



ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ



ИНЖЕНЕРНАЯ
ШКОЛА
ЭНЕРГЕТИКИ

МЕХАНИЗМЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И СПОСОБЫ ДЕМПФИРОВАНИЯ СУБСИНХРОННЫХ КОЛЕБАНИЙ В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ С СИЛОВЫМИ ИНВЕРТОРНЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ

Докладчик:

СУВОРОВ АЛЕКСЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ,

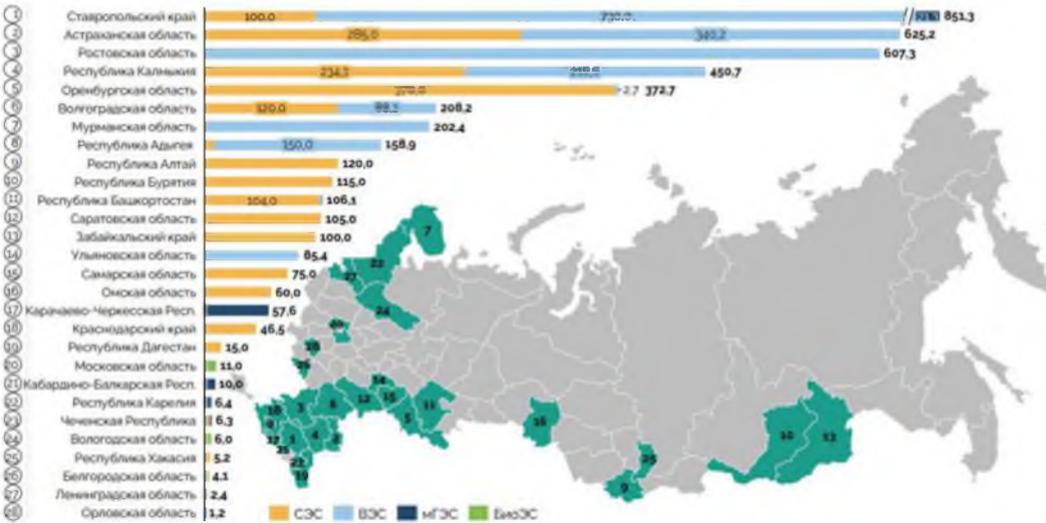
к.т.н., доцент, доцент ОЭЭ ИШЭ, НИЛ «Моделирование ЭЭС»

Организация: Томский политехнический университет

21.05.2025

Введение

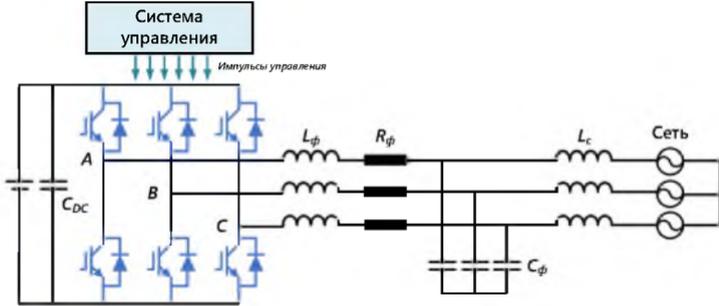
Региональное распределение введенных объектов ВИЭ в РФ, функционирующих в рамках мер стимулирования, по итогам IV квартала 2023 года, МВт*



Подключение объектов генерации через силовой инверторный преобразователь (СП)



Типовая структура СП на базе трехфазного двухуровневого статического преобразователя напряжения



Динамика ежегодных глобальных объёмов прироста мощности, ГВт**



*Источник АРВЭ, **Источник АРВЭ по данным IRENA

Особенности силовых инверторных преобразователей

Особенности внедрения генерирующих объектов на базе силовых инверторных преобразователей (СП)

На уровне устройства

- Преобладание систем автоматического управления и регулирования
- Динамический отклик в нескольких временных масштабах
- Низкая инерция
- Чувствительность к отклонениям частоты и напряжения
- Малый ток короткого замыкания
- Нелинейности
- Периодический характер первичных источников энергии

На уровне системы

- Анализ и обеспечение устойчивости
- Переходные процессы в широких временных и частотных диапазонах
- Управление распределенной системой
- Безопасность и надёжность крупных единичных объектов
- Мульти-энергетическая система и **разрозненные точки подключения к сети**

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).

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.

*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»

**National Grid, Impact of declining short circuit levels, National Grid Warwick Technology Park, Gallows Hill, Warwick, UK., 2018

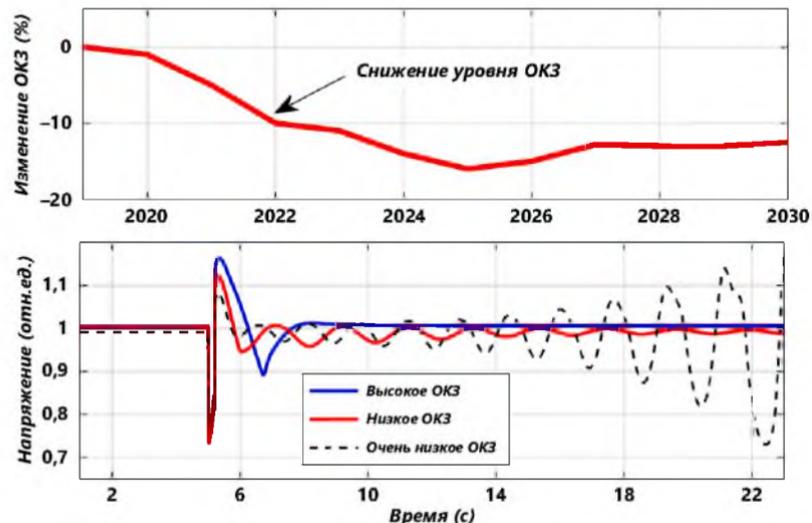


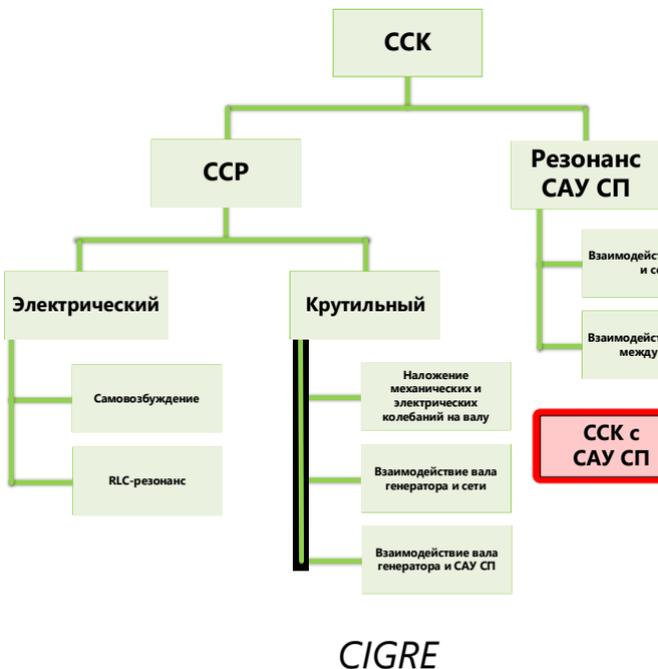
Рис. 1 – Прогноз по изменению ОКЗ в британской национальной сети**



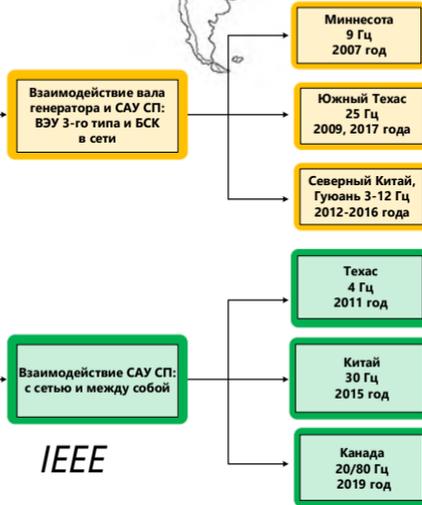
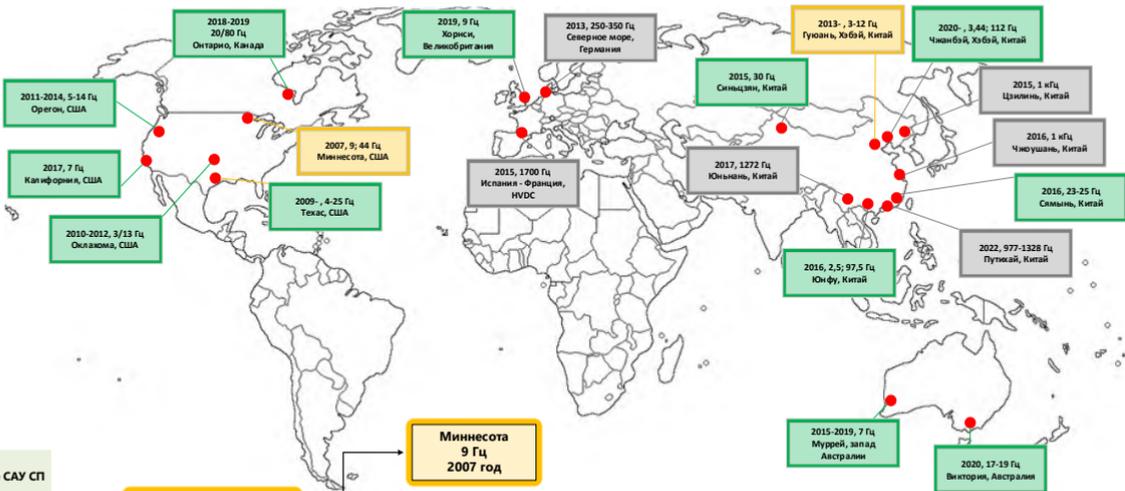
Рис. 2 – Временной масштаб работы регуляторов в САУ СП

Трансформация ЭЭС. Последствия

Классификация субсинхронных колебаний (ССК)
(иногда также называют широкополосные колебания)



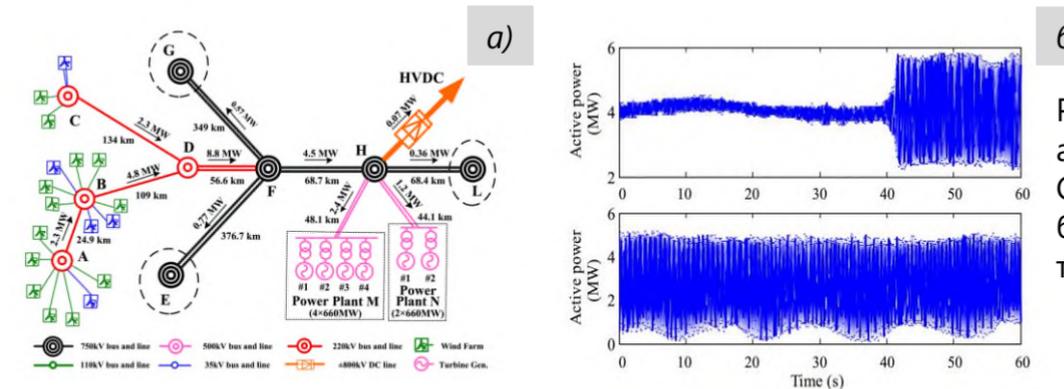
CIGRE



IEEE

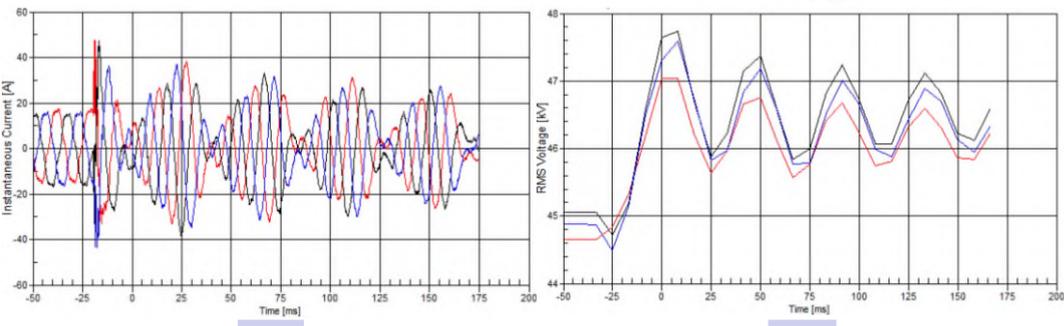
До настоящего времени уже зафиксировано более 20 случаев с ССК из-за САУ СП, получивших официальное подтверждение и освещение в научной периодике, которые наблюдались в энергосистемах разных стран с 2007 года.

