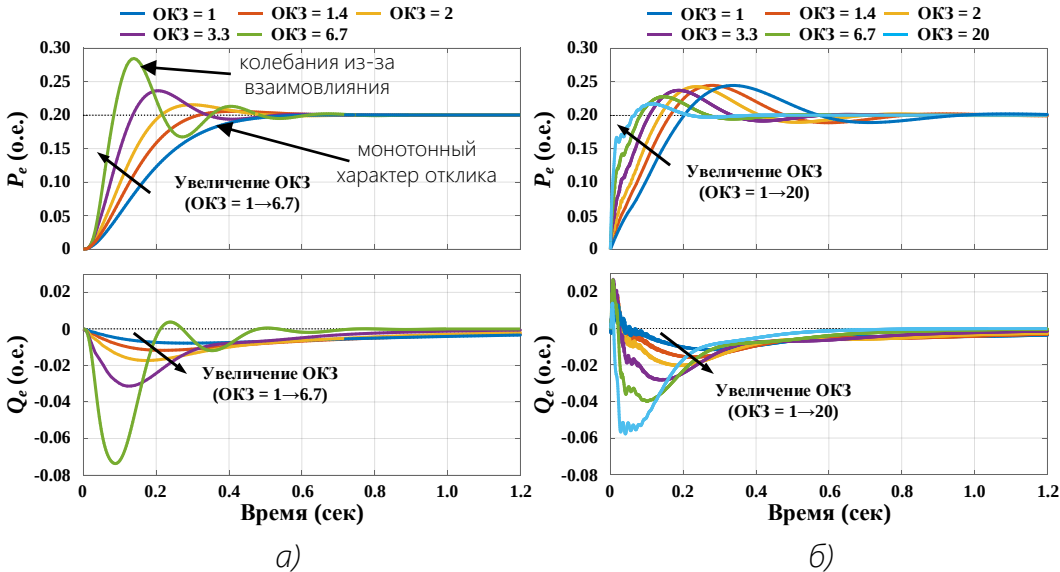
Мод а	Собственные числа	ω_n , Гц	Коэффицие нт демпфиров ания ζ	Коэффициент чувствительности и λ к $k_{СПК}$	Основные связанные переменные состояния
λ_1	$-19,5+j4354,9$	693	0,00448	$-0,013-j0,003$	$\Delta u_{odr}, \Delta u_{oqr}, \Delta i_{cvd}, \Delta i_{cvqr}, \Delta \gamma_{qr}, \Delta i_{odr}, \Delta i_{oqr}, \Delta \psi_q$
λ_2	$-19,5-j4354,9$			$-0,013+j0,003$	
λ_3	$-31,3+j3884,2$	618	0,00805	$0,012-j0,003$	$\Delta u_{odr}, \Delta u_{oqr}, \Delta i_{cvd}, \Delta \gamma_{qr}, \Delta i_{od}$
λ_4	$-31,3-j3884,2$			$0,012+j0,003$	
λ_5	$-43,5+j402,1$	64,4	0,107	$0,328+j0,394$	$\Delta \gamma_{qr}, \Delta i_{odr}, \Delta \psi_{dr}, \Delta \omega_{BCF}$
λ_6	$-43,5-j402,1$			$0,328-j0,394$	
λ_7	$-165+j353,1$	62	0,423	$-0,165-j0,363$	$\Delta \gamma_{dr}, \Delta \gamma_{qr}, \Delta \psi_{dr}, \Delta \psi_{qr}, \Delta \psi_{fd}, \Delta i_{oqr}, \Delta \omega_{BCF}$
λ_8	$-165-j353,1$			$-0,165+j0,363$	
λ_9	$-39,2+j96,3$	16,5	0,377	$0,159+j0,073$	$\Delta \gamma_{dr}, \Delta \gamma_{qr}, \Delta \psi_{fd}$
λ_{10}	$-39,2-j96,3$			$0,159-j0,073$	
λ_{11}	$-2,3$	0	1	0	$\Delta \psi_{fd}$
λ_{12}	$-10,6+j10,6$	2,38	0,707	$-0,321-j1,037$	$\Delta \gamma_{qr}, \Delta \psi_{dr}, \Delta \psi_{fd}, \Delta \theta_s, \Delta \omega_{BCF}$
λ_{13}	$-10,6-j10,6$			$-0,321+j1,037$	