Трансформация ЭЭС. Последствия



б)

Рис. 1:
а) Однолинейная схема энергосистемы Синьцзян-Уйгурского автономного района Китая;
б) осциллограммы активной мощности ВЭУ 4-го типа с 9:46 до 9:47 и с 11:52 до 11:53*



а)

б)

Рис. 2 – Осциллограммы, записанные на СЭС в Онтарио, Канада:
а) ток с частотой колебаний 80 Гц; б) напряжение с частотой колебаний 20 Гц**

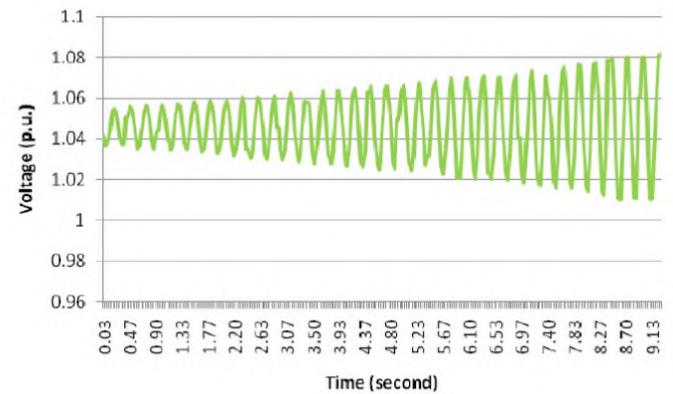


Рис. 3 – Осциллограммы напряжения в энергосистеме ERCOT (Техас, США) в случае незатухающих колебаний при увеличении уровня генерации за счёт ВИЭ***

*doi: 10.1109/TPWRS.2017.2682197
**doi: 10.1109/TPWRD.2017.2656020
***doi: 10.1109/PESGM.2012.6344713

Трансформация ЭЭС. Фундаментальные выводы

Устойчивость энергосистемы

Резонансная
устойчивость

Устойчивость
преобразователя

Устойчивость
угла ротора

Устойчивость
напряжения

Устойчивость
частоты

Электрическая

Крутильная

Быстрое
взаимодействие

Медленное
взаимодействие

Большие
возмущения

Малые
возмущения

Большие
возмущения

Кратковременные

Малые
возмущения

Длительные

Большие
возмущения

Кратковременные

Малые
возмущения

Длительные

Расширенная,
2020 г

Классическая,
2004 г

Классификация устойчивости,
предложенная рабочей группой IEEE в
2004 году и расширенная в 2020 году

Устойчивость энергосистемы

Электромеханические процессы /
Устойчивость основной составляющей

Электромагнитные процессы /
Устойчивость неосновной составляющей

Диапазон
частот

50/60/0 Гц

Суб/супер
синхронные

Высокочастотные

Сверх
высокочастотные

Режимная
переменная

Классификация устойчивости,
предложенная университетом
Цинхуа в 2021 году

Синхронная
устойчивость

Устойчивость
напряжения

Устойчивость
частоты

Малые
возмущения

Большие
возмущения

Малые
возмущения

Большие
возмущения

Большие
возмущения

Малые
возмущения

Интенсивность

Кратковременные

Длительные

Кратковременные

Длительные

Кратковременные

Длительные

Временной
масштаб

Структура рассматриваемой системы

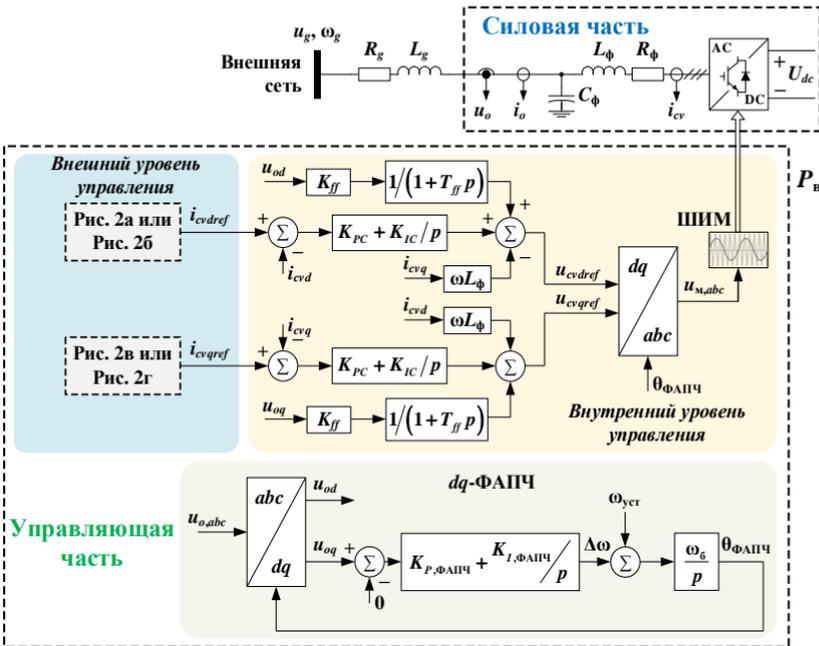


Рис. 1 – Обобщенная структура рассматриваемой электрической сети с сетевым инвертором, работающим в режиме ведомого сетью

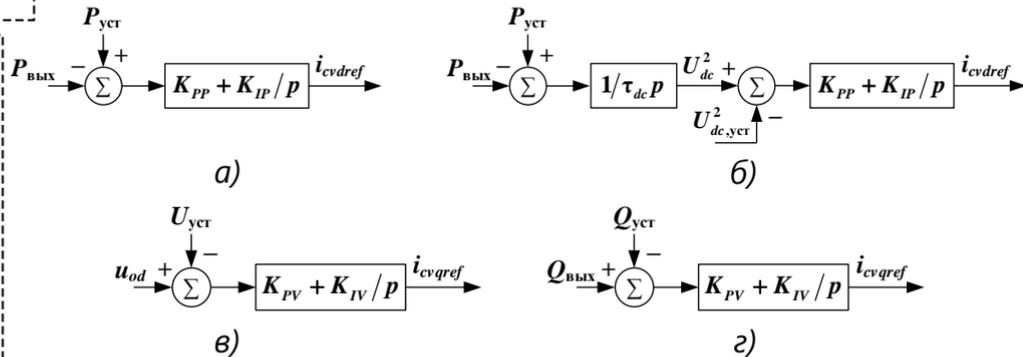
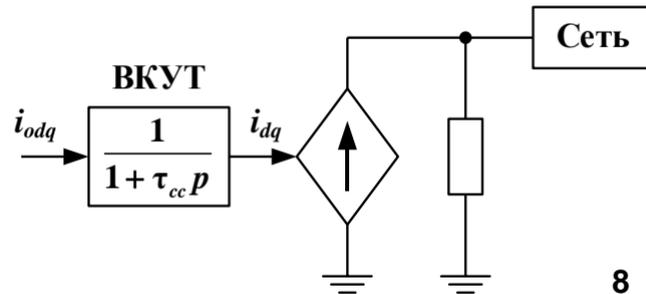


Рис. 2 – Структуры внешних контуров управления:
 а) и в) P-U управление; а) и г) P-Q управление;
 б) и в) DVC-U управление; б) и г) DVC-Q управление

Рис. 3 – Упрощенное представление сетевого инвертора, работающего в режиме ведомого сетью



Упрощенная модель СП с регулятором активной мощности

Упрощенные уравнения сети в осях dq (1): **Выражение для нахождения активной мощности** (2):

$$\begin{cases} u_{od} = U_o = U_g \cos \delta - X_g i_{oq} \\ u_{oq} = 0 = -U_g \sin \delta + X_g i_{od} \end{cases} \quad (1)$$

$$P = u_{od} \cdot i_{od} \Rightarrow \Delta P = u_{od} \cdot \Delta i_{od} + i_{od} \cdot \Delta u_{od} = \underbrace{u_{od} \Delta i_{od}}_{\Delta P_1} - i_{od} (a \Delta i_{od} + X_g \Delta i_{oq}) \quad (2)$$

где U_g – это действующее значение напряжения сети, δ – угол напряжения U_o в точке подключения инвертора к сети.

$$\text{где } a = \sqrt{\left(\frac{U_g}{X_g i_{od}}\right)^2 - 1}.$$

Обобщенное выражение для внешних регуляторов с учетом внутреннего регулятора тока (3):

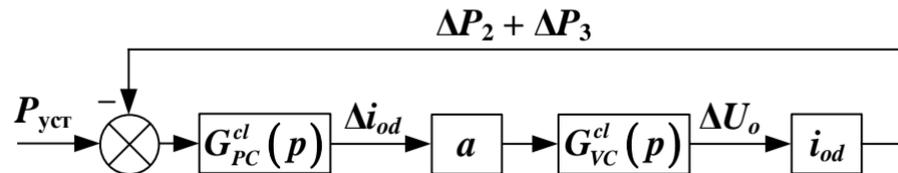
$$G^{ol}(p) = \left(K_p + \frac{K_I}{p} \right) \left(\frac{1}{1 + \tau_{cc} p} \right) \quad (3)$$

Замкнутая передаточная функция для регулятора активной мощности (4):

$$G_{PC}^{cl}(p) = \frac{G_{PC}^{ol}(p)}{1 + U_o \cdot G_{PC}^{ol}(p)} = \frac{K_{PP} p + K_{IP}}{\tau_{cc} p^2 + (K_{PP} U_o + 1) p + K_{IP} U_o} \quad (4)$$

Замкнутая передаточная функция для регулятора напряжения (5):

$$G_{VC}^{cl}(p) = \frac{1}{1 + X_g \cdot G_{VC}^{ol}(p)} = \frac{\tau_{cc} p^2 + p}{\tau_{cc} p^2 + (K_{PV} X_g + 1) p + K_{IV} X_g} \quad (5)$$



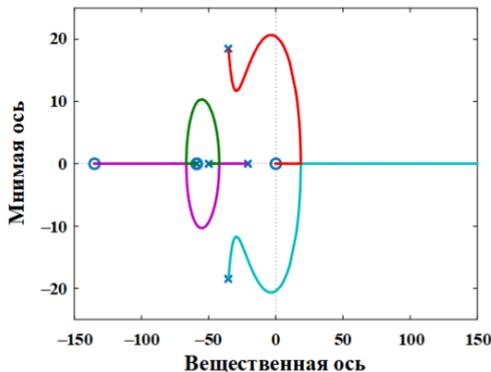
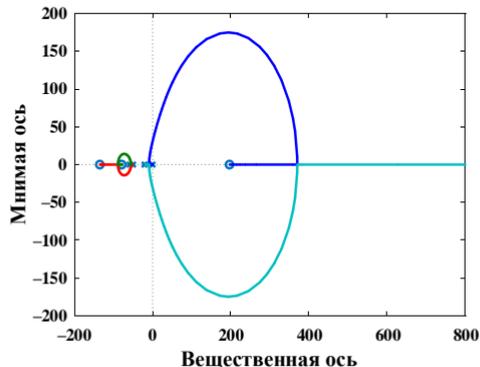
Структурная схема замкнутой передаточной функции для СП, отражающей взаимовлияние регуляторов активной мощности и напряжения

Упрощенная модель СП с регулятором активной мощности

Коэффициенты усиления для разомкнутых функций, отражающих влияние изменения уставки по активной мощности на отклонения тока по оси d Δi_{od} (ΔP_1) и напряжения Δu_{od} ($\Delta P_2 + \Delta P_3$):

$$G_1^{ol}(p) = G_{PC}^{ol}(p) \cdot (U_o - a \cdot G_{VC}^{cl}(p) \cdot i_{od}) \quad (1)$$

$$G_2^{ol}(p) = G_{PC}^{cl}(p) \cdot (-a \cdot G_{VC}^{cl}(p) \cdot i_{od}) \quad (2)$$

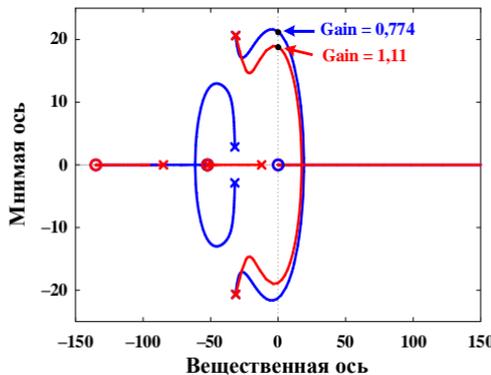
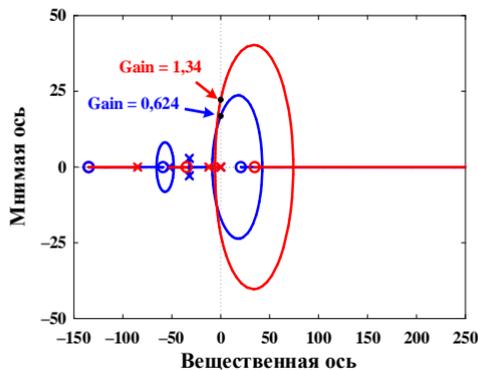


Корневые годографы при $X_g = 0,8$; $K_{PV} = 0,25$ для разомкнутых функций

Свободный член c уравнения (1):

$$c = \frac{K_{IV} \cdot U_o \cdot X_g}{\tau_{cc} \cdot (U_o - a \cdot i_{od})}$$

Корневые годографы при $X_g = 0,9$; $K_{PV} = 0,25$ (синие кривые) и $K_{PV} = 0,95$ (красные кривые) для разомкнутых функций



Увеличение быстродействия регулятора напряжения приводит к ослаблению взаимовлияния регуляторов, способствующего увеличению области устойчивости.

Упрощенная модель СП с регулятором активной мощности

Замена регулятора напряжения на регулятор реактивной мощности:

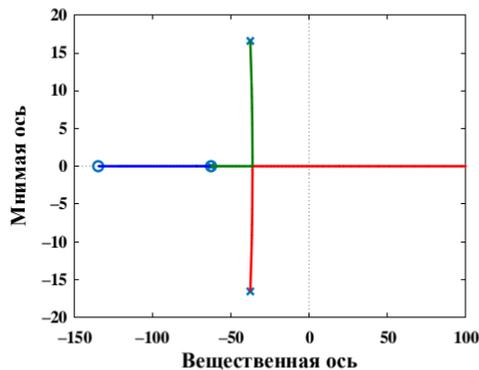
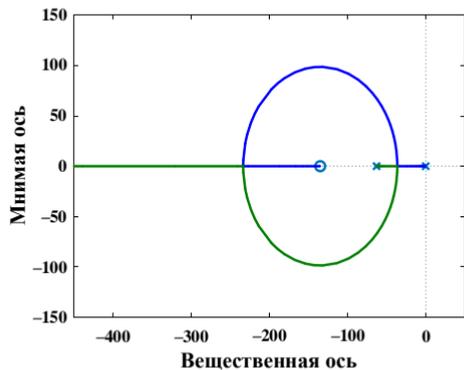


Рис. 1 – Корневые годографы при $G_{VC}^{cl}(p) = 1$

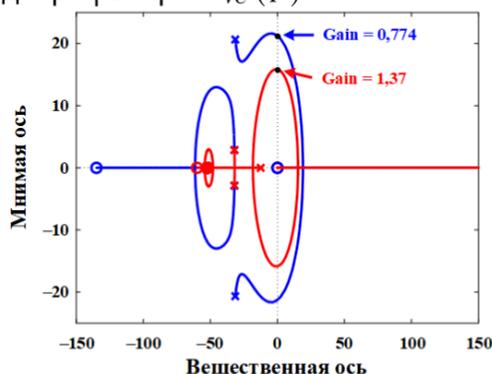
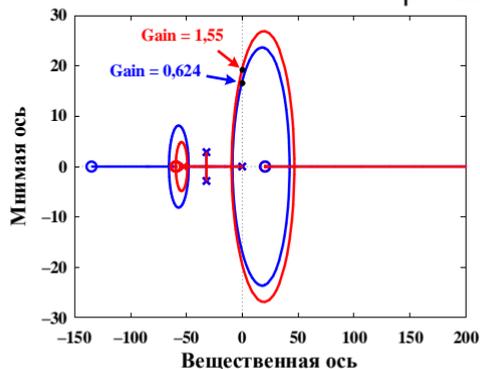


Рис. 3 – Корневые годографы при $X_g = 0,9$;

$K_{IP} = 27$ (синие кривые) и $K_{IP} = 12$ (красные кривые)

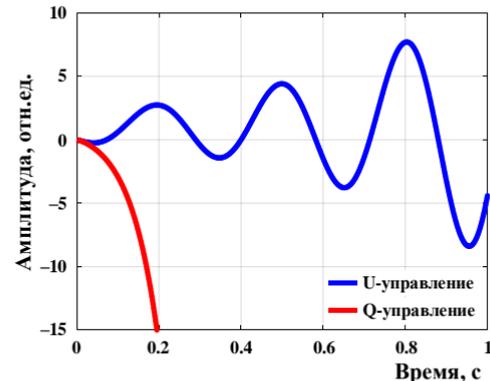


Рис. 2 – Переходные характеристики при использовании регулятора напряжения (синяя кривая) и регулятора реактивной мощности (красная кривая)

Увеличить запас устойчивости

можно с помощью регулятора активной мощности и внутреннего регулятора тока. Для первого необходимо уменьшить полосу пропускания, а для второго – увеличить.

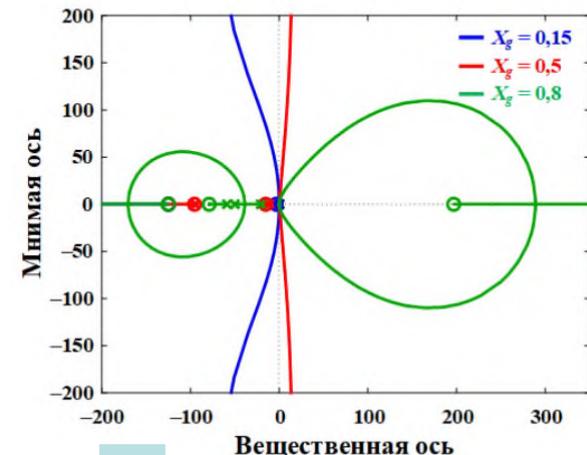
Упрощенная модель СП с регулятором напряжения ЦПТ

$$\tau_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} = P_{уст} - P_{вых} \quad (1)$$

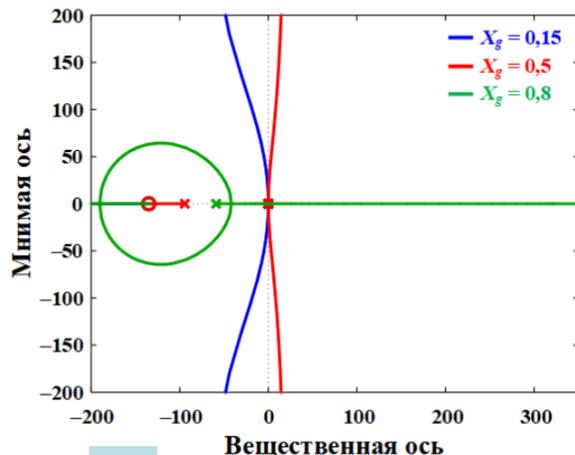
где $\tau_{dc} = \frac{C_{dc} U_{6,dc}^2}{2S_6}$ – постоянная времени цепи постоянного тока (ЦПТ).

Коэффициент усиления для разомкнутой функции в случае использования регулятора напряжения ЦПТ вместо регулятора активной мощности, отражающей влияние изменения уставки по активной мощности на отклонения тока по оси $d \Delta i_{od}$:

$$G_{1,dc}^{ol}(p) = \frac{1}{\tau_{dc} p} \cdot G_{PC}^{ol}(p) \cdot (U_o - a \cdot G_{VC}^{ol}(p) \cdot i_{od}) \quad (2)$$



а)



б)

Корневые годографы при использовании:
а) регулятора напряжения;
б) регулятора реактивной мощности

Упрощенная модель СП с регулятором активной мощности и ФАПЧ

Замкнутая передаточная функция ФАПЧ:

$$G_{\text{ФАПЧ}}^{cl}(p) = \frac{\Delta\delta}{\Delta\delta_o} = \frac{(K_{P,\text{ФАПЧ}}p + K_{I,\text{ФАПЧ}})\omega_6}{p^2 + K_{P,\text{ФАПЧ}}\omega_6p + K_{I,\text{ФАПЧ}}\omega_6} \quad (1)$$

Выражение, описывающее поведение угла напряжения δ_o на входе ФАПЧ:

$$\Delta\delta_o = \frac{X_g}{U_o} \Delta i_{od} - \frac{i_{oq} X_g \Delta\delta}{U_o} \quad (2)$$

Изменение напряжения в точке подключения с учётом блока ФАПЧ:

$$\Delta U_o = -X_g \Delta i_{oq} \quad (3) \quad \xrightarrow{+\text{ФАПЧ}} \quad \Delta U_o = -X_g i_{oq} \Delta\delta - X_g \Delta i_{oq} \quad (4)$$

$\Delta P_2 + \Delta P_3$

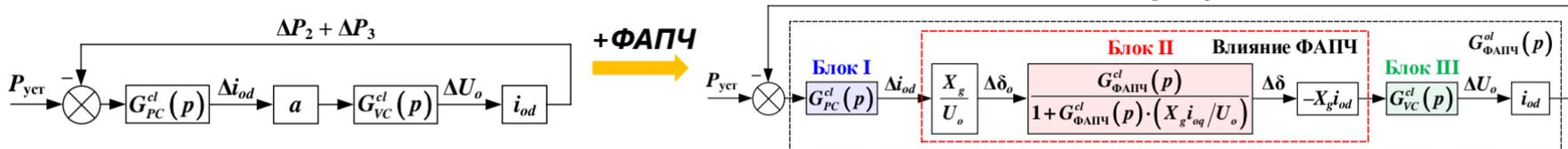


Рис. 1 – Структурная схема замкнутой передаточной функции для СП, отражающей влияние ФАПЧ

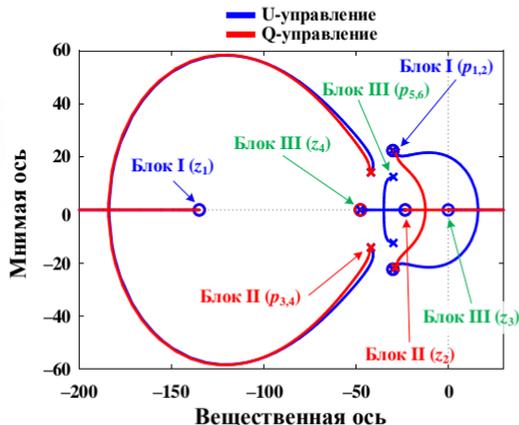
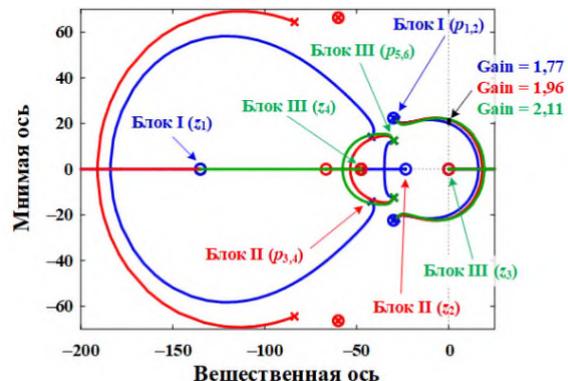


Рис. 2 – Корневые годографы:

- а) при разных полосах пропускания ФАПЧ:
 - 13 Гц (синие кривые);
 - 30 Гц (красные кривые);
 - ∞ (зеленые кривые);
- б) при полосе пропускания ФАПЧ 13 Гц и разных регуляторах по оси q

Упрощенная модель СП с регулятором напряжения ЦПТ и ФАПЧ

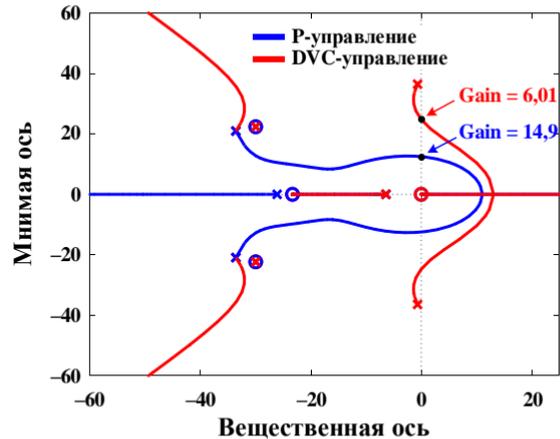


Рис. 1 – Корневые годографы для разомкнутой функции при разных регуляторах по оси d

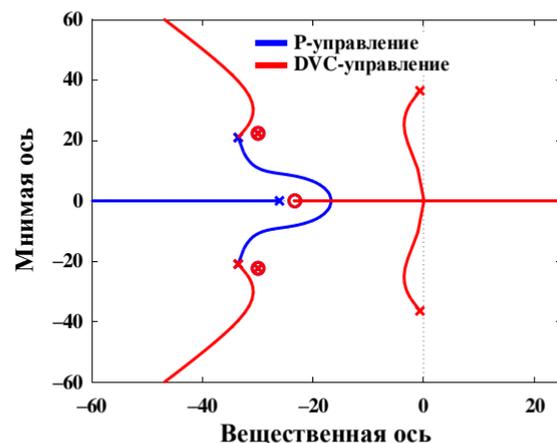


Рис. 3 – Корневые годографы для разомкнутой функции при использовании регулятора реактивной мощности по оси q и разных регуляторах по оси d

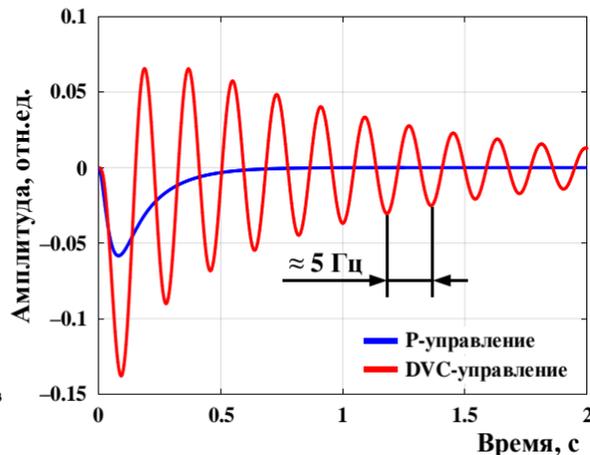
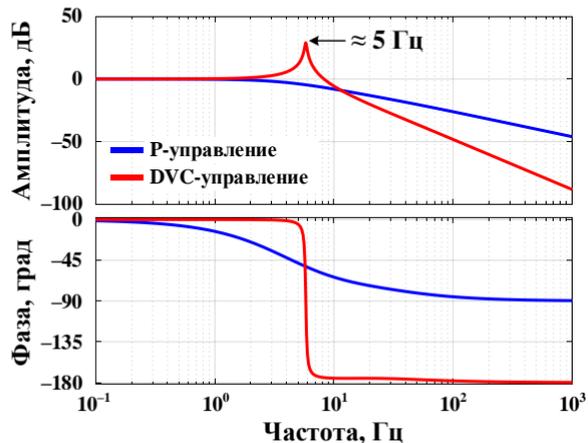


Рис. 2 – Отклик передаточной функции упрощенной модели СП с ФАПЧ при разных регуляторах по оси d в частотной области и во временной области

Упрощенная модель СП с ФАПЧ и динамикой сети

Уравнение динамики сети:

Уравнение сети с учётом динамики и влияния ФАПЧ:

Разомкнутая передаточная функция уравнений сети с учётом динамики и ФАПЧ:

$$Z_g = (p + j\omega)L_g = pL_g + jX_g \quad (1)$$

$$\Delta U_o + jU_o\Delta\delta_o = (p + j\omega) \cdot L_g \cdot i_{od} \cdot (j\Delta\delta) \Rightarrow \quad (2)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \Delta U_o = -X_g i_{od} \Delta\delta \\ U_o \Delta\delta_o = sL_g i_{od} \Delta\delta \end{cases} \quad (3)$$

$$G_{\text{ФАПЧ}+pL_g}^{ol}(p) = -p \frac{X_g}{\omega_g} i_{od} \frac{1}{1+T_{ff}p} G_{\text{ФАПЧ}}^{cl}(p) \quad (4)$$

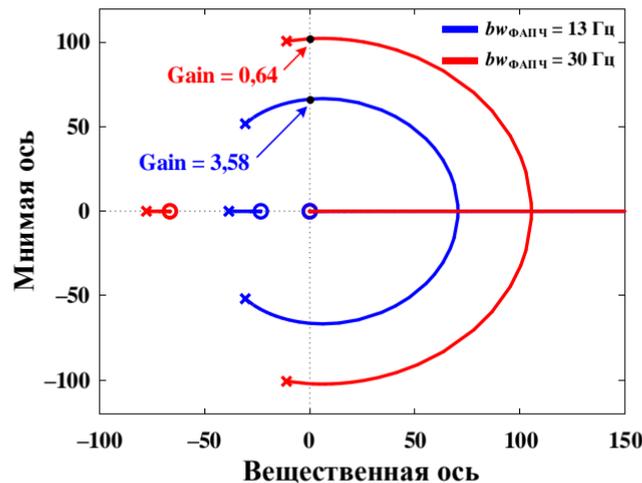
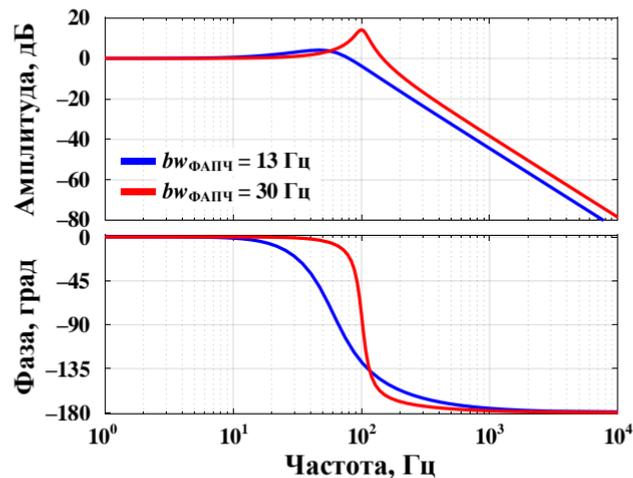