Гибридное моделирование



Сравнение отклика по активной мощности

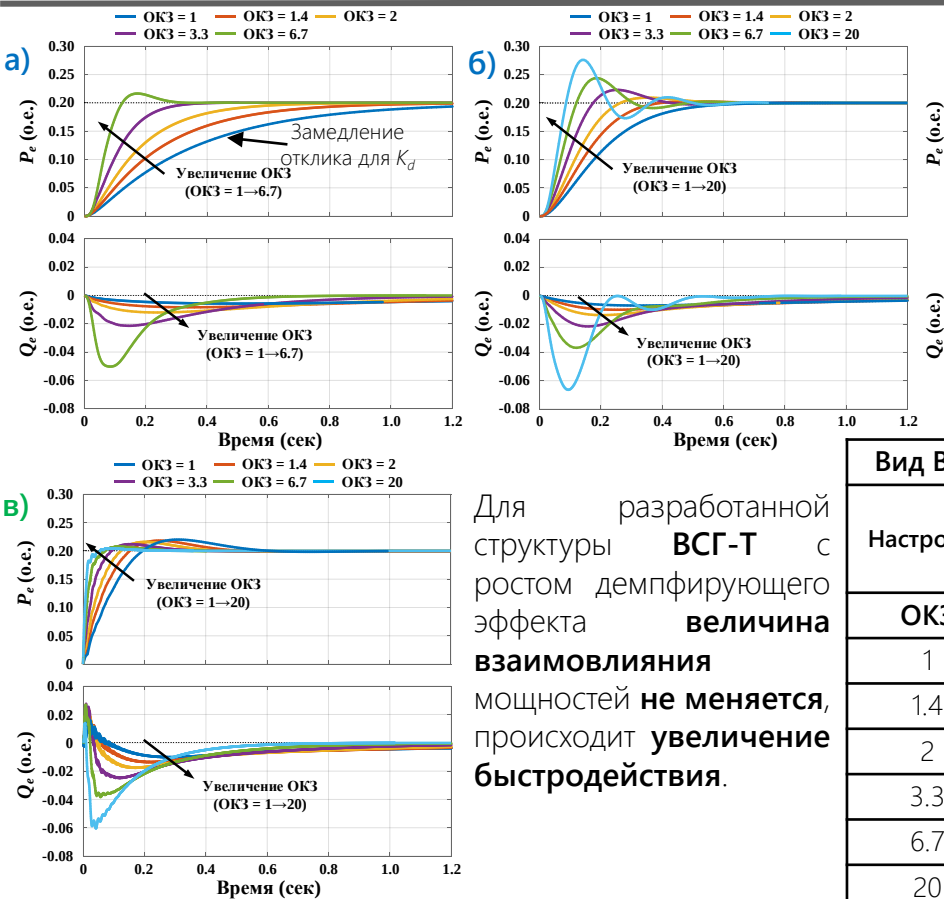


Осциллограммы активной и реактивной мощностей (а) ВСГ-Н и (б) ВСГ-Т при ступенчатом увеличении $P_{ум}$ от 0 до 0,2 о.е. для разных значений ОКЗ

Вид ВСГ	ВСГ-Н		ВСГ-Т	
Настройка	Начальная		Начальная	
ОКЗ	t_r (с)	ζ	t_r (с)	ζ
1	0.297	0.901	0.161	0.423
1.4	0.198	0.753	0.133	0.419
2	0.141	0.635	0.112	0.426
3.3	0.089	0.483	0.087	0.449
6.7	0.048	0.284	0.065	0.490
20	Неустой.	Неустой.	0.043	0.529

При изменении ОКЗ с 1 до 6,7 время набора мощности t_r для ВСГ-Т изменяется только в 2,5 раза, а для ВСГ-Н происходит изменение в 6 раз.

Сравнение отклика по активной мощности после настройки

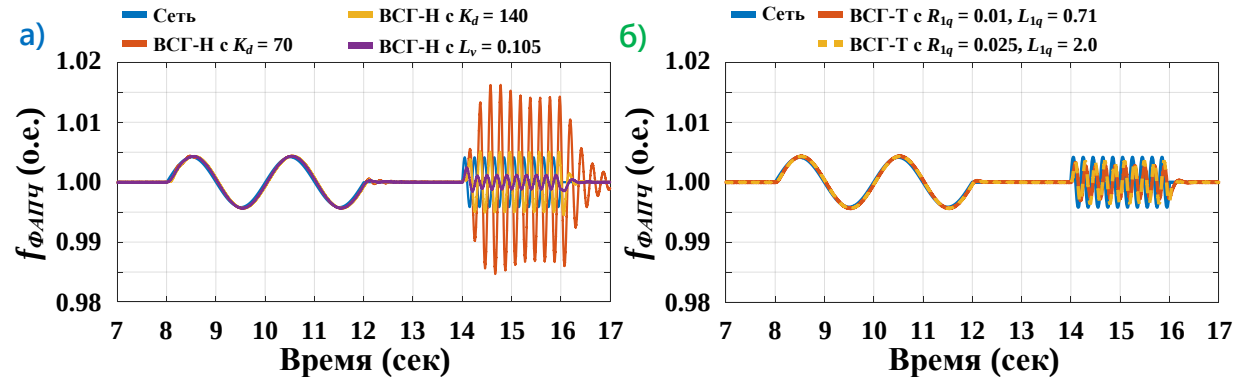


Осциллограммы модели ВСГ-Н при увеличении (а) K_d (б) L_v и (в) модели ВСГ-Т при изменении настроек демпферного контура при ступенчатом увеличении уставки по активной мощности для разных значений ОКЗ

Для разработанной структуры ВСГ-Т с ростом демпфирующего эффекта величина взаимовлияния мощностей не меняется, происходит увеличение быстродействия.

Вид ВСГ	ВСГ-Н		ВСГ-Н		ВСГ-Т	
Настройка	Увеличение $K_d = 140$		Увеличение $L_v = 0.105$		Изменение $R_{1q} = 0.025,$ $L_{1q} = 2.0$	
ОКЗ	t_r (с)	ζ	t_r (с)	ζ	t_r (с)	ζ
1	0.752	1.0	0.336	0.947	0.140	0.658
1.4	0.508	1.0	0.231	0.808	0.109	0.709
2	0.344	1.0	0.170	0.700	0.090	0.772
3.3	0.183	0.989	0.117	0.570	0.063	0.886
6.7	0.074	0.663	0.079	0.442	0.038	1.0
20	Неустой.	Неустой.	0.053	0.307	0.015	1.0

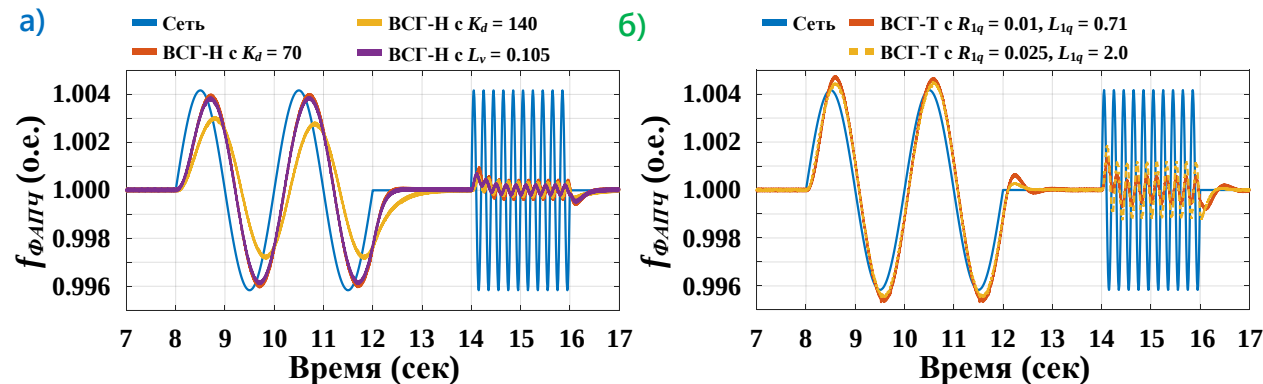
Сравнение инерционного и регуляторного отклика



ОКЗ=10: (а) ВSG-Н и (б) ВSG-Т

Сильная сеть (ОКЗ=10):

- увеличение L_{ν} искажает инерционный отклик;
- регуляторный отклик для ВSG-Н и ВSG-Т совпадает;
- ВSG-Т следует за частотой сети при любых качаниях и настройка не влияет.



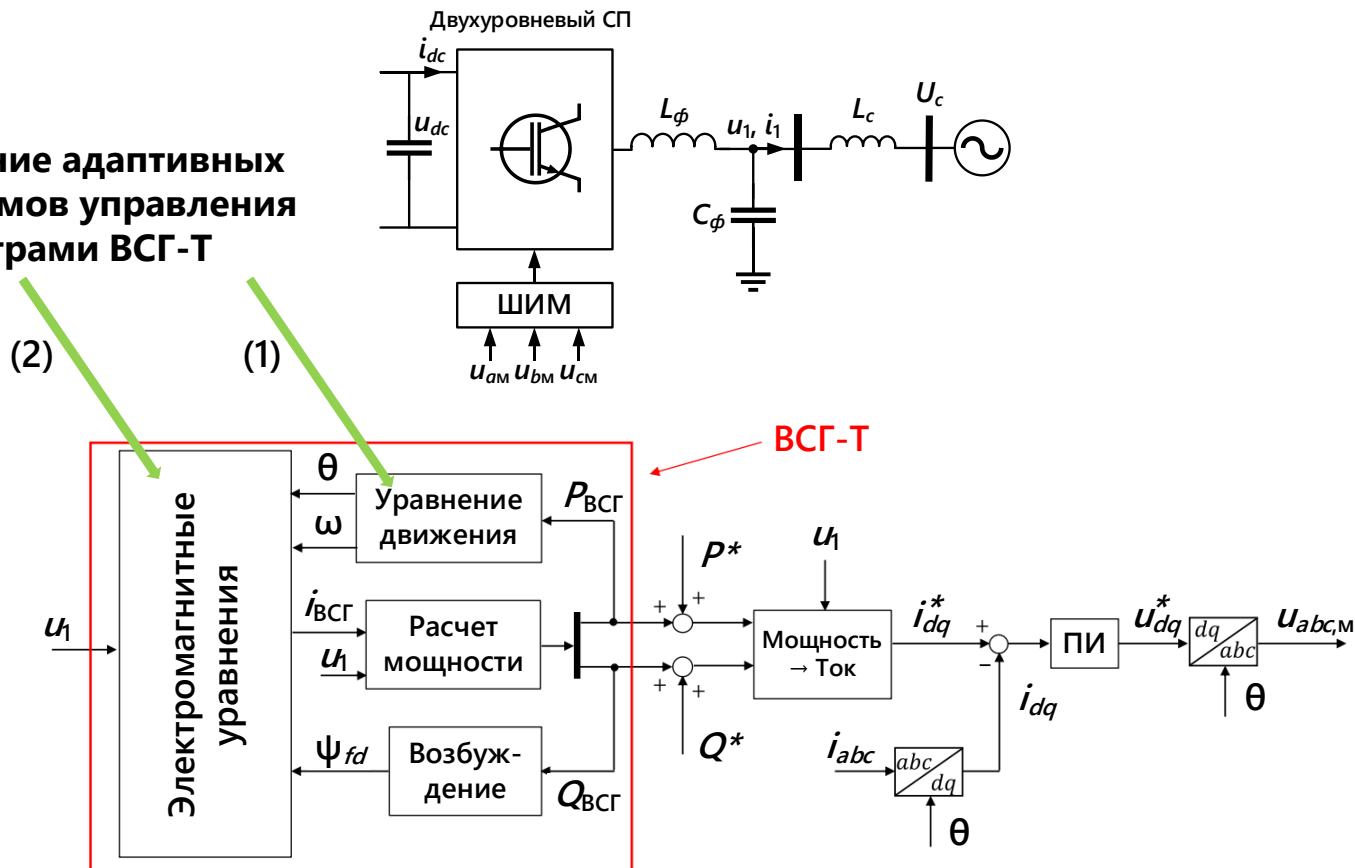
ОКЗ=1: (а) ВSG-Н и (б) ВSG-Т

Слабая сеть (ОКЗ=1):