Рис. 1 – ЛАФЧХ передаточной функции (4) при разных полосах пропускания ФАПЧ

Рис. 2 – Корневой годограф передаточной функции (4) при разных полосах пропускания ФАПЧ

Верификация механизмов ССК с помощью детальной модели

Модель в пространстве состояний:

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

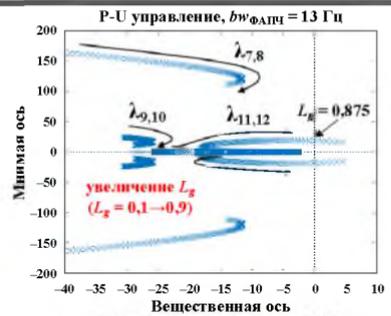
$$\Delta \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \Delta u_{od} & \Delta u_{oq} & \Delta i_{cvd} & \Delta i_{cvq} & \Delta \gamma_d & \Delta \gamma_q & \Delta i_{od} & \Delta i_{oq} & \dots \\ \Delta \varepsilon_{\text{ФАПЧ}} & \Delta \xi_d & \Delta \xi_q & \Delta \theta_{\text{ФАПЧ}} & \Delta u_{cd} & \Delta u_{cq} \end{bmatrix}^T$$

$$\Delta \mathbf{u} = \begin{bmatrix} \Delta P_{\text{уст}} & \Delta U_{\text{уст}} & \Delta u_g & \Delta \omega_g \end{bmatrix}^T$$

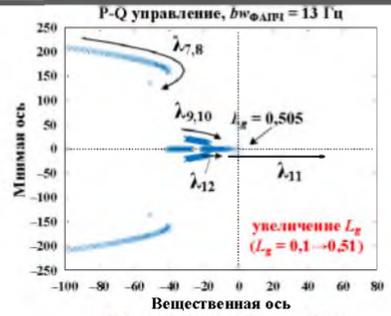
Анализ коэффициентов участия для случая P-U управления СП:

Элемент системы	Переменные состояния	P-U управление								
		$\lambda_{1,2}$	$\lambda_{3,4}$	$\lambda_{5,6}$	$\lambda_{7,8}$	$\lambda_{9,10}$	λ_{11}	λ_{12}	λ_{13}	λ_{14}
Электрическая сеть	u_{od}	0,255	0,198	0,005	0,005	0	0	0	0	0
	u_{oq}	0,217	0,235	0,004	0,005	0	0	0	0	0
	i_{cvd}	0,156	0,155	0,154	0,141	0,007	0,091	0,001	0,049	0,017
	i_{cvq}	0,132	0,178	0,151	0,145	0,004	0,014	0,018	0	0,071
	i_{od}	0,089	0,061	0,188	0,065	0,001	0,021	0,009	0	0,004
	i_{oq}	0,077	0,076	0,184	0,096	0,005	0,001	0,005	0	0,002
Внешние контура	ξ_d	0	0	0,004	0,022	0,047	0,513	0,049	0,108	0,038
	ξ_q	0	0	0,001	0,011	0,008	0,03	0,866	0	0,084
ВКУТ	γ_d	0	0	0,003	0,014	0,01	0,107	0,001	0,83	0,023
	γ_q	0	0	0,003	0,014	0,014	0,078	0,036	0,003	0,715
ФАПЧ	$\varepsilon_{\text{ФАПЧ}}$	0	0	0,001	0,007	0,455	0,085	0,008	0,001	0,013
	$\theta_{\text{ФАПЧ}}$	0,001	0,002	0,014	0,059	0,411	0,001	0,005	0	0,004
Контур СПК по u_{odq}	u_{cd}	0,04	0,044	0,15	0,211	0,014	0,019	0,002	0,009	0,015
	u_{cq}	0,033	0,052	0,139	0,204	0,022	0,04	0	0	0,015

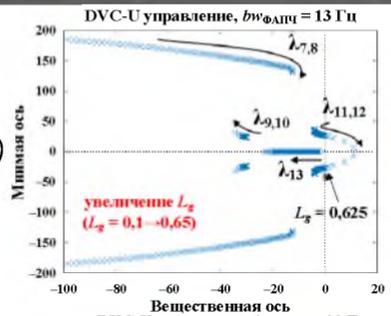
Анализ собственных чисел аналитической модели СП



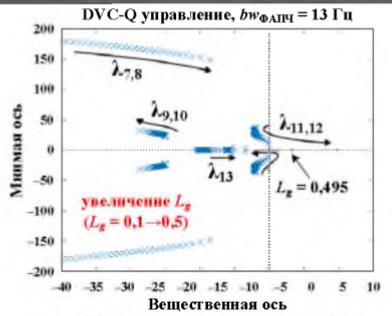
1a)



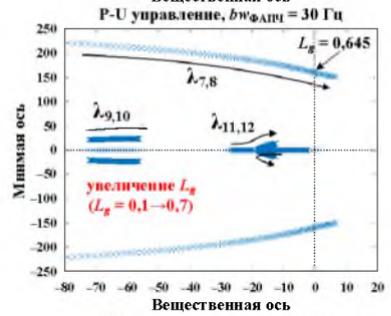
2a)



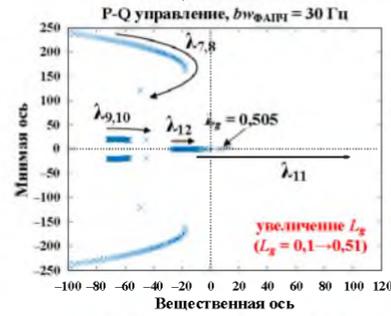
3a)



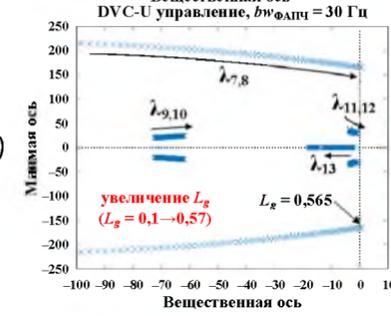
4a)



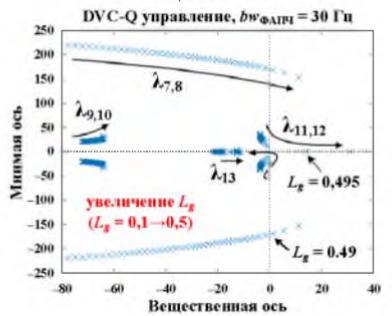
1б)



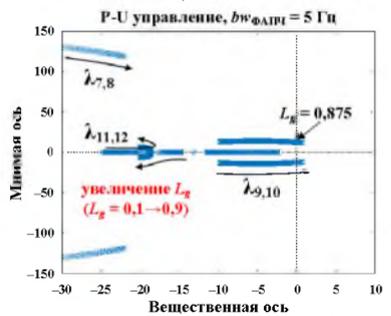
2б)



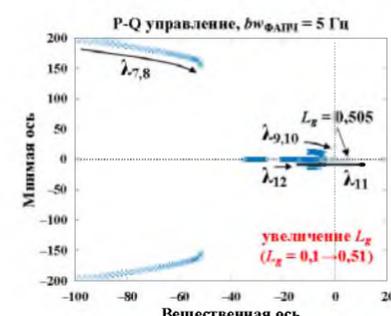
3б)



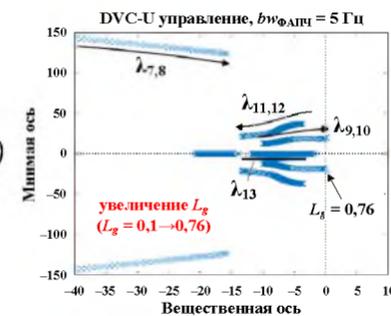
4б)



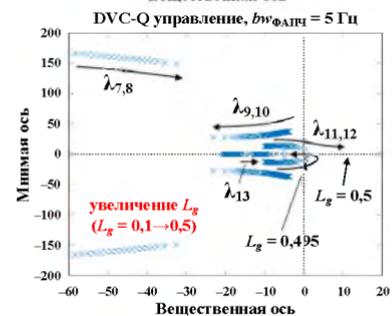
1в)



2в)

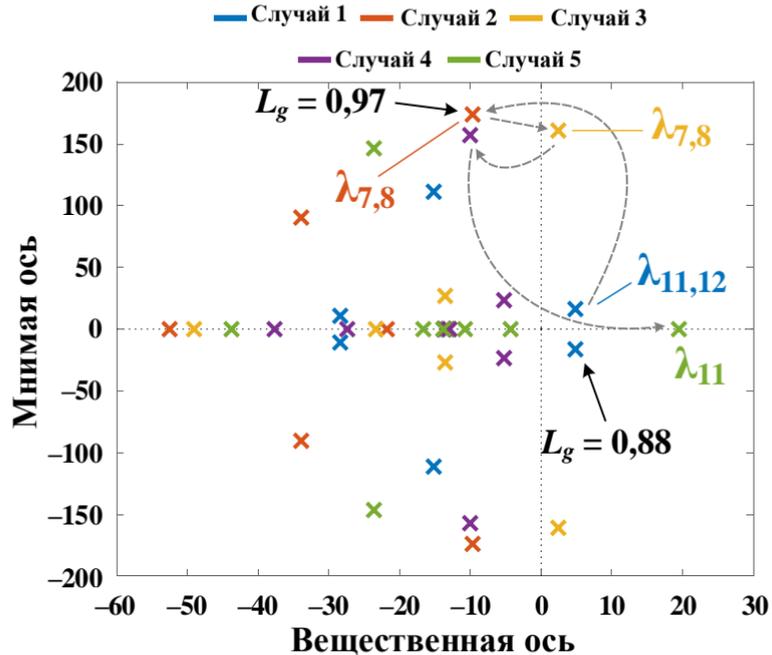


3в)



4в)

Анализ собственных чисел аналитической модели СП



Корневые годографы в случае $P-U$ управления при изменении параметров настройки различных контуров и уровня загрузки инвертора

Исходная настройка при максимальной нагрузке СП; возникновение ССК из-за контуров по активной мощности и напряжению ($\lambda_{11,12}$)

Увеличение быстродействия регулятора напряжения при максимальной нагрузке СП; отсутствует возникновение ССК

Увеличение быстродействия регулятора напряжения при уменьшении загрузки СП; возникновение ССК из-за взаимовлияния ФАПЧ и динамики сети ($\lambda_{7,8}$)

Уменьшение быстродействия ФАПЧ при уменьшении загрузки СП; отсутствует возникновение ССК

Уменьшение быстродействия ФАПЧ при максимальной нагрузке СП; нарушение устойчивости из-за контура по активной мощности (λ_{11})

Анализ ЛАФЧХ аналитической модели СП

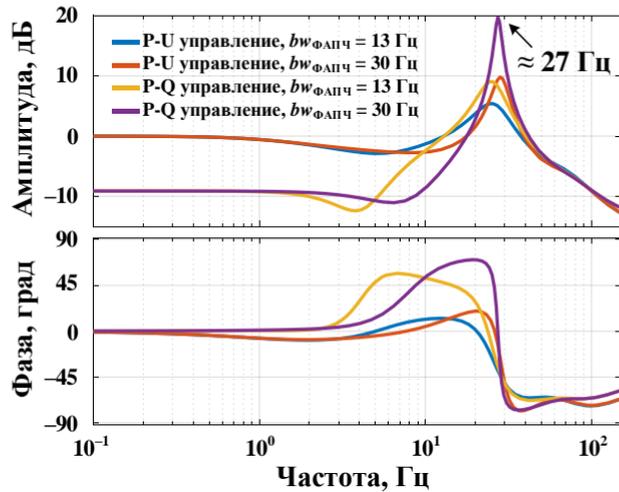


Рис. 1 – ЛАФЧХ разомкнутой передаточной функции $\Delta i_{\text{cvdref}}/\Delta P_{\text{ВЫХ}}$ с учетом разных полос пропускания ФАПЧ при P-U и P-Q управлении