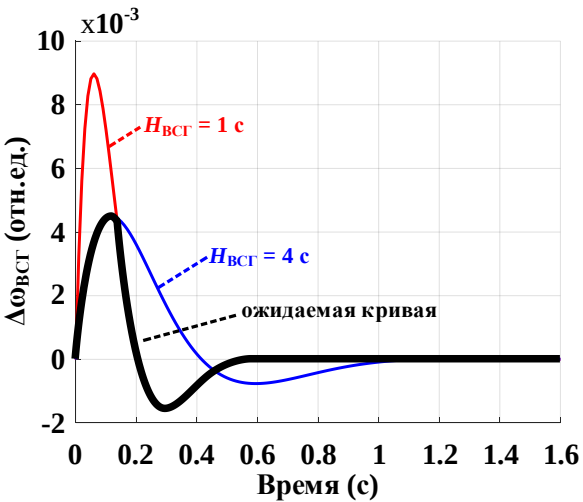
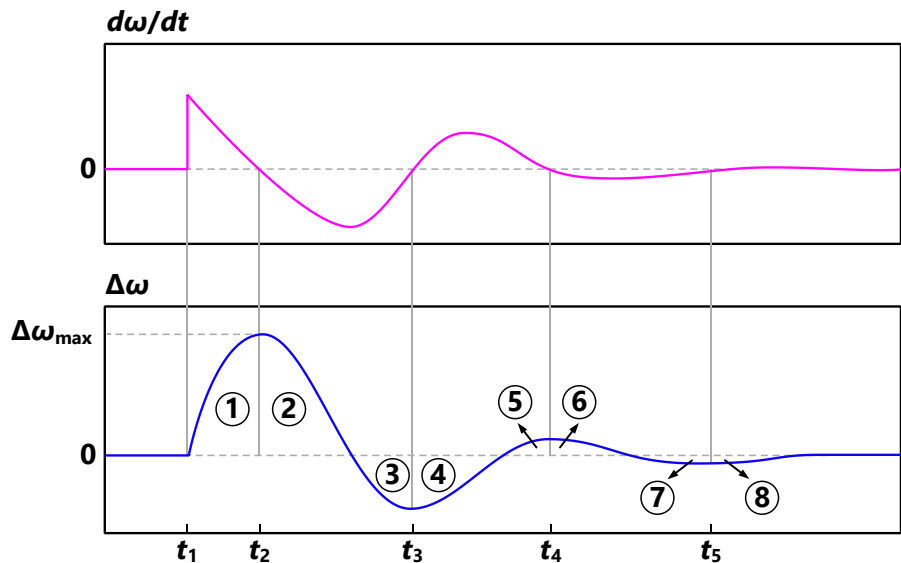
- увеличение K_d искажает регуляторный отклик;
- инерционный отклик неудовлетворительный при любой настройке ВSG-Н;
- усиление демпфирующего эффекта ВSG-Т приводит к улучшению инерционного отклика из-за увеличения быстродействия.

Предлагаемая модификация структуры ВСГ-Т

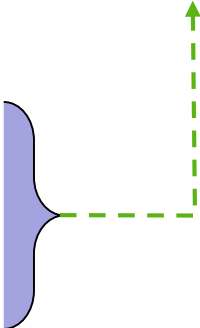
Внедрение адаптивных алгоритмов управления параметрами ВСГ-Т



Общий подход к адаптивному управлению

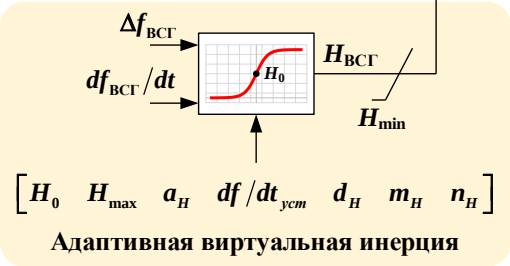
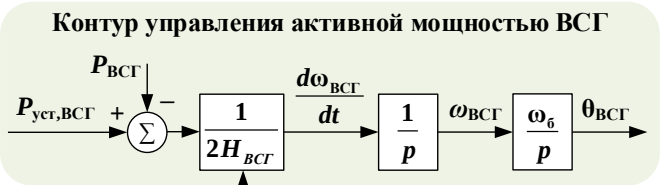


Интервал	$d\omega/dt$	$\Delta\omega$	$\Delta\omega \cdot d\omega/dt$	Характер $H_{J,VSG}$
1, 5	>0	>0	>0	Увеличить
2, 6	<0	>0	<0	Уменьшить
3, 7	<0	<0	>0	Увеличить
4, 8	>0	<0	<0	Уменьшить



Синтез алгоритма адаптивной инерции для ВСГ-Т

Этап 1 – Предлагаемый адаптивный алгоритм управления виртуальной инерцией на основе нелинейной сигмоидальной функции



$$H_{\text{ВСГ}} = \left(H_0 - \frac{H_0 \cdot k_{H1}}{2} \right) + \frac{H_0 \cdot k_{H1}}{1 + \exp \left[-k_{H2} \cdot \left[df_{\text{ВСГ}} / dt \cdot \left(\Delta f_{\text{ВСГ}} + k_{H3} \cdot k_{H4} \cdot \left| df_{\text{ВСГ}} / dt \right| \right) \right] \right]}$$

$$H_{\text{max}} = \frac{C_{\text{DC}} U_{\text{DC}}^2}{2 S_{\text{ном}}} \quad ; \quad H_{\text{min}} > \frac{\Delta P_{\text{возмущ, расчет}}}{|df/dt_{\text{max}}|}$$

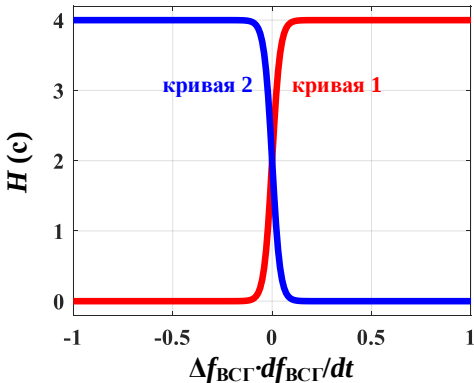


График изменения виртуальной инерции ВСГ

Синтез алгоритма адаптивной инерции для ВСГ-Т

Этап 1 – Предлагаемый адаптивный алгоритм управления виртуальной инерцией на основе нелинейной сигмоидальной функции

$$k_{H1} = \begin{cases} 2 \cdot \left(\frac{H_{\max}}{H_0} - 1 \right) & \text{если } a_H + b_H \cdot c_H \cdot \left(\frac{df_{\text{ВСТ}}}{dt} \right)^3 > 2 \cdot \left(\frac{H_{\max}}{H_0} - 1 \right) \\ a_H + b_H \cdot c_H \cdot \left(\frac{df_{\text{ВСТ}}}{dt} \right)^3 & \text{если } 2 \cdot \left(1 - \frac{H_{\max}}{H_0} \right) \leq a_H + b_H \cdot c_H \cdot \left(\frac{df_{\text{ВСТ}}}{dt} \right)^3 \leq 2 \cdot \left(\frac{H_{\max}}{H_0} - 1 \right) \\ 2 \cdot \left(1 - \frac{H_{\max}}{H_0} \right) & \text{если } a_H + b_H \cdot c_H \cdot \left(\frac{df_{\text{ВСТ}}}{dt} \right)^3 < 2 \cdot \left(1 - \frac{H_{\max}}{H_0} \right) \end{cases}$$

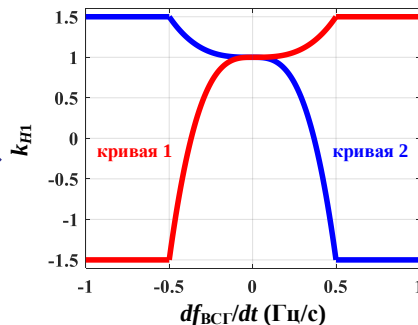


График изменения коэффициента k_{H1}

$$k_{H2} = d_H + \left[-m_H + \frac{2 \cdot m_H}{1 + \exp(-n_H \cdot |\Delta f_{\text{ВСТ}}|)} \right]$$

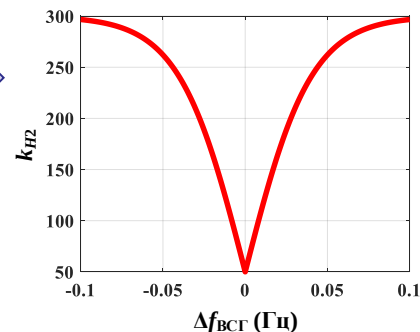


График изменения коэффициента k_{H2}

Синтез алгоритма адаптивной инерции для ВСГ-Т

Этап 1 – Предлагаемый адаптивный алгоритм управления виртуальной инерцией на основе нелинейной сигмоидальной функции

$$k_{H3} = \text{sign}(f_{\text{BCГ}} - f_0)$$

$$k_{H4} = \frac{df_{\text{BCГ}}/dt^2}{df_{\text{BCГ}}/dt^2 + \Delta f_{\text{BCГ}}^2 + 1}$$

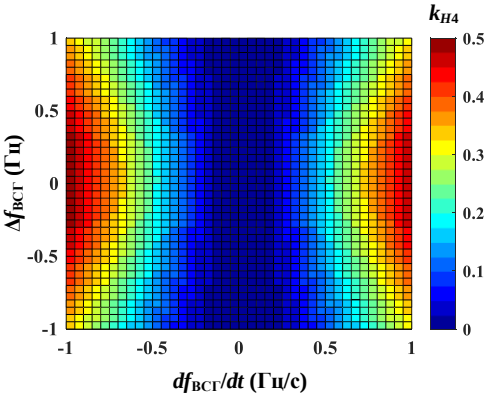
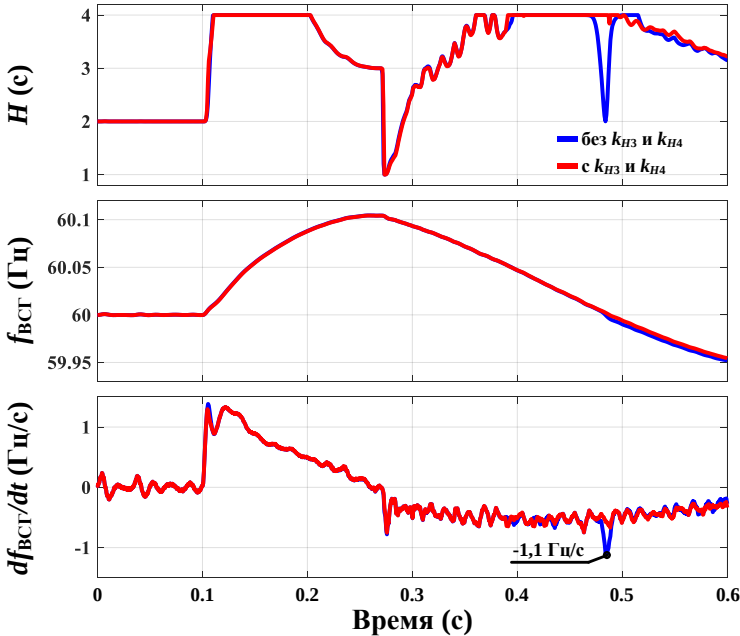


График изменения коэффициента k_{H4}

Влияние изменения инерции ВСГ на скорость изменения частоты при разных вариантах реализации сигмоидальной функции