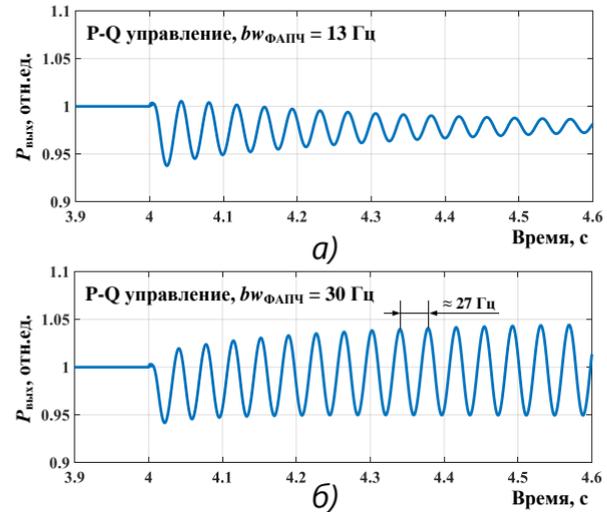
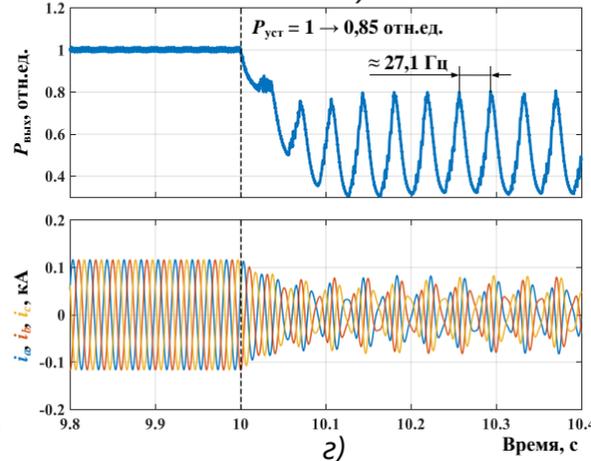
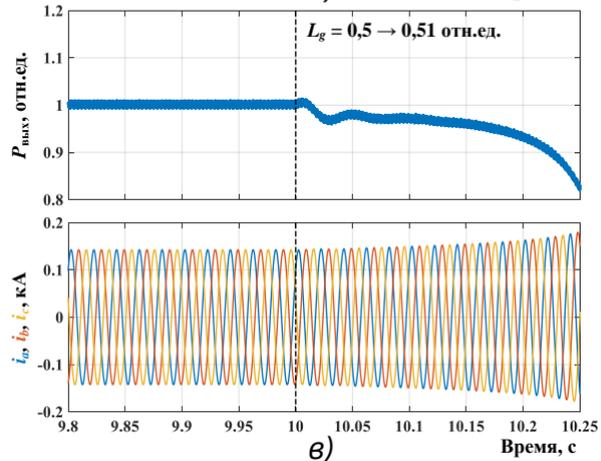
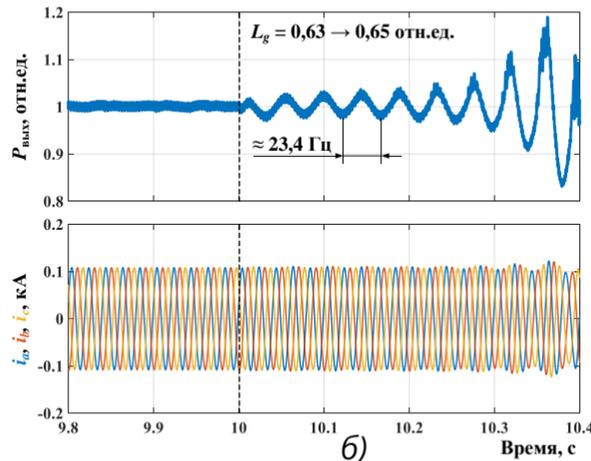
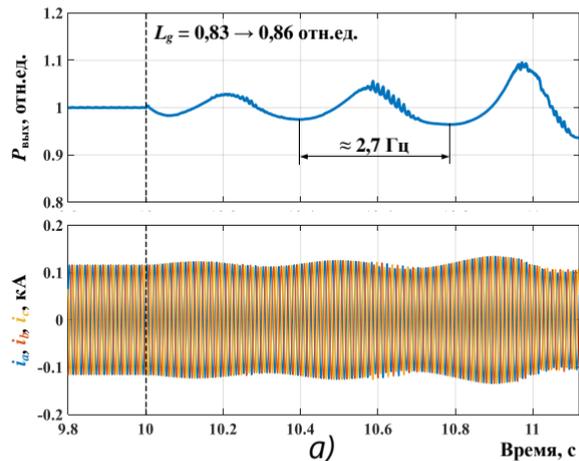


Рис. 2 – Осциллограммы изменения активной мощности инвертора при P-Q управлении:
а) $bw_{\text{ФАПЧ}} = 13$ Гц; б) $bw_{\text{ФАПЧ}} = 30$ Гц

Моделирование во временной области



Осциллограммы процессов моделирования во временной области при увеличении L_g :

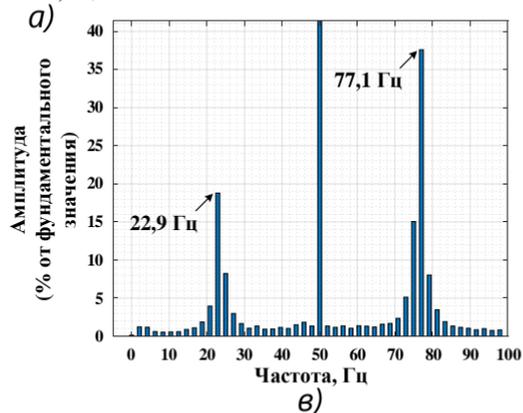
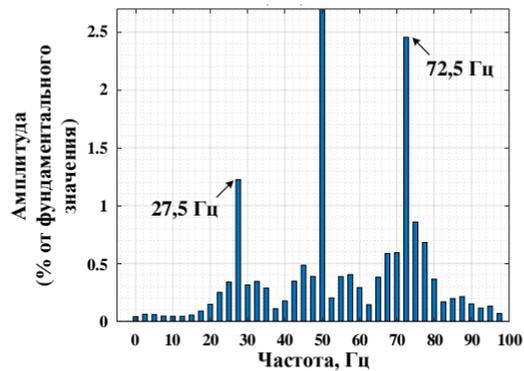
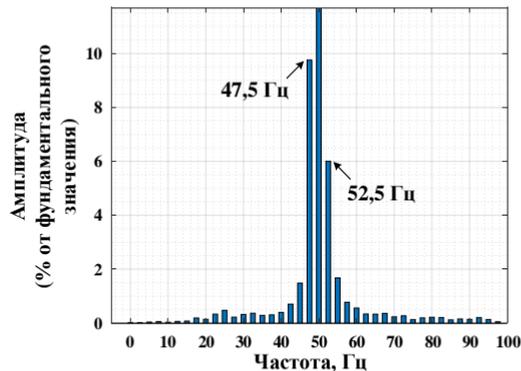
а) P - U управление с $bw_{\text{ФАПЧ}} = 13 \text{ Гц}$;

б) P - U управление с $bw_{\text{ФАПЧ}} = 30 \text{ Гц}$;

в) P - Q управление с $bw_{\text{ФАПЧ}} = 13 \text{ Гц}$;

г) P - U управление при уменьшении $P_{\text{уст}}$

Анализ частотного спектра



Гармонический спектр для тока фазы А после возникновения колебаний в случае $P-U$ управления:

а) $bw_{\text{ФАПЧ}} = 13$ Гц; б) $bw_{\text{ФАПЧ}} = 30$ Гц; в) при уменьшении $P_{\text{уст}}$

Тестирование САУ СП в замкнутом цикле

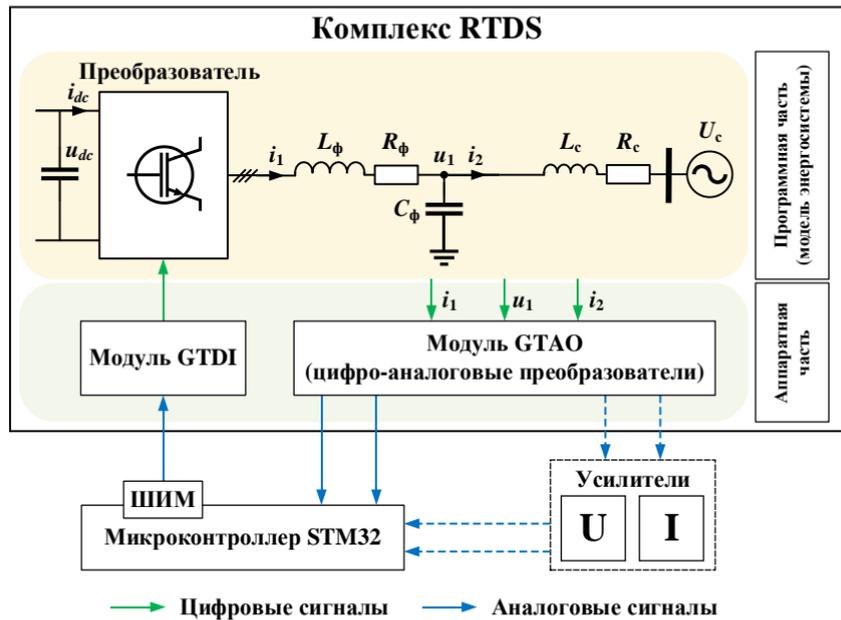
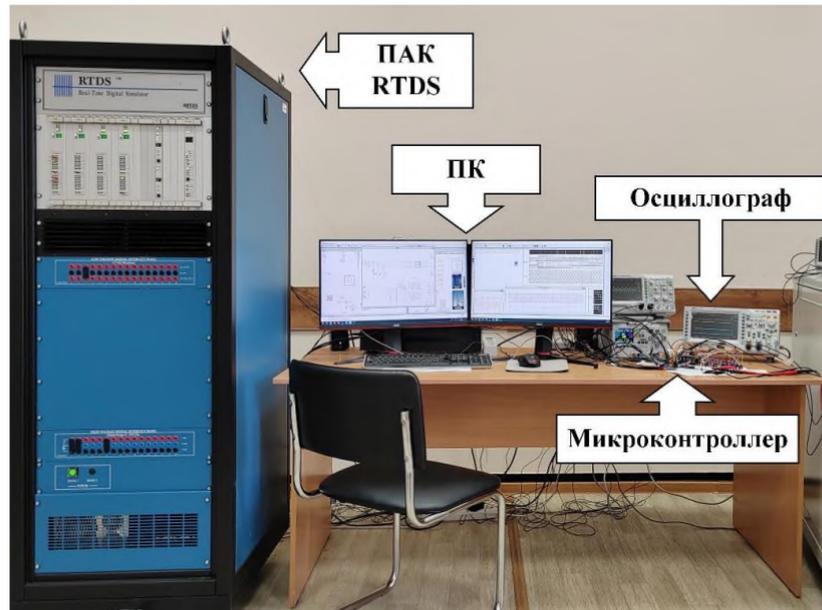


Схема тестирования в замкнутом цикле



Экспериментальный стенд для тестирования в замкнутом цикле

Тестирование САУ СП в замкнутом цикле

Результаты экспериментов, полученные при тестировании в замкнутом цикле, в случае $P-U$ управления инвертором:

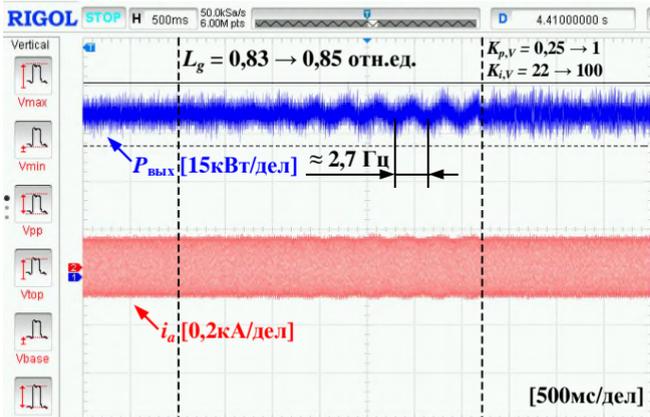


Рис. 1 – При $bw_{\text{ФАПЧ}} = 13$ Гц и увеличении L_g , а затем изменении параметров настройки регулятора напряжения

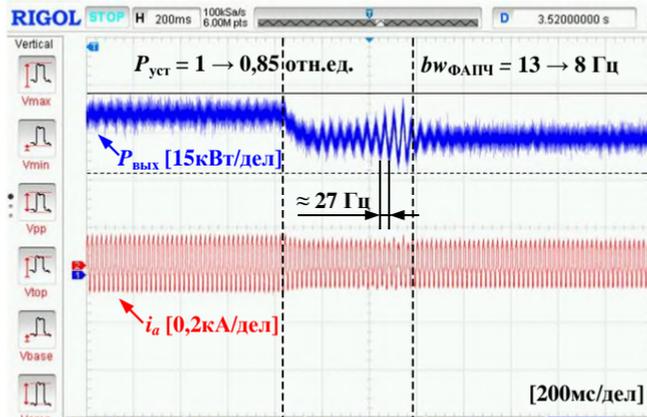


Рис. 2 – При уменьшении $P_{\text{уст}}$ и полосы пропускания ФАПЧ

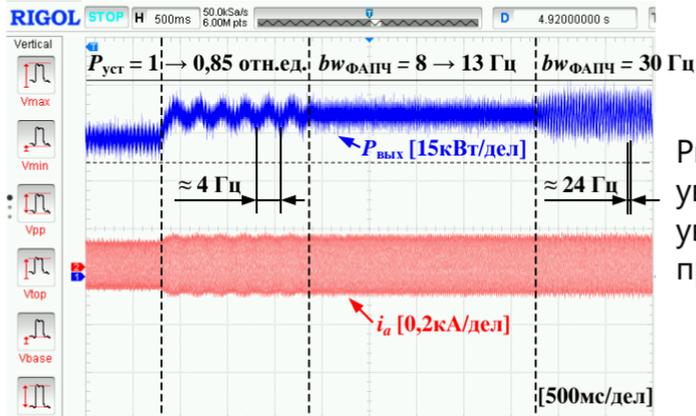


Рис. 3 – При $bw_{\text{ФАПЧ}} = 8$ Гц и увеличении $P_{\text{уст}}$, а затем увеличении полосы пропускания ФАПЧ

Обобщение результатов исследований ССК

Условие		P-U управление				P-Q управление			DVC-U управление				DVC-Q управление		
		bw _{ФАПЧ}			bw _{УС}	bw _{ФАПЧ}			bw _{ФАПЧ}			bw _{УС}	bw _{ФАПЧ}		
		выс.	сред.	низ.	выс.	выс.	сред.	низ.	выс.	сред.	низ.	выс.	выс.	сред.	низ.
Факторы риска возникновения ССК	L_d	Увеличение ↑													
	i_{od}	↑	↑	↑	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↓	↑	↑	↑
	U_o	Снижение ↓													
Характер нарушения устойчивости		колеб.	колеб.	колеб.	колеб.	колеб./апер.	апер.	апер.	колеб.	колеб.	колеб.	колеб.	колеб.	апер.	колеб.
Наличие зеркальной частоты ССК		да	да	да	да	да/нет	нет	нет	да	да	да	да	да	нет	да
Частота ССК в осях dq , Гц		≈25,3	≈2,8	≈1,96	≈25,6	≈27/–	–	–	≈26	≈4	≈3	≈24	≈27	–	≈1,3
Причина ССК		Задержки в ФАПЧ	Взаимовлияние РМ и РН	Настройка ФАПЧ	Взаимовлияние ФАПЧ и РН	Задержки в ФАПЧ/отсут. (предел передаваемой мощности)	отсут. (предел передаваемой мощности)	отсут. (предел передаваемой мощности)	Задержки в ФАПЧ	Настройка РНЦПТ	Настройка ФАПЧ	Взаимовлияние ФАПЧ и РН	Задержки в ФАПЧ	Настройка РНЦПТ	Настройка РНЦПТ

РМ – регулятор мощности;

РН – регулятор напряжения;

РНЦПТ – регулятор напряжения цепи постоянного тока.