Синтез алгоритма адаптивной демпферной обмотки для ВСГ-Т

Этап 2 – Предлагаемый адаптивный алгоритм управления параметрами виртуальной демпферной обмотки ВСГ-Т с применением диаграммы Вышнеградского

После линеаризации уравнений ВСГ-Т можно записать замкнутую передаточную функцию частоты виртуального генератора $\Delta\omega_{\text{ВСГ}}$ от входной активной мощности $\Delta P_{\text{уст}}$:

$$G_{\omega/P_ВСГ-Т}(p) = \frac{\Delta\omega_{\text{ВСГ}}}{\Delta P_{\text{уст}}} = \frac{X_{C\phi L_c} L_c p (\tau_Q p + 1)}{ap^3 + bp^2 + cp + d}$$

Характеристическое уравнение данной функции является многочленом третьей степени:

$$ap^3 + bp^2 + cp + d = 0$$

где

$$a = 2H_{\text{ВСГ}}\tau_Q (L_v + X_{C\phi L_c} L_c), \quad b = 2H_{\text{ВСГ}} (L_v + L_Q + X_{C\phi L_c} L_c), \quad c = U_c \omega_6 X_{C\phi L_c} \tau_Q, \quad d = U_c \omega_6 X_{C\phi L_c}$$

Приведем данное уравнение к нормированному виду:

$$q^3 + Aq^2 + Bq + 1 = 0$$

где

$$q = p / \sqrt[3]{d/a} \quad A = \frac{b}{\sqrt[3]{a^2 d}} = \sqrt[3]{\frac{2H_{\text{ВСГ}} (L_v + L_Q + L_c X_{C\phi L_c})^3}{\tau_Q^2 U_c \omega_6 X_{C\phi L_c} (L_v + L_c X_{C\phi L_c})}}$$

$$B = \frac{c}{\sqrt[3]{ad^2}} = \sqrt[3]{\frac{U_c \omega_6 X_{C\phi L_c} \tau_Q^2}{2H_{\text{ВСГ}} (L_v + L_c X_{C\phi L_c})}}$$

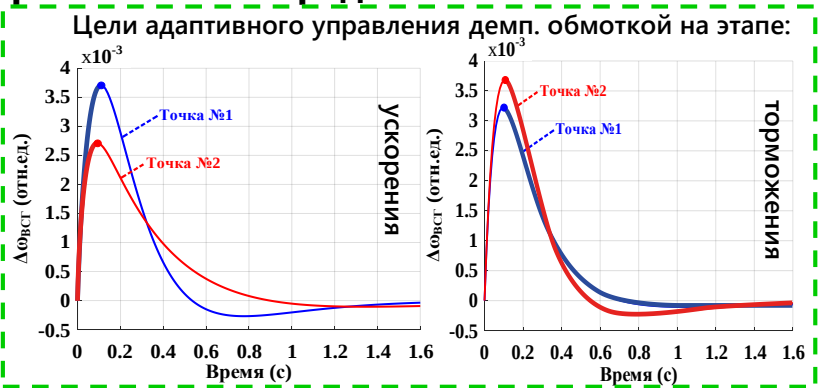
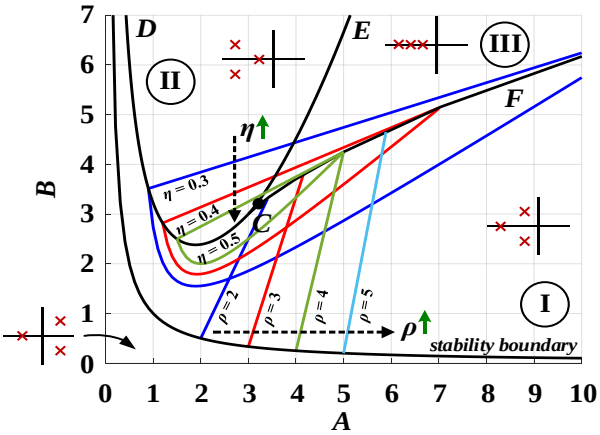
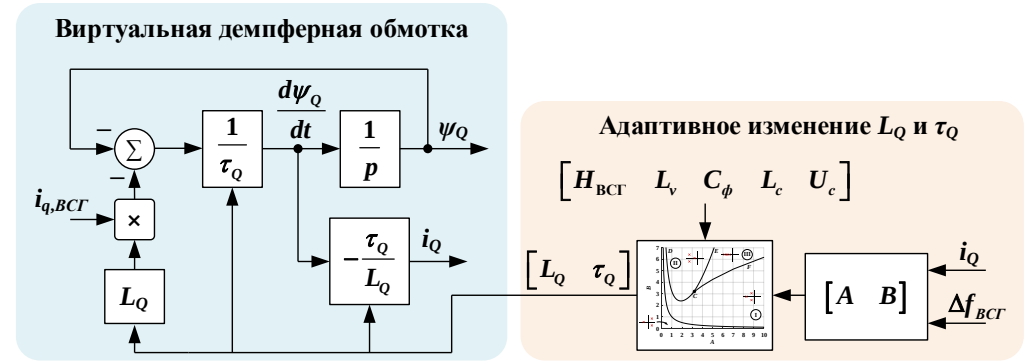


Диаграмма
Вышнеградского (1876),
отражающая условия
устойчивости системы
третьего порядка



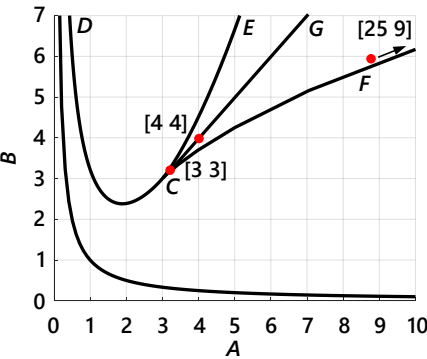
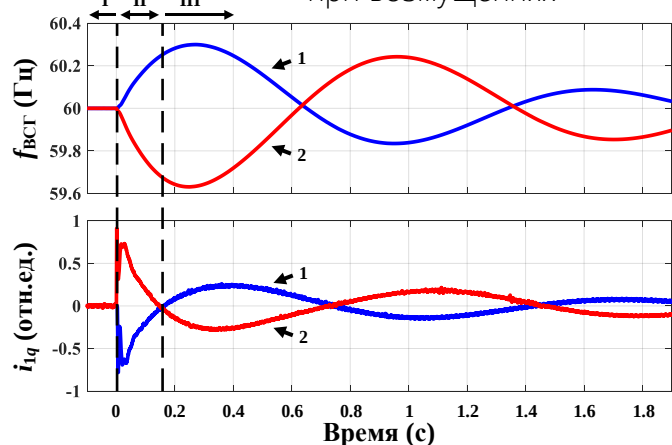
Синтез алгоритма адаптивной демпферной обмотки для ВСГ-Т

Этап 2 – Предлагаемый адаптивный алгоритм управления параметрами виртуальной демпферной обмотки ВСГ-Т с применением диаграммы Вышнеградского



$$\tau_Q = \sqrt[3]{\frac{B^3 \cdot 2H_{\text{BCГ}}(L_v + L_c X_{C_\phi L_c})}{U_c X_{C_\phi L_c} \omega_6}}$$
$$L_Q = -L_v - L_c X_{C_\phi L_c} + A \sqrt[3]{\frac{\tau_Q^2 (L_v + L_c X_{C_\phi L_c}) U_c X_{C_\phi L_c} \omega_6}{2H_{\text{BCГ}}}}$$
$$X_{C_\phi L_c} = \frac{1}{1 - L_c C_\phi}$$

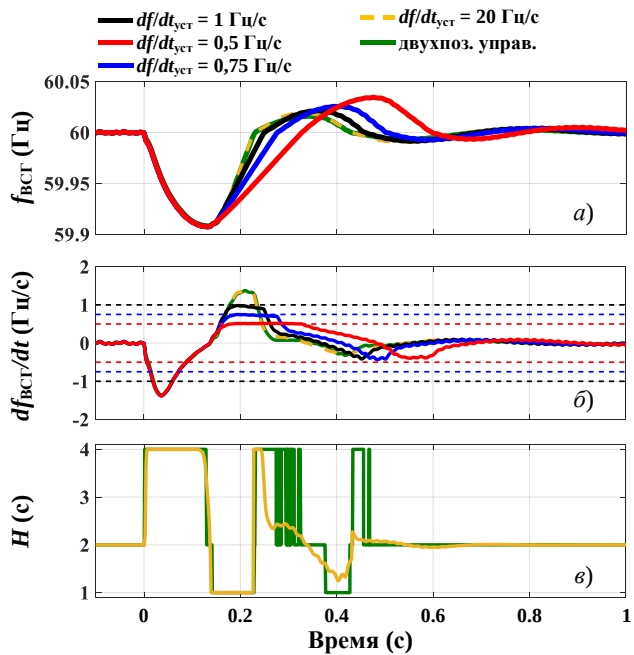
Осциллограммы изменения тока демпферной обмотки при возмущениях



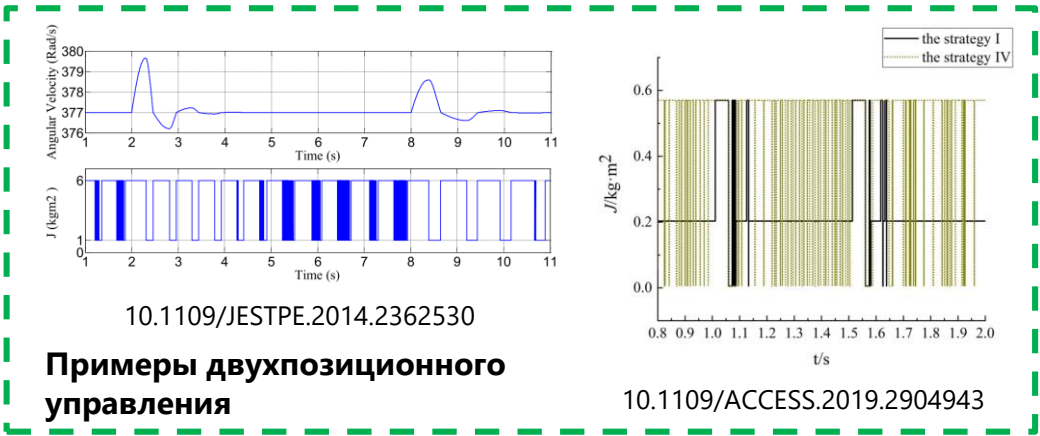
$$[A \ B] = \begin{cases} [25 \ 9] & \text{если } i_Q \cdot \Delta f_{\text{BCГ}} < 0 \\ [3 \ 3] & \text{если } i_Q \cdot \Delta f_{\text{BCГ}} = 0 \\ [4 \ 4] & \text{если } i_Q \cdot \Delta f_{\text{BCГ}} > 0 \end{cases}$$

Результаты математического моделирования

Оценка эффективности работы предложенного алгоритма управления виртуальной инерцией ВСГ на основе нелинейной сигмоидальной функции в сравнении с традиционным двухпозиционным управлением



Осциллограммы процессов при набросе нагрузки и разных уставках $df/dt_{\text{уст}}$: а – частота ВСГ; б – скорость изменения частоты и значения уставки $df/dt_{\text{уст}}$; в – инерция при разных алгоритмах