Мероприятия по борьбе с ССК

1

Изменение схемно-режимных условий сети и/или внедрение дополнительных устройств, как правило, для компенсации реактивной мощности

2

Выбор оптимального закона управления СП

3

Модернизация структуры управления СП

4

Изменение подходов к управлению СП

Модернизация структуры управления СП

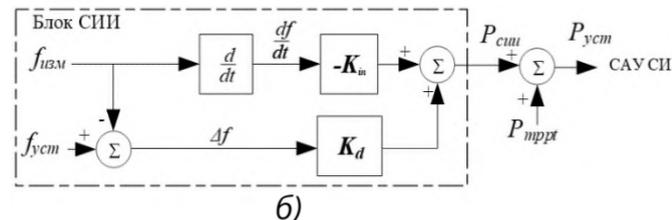
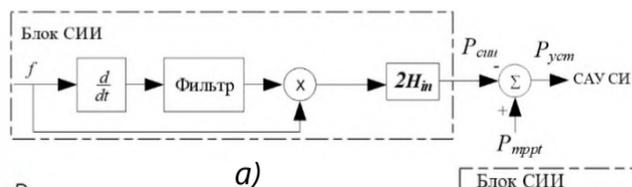
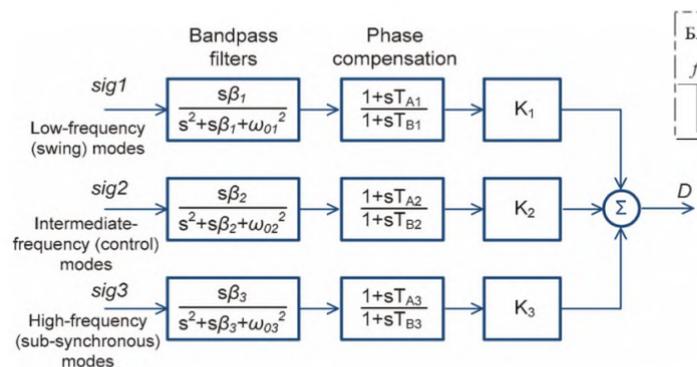


Рис. 1 – Комбинированная система регулятора демпфирования колебаний [1]

Рис. 2 – Схема блока синтетической инерции:
а) одноконтурное управление, б) двухконтурное управление [2]

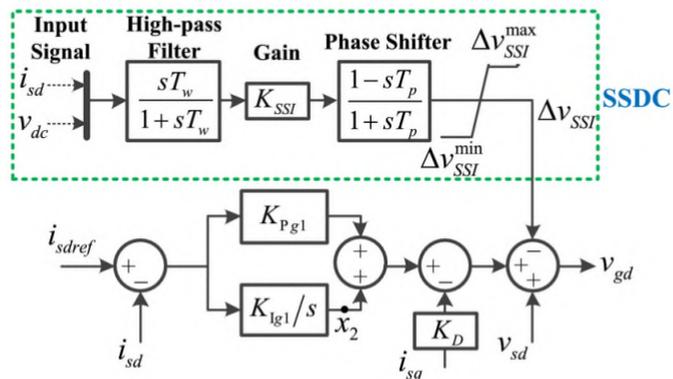
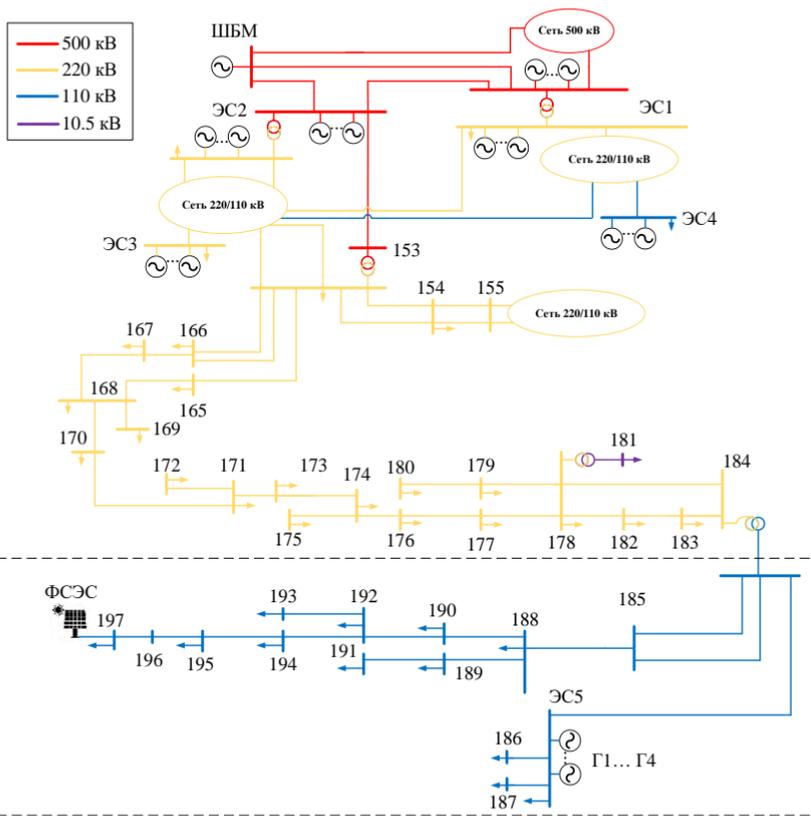


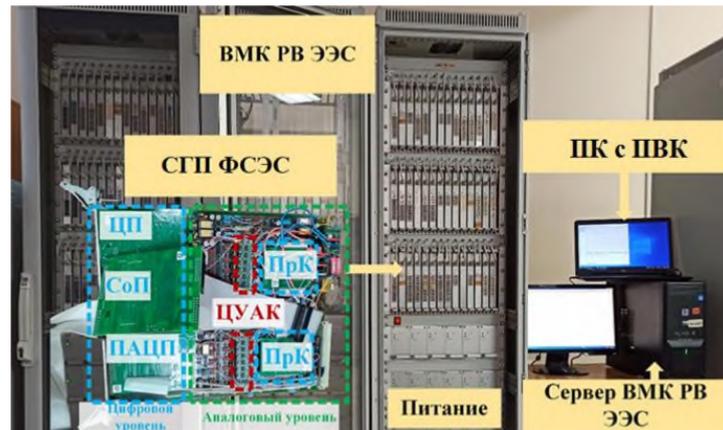
Рис. 3 – Регулятор демпфирования ССК [3]

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

Моделирование ССК в тестовой ЭЭС



Однолинейная схема тестовой ЭЭС



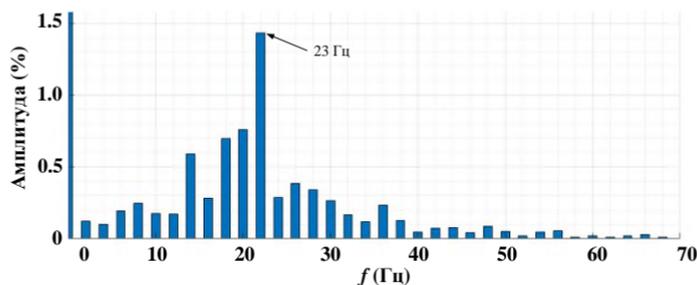
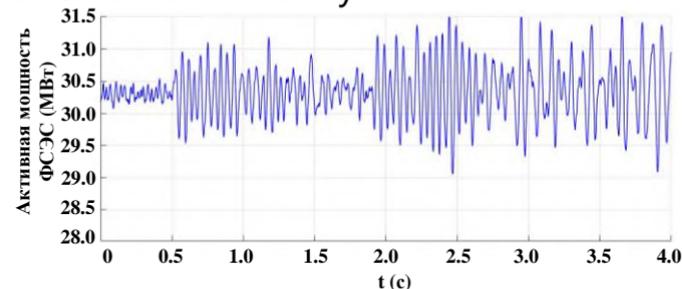
Программно-аппаратный комплекс, в котором реализуется тестовая схема ЭЭС и ФЭС с демпфирующим регулятором

Состав тестовой ЭЭС

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

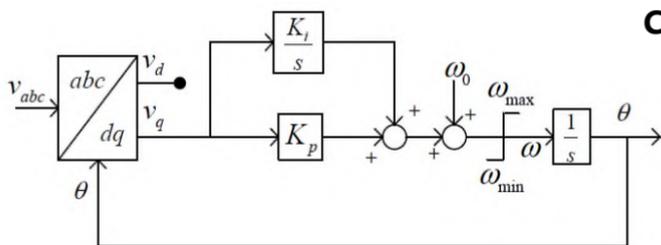
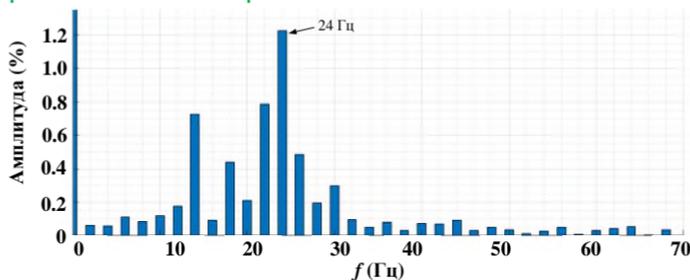
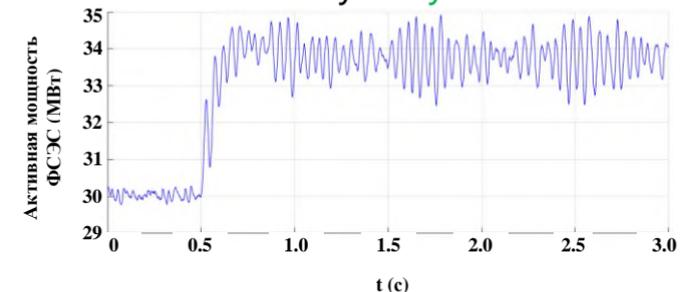
Моделирование ССК в тестовой ЭЭС

Изменение ОКЗ путём отключения ЛЭП 184-185:



Осциллограммы и гармонический спектр активной мощности ФЭС при полосе пропускания ФАПЧ 30 Гц

Изменение ОКЗ путём увеличения выдаваемой мощности ФЭС:



Структура и расчет коэффициентов блока ФАПЧ:

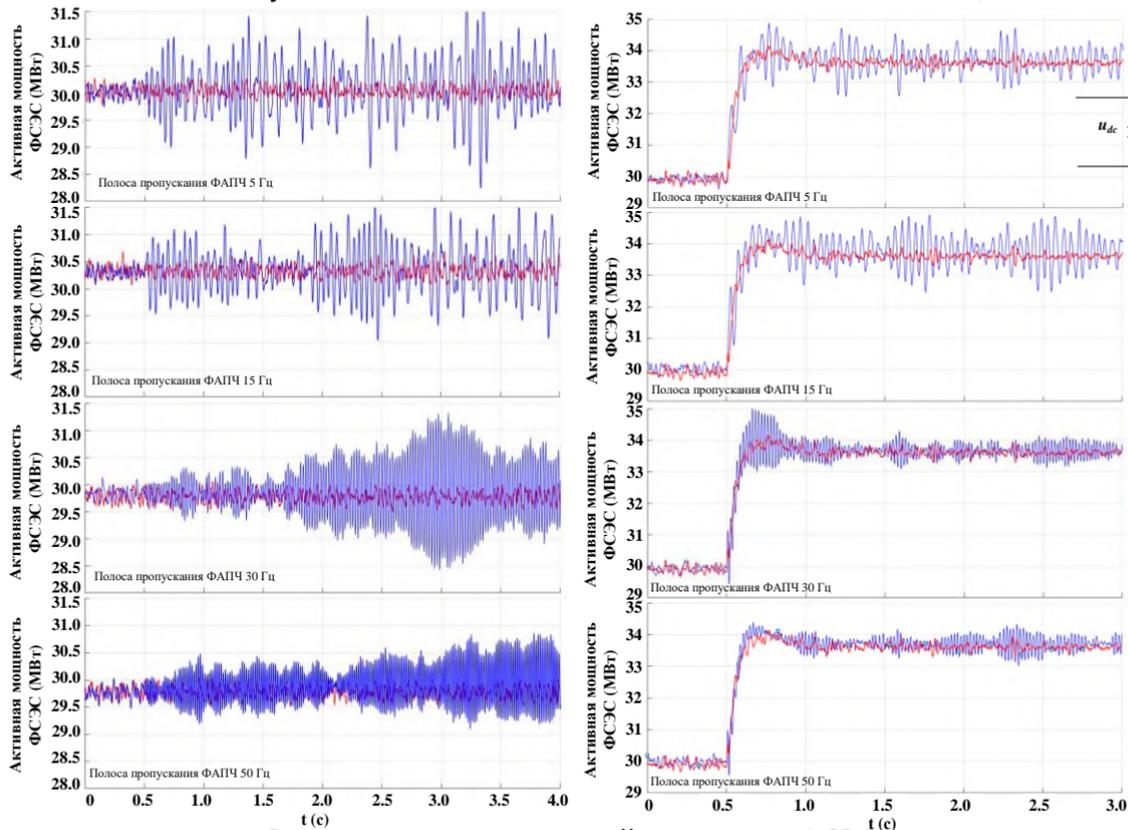
$$\omega_{III} = 2 \cdot \pi \cdot f_{III}$$

$$K_{i\text{ФАПЧ}} = \frac{\omega_{III}^2}{2 + \sqrt{5}}$$

$$K_{p\text{ФАПЧ}} = \sqrt{2 \cdot K_{i\text{ФАПЧ}}}$$

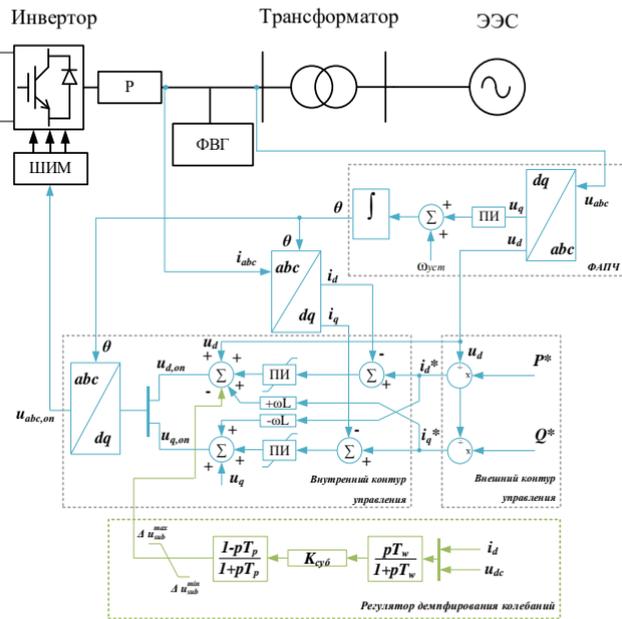
Моделирование ССК в тестовой ЭЭС

Изменение ОКЗ путём отключения ЛЭП (слева) и изменения мощности ФЭС (справа):



Оциллограммы активной мощности ФЭС

(синяя кривая – без регулятора; красная кривая – с регулятором)

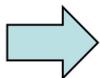


САУ СП ФЭС дополненная регулятором демпфирования колебаний

Развитие систем управления и регулирования СП

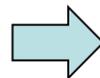
«ведомый» инвертор
(*grid-following inverter*)

подстраивается под напряжение и частоту сети и никак не участвует в регулировании режима сети



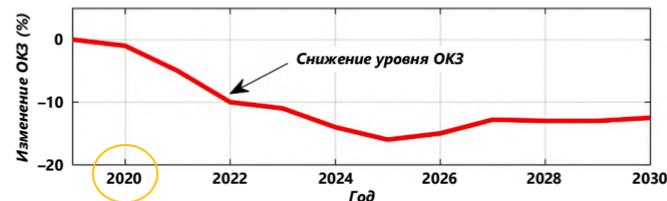
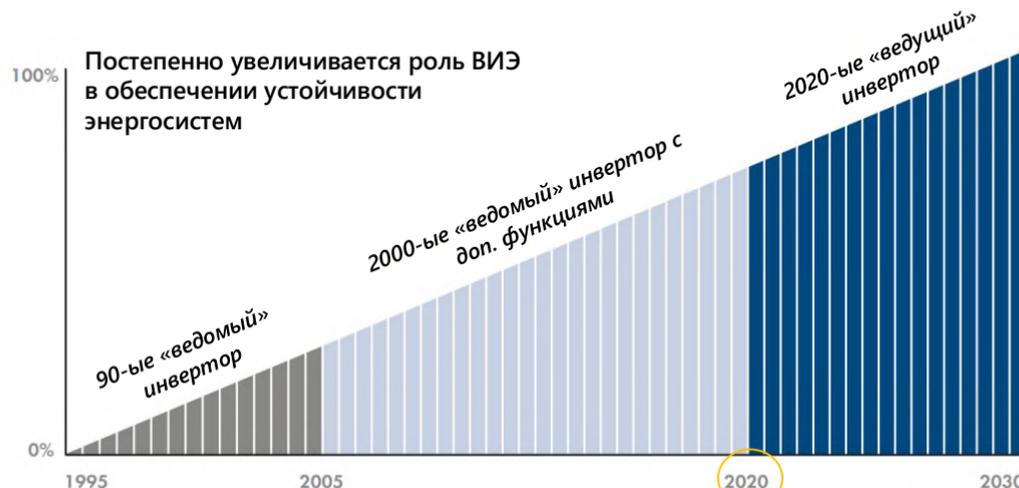
«ведомый» инвертор с доп. функциями
(*grid-supporting inverter*)

аналогично подстраивается под напряжение и частоту сети, но способен участвовать в регулировании режима сети



«ведущий» инвертор
(*grid-forming inverter*)

формирует напряжение и частоту в электрической сети с учетом обеспечения широкого перечня функций

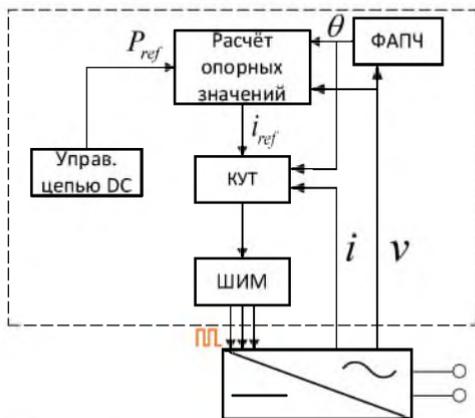


Прогноз по изменению ОКЗ в британской национальной сети*

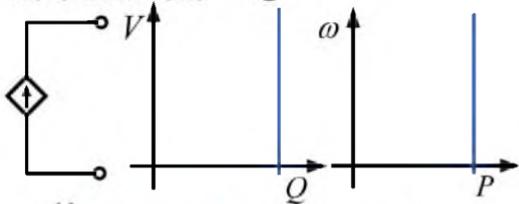
*National Grid, *Impact of declining short circuit levels*, National Grid Warwick Technology Park, Gallows Hill, Warwick, UK., 2018

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

Ведомый

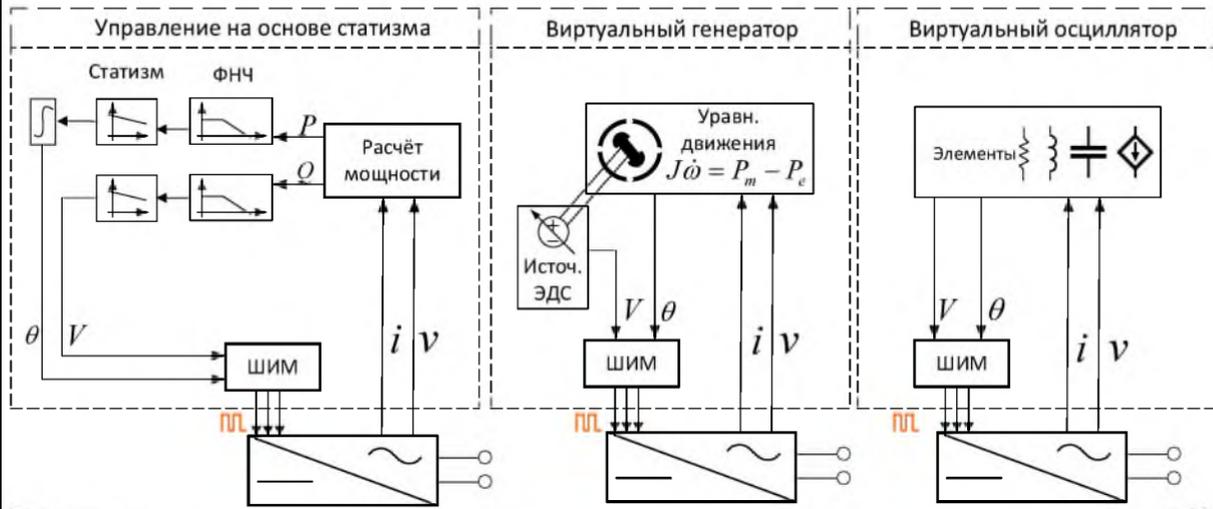


Источник тока

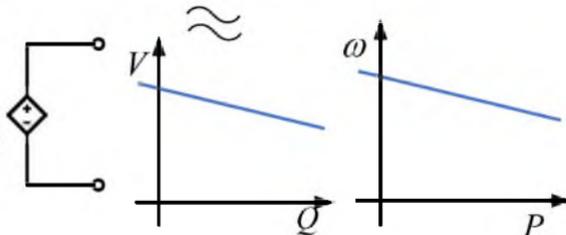


Не участвует в регулировании режима сети

Ведущий

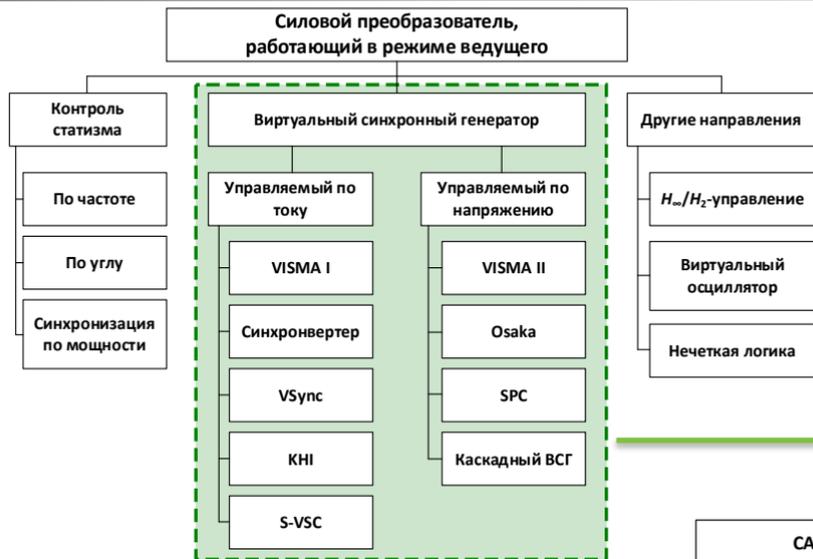


Источник напряжения

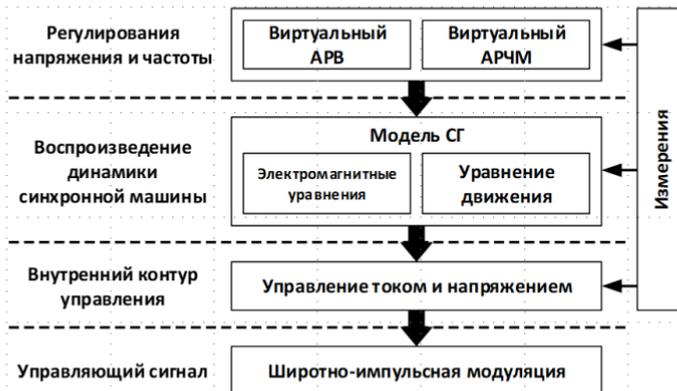


Участвует в регулировании режима сети

Концепция виртуальной синхронной машины



Обобщенная структура САУ на основе ВСГ



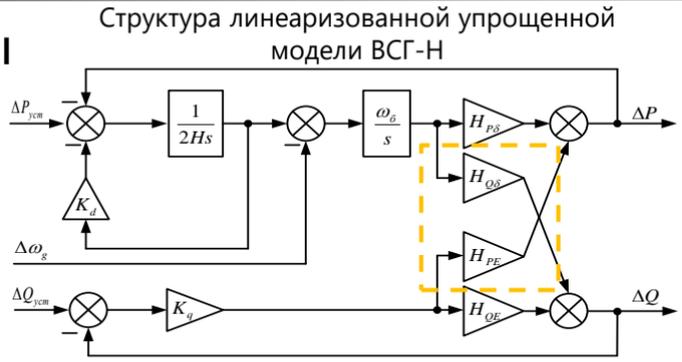
Анализ полученных результатов исследований

Модели ВСГ, управляемые по напряжению, ВСГ-Н (ВСГ120, ВСГ220 и ВСГ221), 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 **ВСГ220**, но ей присуща фундаментальная проблема взаимовлияния мощностей.

Проверяемое свойство	ВСГ110	ВСГ210	ВСГ120	ВСГ130	ВСГ220	ВСГ221	ВСГ230	ВСГ231
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	*	*	+	+	+	+/-	-	-

Принципиальная проблема ВСГ-Н



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

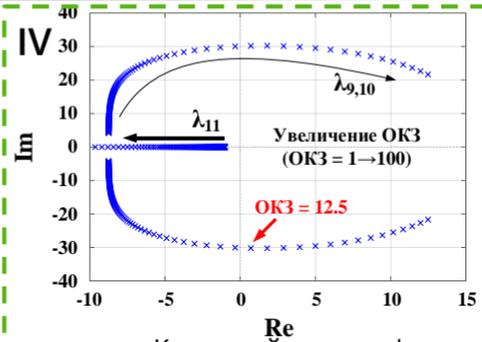
$$H_{dP/d\delta} = \frac{E_0 \cdot R \cdot U \cdot \sin \delta_0 - 2 \cdot E_0 \cdot R_v \cdot U \cdot \sin \delta_0 + E_0 \cdot U \cdot X \cdot \cos \delta_0}{R^2 + X^2}$$

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

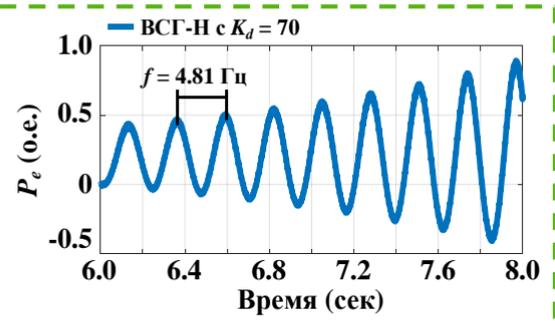
$$H_{dP/dE} = \frac{2 \cdot E_0 \cdot R - 2 \cdot E_0 \cdot R_v - R \cdot U \cdot \cos \delta_0 + 2 \cdot R_v \cdot U \cdot \cos \delta_0 + U \cdot X \cdot \sin \delta_0}{R^2 + X^2}$$

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

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



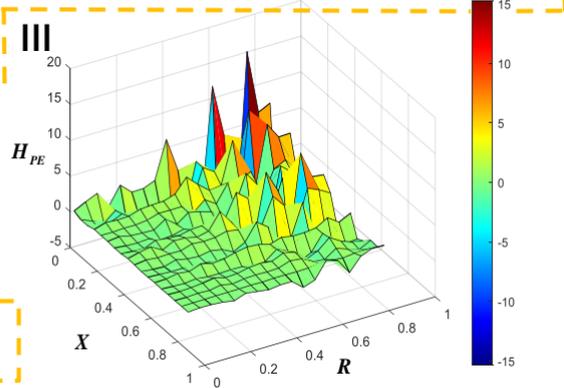
Корневой годограф линейризованной детальной модели ВСГ-Н в пространстве состояний



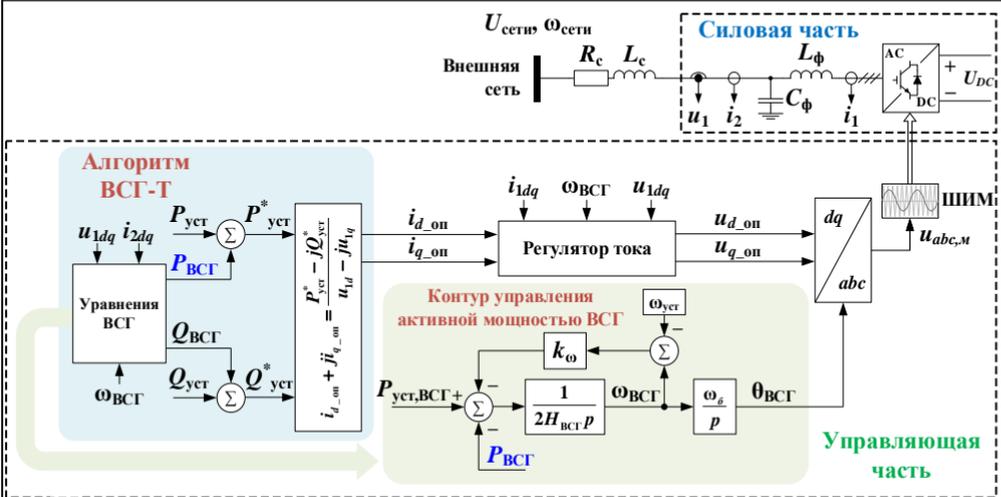
V

$$\begin{cases} \frac{d\Delta\omega_{BCR}}{dt} = \frac{1}{2H} [P_{уст,BCR} - (P_0 - H_{dP/d\delta}\Delta\delta) - H_{dP/dE}\Delta E + K_d\Delta\omega_{BCR}] \\ \frac{d\Delta\delta_{BCR}}{dt} = \Delta\omega_{BCR}\omega_0 \end{cases}$$