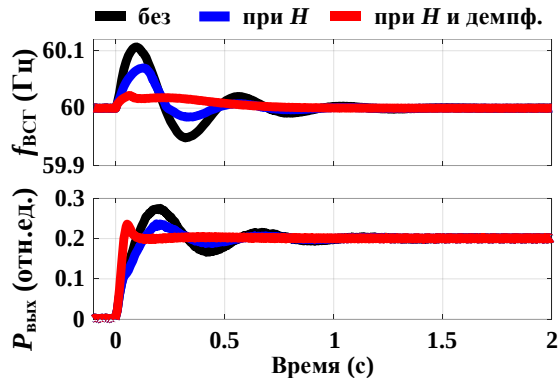
$\Delta E_{\text{предлож}} = 4725 \text{ отн.ед.}$

$\Delta E_{\text{традиц}} = 5973 \text{ отн.ед.}$

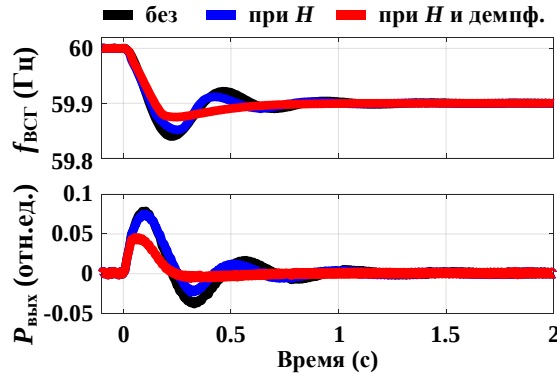
Разница в 21%

Результаты математического моделирования

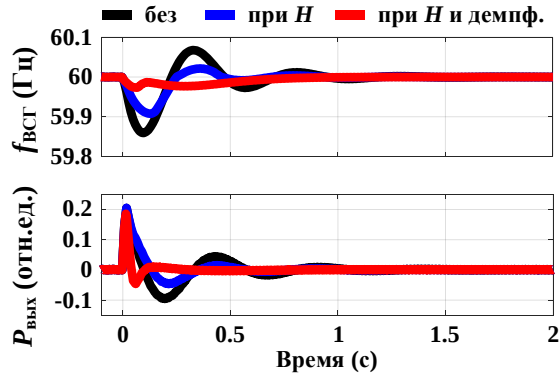
Рассматривалось три случая: ВСГ-Т без адаптивного управления (черная кривая), ВСГ-Т только с адаптивной виртуальной инерцией (синяя кривая) и ВСГ-Т с адаптивной виртуальной инерцией и демпферной обмоткой (красная кривая).



1) ступенчатое изменение уставки по активной мощности $P_{\text{уст}}$ с 0 до 0,2 отн.ед.



2) ступенчатое изменение частоты сети с 60 до 59,9 Гц



3) наброс нагрузки 0,5 МВт в точке подключения

Заключение и перспективы исследований ВСГ

Применение в рамках АГЭК:

- повышение коэффициента использования установленной мощности ВИЭ;
- снижение затрат на дорогостоящее дизельное топливо;
- оптимизация работы дизель-генератора с сопутствующим уменьшением расхода топлива, увеличением моторесурса и снижением стоимости обслуживания генераторов.

Применение для разных источников:

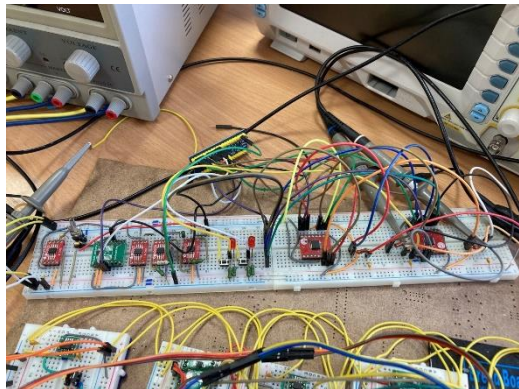
- ветроэнергетические установки;
- фотоэлектрические установки;
- вставки/линии постоянного тока;
- системы накопления электроэнергии;
- зарядные станции для электромобилей.

Применение для сетевых электростанций на базе ВИЭ:

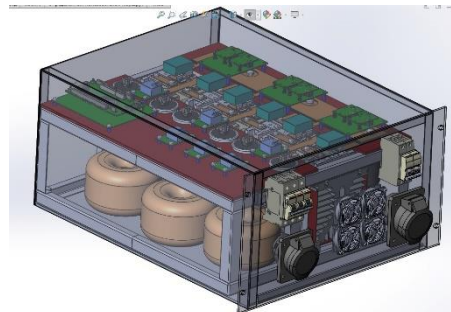
- регулирование частоты и напряжения в сети;
- инерционный отклик;
- демпфирование послеаварийных колебаний;
- плавный переход между режимом параллельной работы с сетью и островным режимом;
- улучшение качества электроэнергии.

Перспективы развития разработок:

От макета сетевого инвертора с ВСГ на базе цифро-управляемых аналоговых ключей



К экспериментальному образцу трехуровневого сетевого инвертора с открытым кодом для тестирования алгоритмов в режиме ведущий в замкнутом цикле с помощью ПАК, 4-х квадратных усилителей, имитаторов внешней сети, электронной нагрузки и рекуперативного источника постоянного тока.





Развитие концепции управления сетевыми инверторами объектов распределенной генерации в режиме «ведущий»

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

Контакты:

СУВОРОВ АЛЕКСЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ,

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

Организация: Томский политехнический университет

e-mail: suvorovaa@tpu.ru

тел: 8-3822-701-777 (доб.1987)