Величина взаимовлияния мощностей при изменении отношения сопротивлений R/X сети



Разработанный алгоритм управления ВСГ-Т

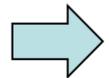


Уравнения ВСГ-Т:

$$\begin{cases} \frac{d\psi_d}{dt} = \omega_\delta (u_{od} + R_b i_{d,BCG} + \omega_{BCG} \psi_q) & \frac{d\psi_{1q}}{dt} = \omega_\delta \left(-R_{1q} i_{q,BCG} - \frac{R_{1q}}{L_{1q}} \psi_{1q} \right) \\ \frac{d\psi_q}{dt} = \omega_\delta (u_{oq} + R_b i_{q,BCG} - \omega_{BCG} \psi_d) & \frac{d\psi_{fd}}{dt} = K_u \left(\frac{Q_{уст,BCG} - Q_{BCG}}{U_1} \right) \end{cases}$$

$$\begin{cases} i_{d,BCG} = \frac{\psi_{fd} - \psi_d}{L_b} \\ i_{q,BCG} = \frac{\psi_{1q} - \psi_q}{L_b} \end{cases}$$

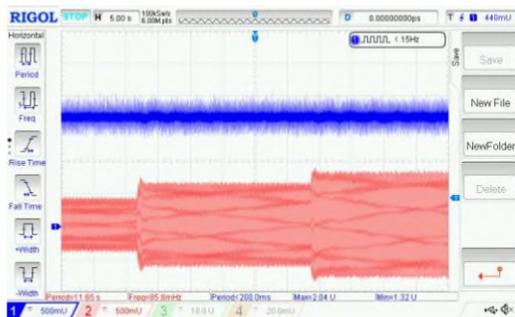
Формирование опорных сигналов



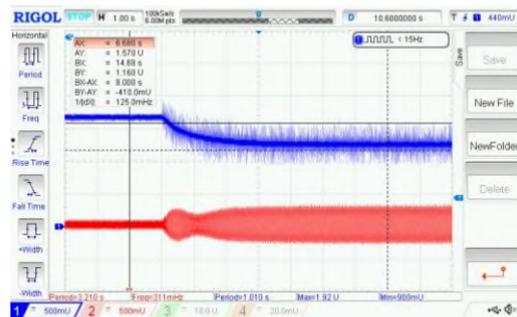
$$\begin{cases} P_{BCG} = u_{od} i_{d,BCG} + u_{oq} i_{q,BCG} \\ Q_{BCG} = u_{oq} i_{d,BCG} - u_{od} i_{q,BCG} \end{cases}$$

- ✓ Формирование напряжения и частоты сети
- ✓ Регулирование напряжения
- ✓ Регулирование частоты
- ✓ Демпфирование колебаний
- ✓ Формирование быстрого частотного отклика
- ✓ Обеспечение инерционного отклика
- ✓ Формирование тока короткого замыкания
- ✓ Подавление гармоник
- ✓ Обеспечение функций LVRT и HVRT
- ✓ Возможность работы параллельно с сетью и в изолированном режиме

Экспериментальный образец трёхуровневого СП 6 кВт (=660/~380)

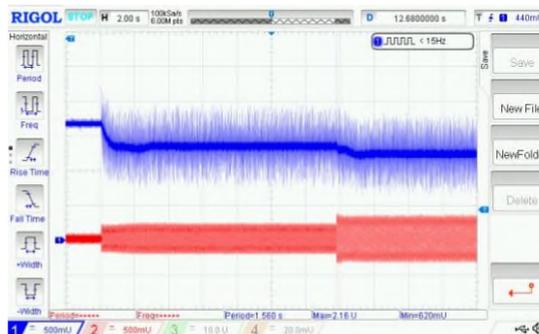
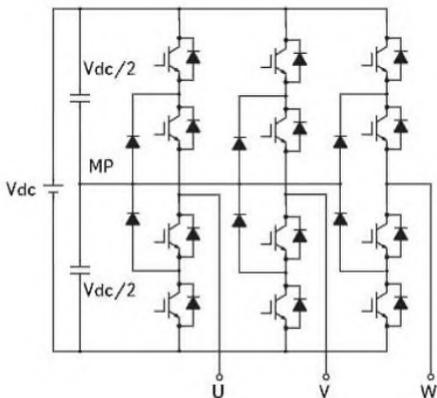


Изменение уставки по активной мощности

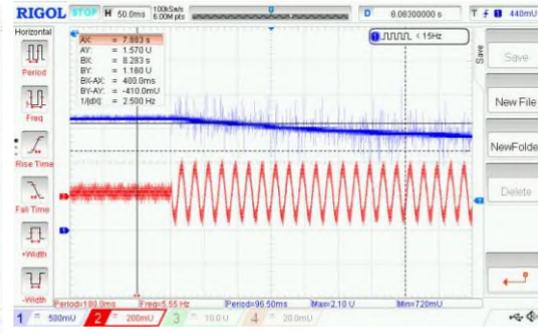


Переход в изолированный режим

Топология макета СП



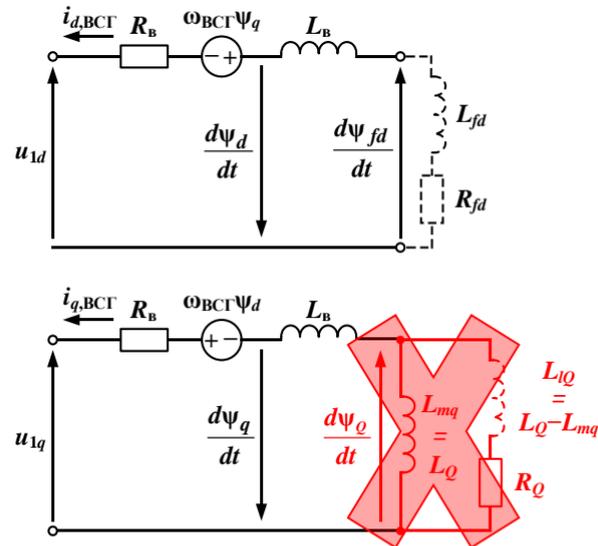
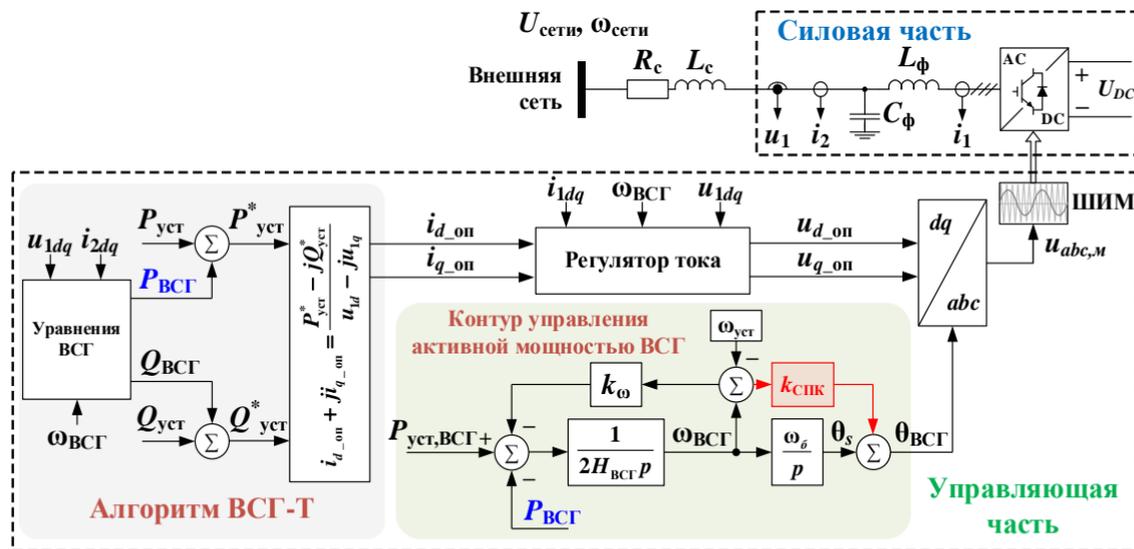
Изменение частоты сети



Переход в изолированный режим (увеличенный масштаб)

Предлагаемая модификация структуры ВСГ-Т

Предлагается использование метода согласно-параллельной коррекции для улучшения демпфирующих свойств ВСГ-Т. Данный согласно-параллельный регулятор является пропорциональным (безинерционным) звеном, которое добавляется в контур управления активной мощностью ВСГ параллельно другим звеньям.



Уравнения ВСГ:

$$i_{q, \text{ВСГ}} = -\frac{\Psi_q}{L_B} \quad \Rightarrow \quad \frac{d\omega_{\text{ВСГ}}}{dt} = \frac{1}{2H_{\text{ВСГ}}} \left[P_{\text{уст, ВСГ}} - P_{\text{ВСГ}} - k_{\omega} (\omega_{\text{ВСГ}} - 1) \right] \quad \Rightarrow$$

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_0 \omega_{\text{ВСГ}}$$

$$\theta_{\text{ВСГ}} = \theta_s + k_{\text{СПК}} (\omega_{\text{ВСГ}} - 1)$$

Предлагаемая модификация структуры ВСГ-Т

Исходная структура ВСГ-Т

Модифицированная структура ВСГ-Т

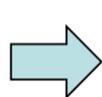
Настраиваемые параметры	Обеспечиваемые функции	Настраиваемые параметры
R_B, L_B	Запасы устойчивости, формирование уравнений электрической машины	R_B, L_B
$H_{ВСГ}, k_\omega$	Инерционный отклик, регулирование частоты	$H_{ВСГ}, k_\omega$
R_{1q}, L_{1q}	Демпфирование низкочастотных колебаний, обеспечение устойчивости функционирования	$k_{СПК}$

Передаточная функция для модифицированной структуры ВСГ-Т:

$$G_{P/P_СПК}(p) = \frac{\Delta P_{\text{вых}}}{\Delta P_{\text{уст}}} = \frac{2H_{ВСГ}L_B p^2 + (L_B k_\omega + U_0 X_{C\phi L_C} k_{СПК})p + U_0 \omega_0 X_{C\phi L_C}}{2H_{ВСГ}(L_B + X_{C\phi L_C} L_C) p^2 + (L_B k_\omega + X_{C\phi L_C} L_C k_\omega + U_0 X_{C\phi L_C} k_{СПК})p + U_0 \omega_0 X_{C\phi L_C}}$$

Модифицированная структура ВСГ-Т

– система второго порядка



$$\omega_n = \sqrt{\frac{U_0 \omega_0 X_{C\phi L_C}}{2H_{ВСГ}(L_B + L_C X_{C\phi L_C})}}$$

$$\zeta = \frac{L_B k_\omega + L_C X_{C\phi L_C} k_\omega + k_{СПК} U_0 X_{C\phi L_C}}{2\sqrt{2H_{ВСГ} U_0 \omega_0 X_{C\phi L_C}} \cdot (L_B + L_C X_{C\phi L_C})}$$

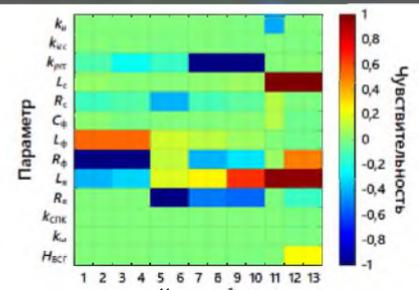
Анализ коэффициентов участия и чувствительности

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

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

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial k_{СПК}} = \frac{\mathbf{v}_i^T \frac{\partial \mathbf{A}(k_{СПК})}{\partial k_{СПК}} \mathbf{u}_i}{\mathbf{v}_i^T \mathbf{u}_i}$$

коэф. ЧУВСТВИ-ТИ $p_{ki} = \frac{\partial \lambda_i}{\partial a_{kk}}$ коэф. УЧАСТИЯ



Коэф. чувствительности λ_i к $k_{СПК}$

Мод а	Собственные числа	ω_w Гц	Коэффициент демпфирования ζ	Коэффициент чувствительности и λ к $k_{СПК}$	Основные связанные переменные состояния
λ_1	$-19,5 + j4354,9$	693	0,00448	$-0,013 - j0,003$	$\Delta u_{od}, \Delta u_{oq}, \Delta i_{cvd}, \Delta i_{cvq}, \Delta \gamma_{qr}, \Delta i_{od}, \Delta i_{oq}, \Delta \psi_q$
λ_2	$-19,5 - j4354,9$			$-0,013 + j0,003$	
λ_3	$-31,3 + j3884,2$	618	0,00805	$0,012 - j0,003$	$\Delta u_{od}, \Delta u_{oq}, \Delta i_{cvd}, \Delta \gamma_{qr}, \Delta i_{od}$
λ_4	$-31,3 - j3884,2$			$0,012 + j0,003$	
λ_5	$-43,5 + j402,1$	64,4	0,107	$0,328 + j0,394$	$\Delta \gamma_{qr}, \Delta i_{od}, \Delta \psi_{di}, \Delta \omega_{BCF}$
λ_6	$-43,5 - j402,1$			$0,328 - j0,394$	
λ_7	$-165 + j353,1$	62	0,423	$-0,165 - j0,363$	$\Delta \gamma_{dr}, \Delta \gamma_{qr}, \Delta \psi_{dr}, \Delta \psi_{qr}, \Delta \psi_{fd}, \Delta i_{oq}, \Delta \omega_{BCF}$
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}	$-10,6 - j10,6$			$-0,321 + j1,037$	

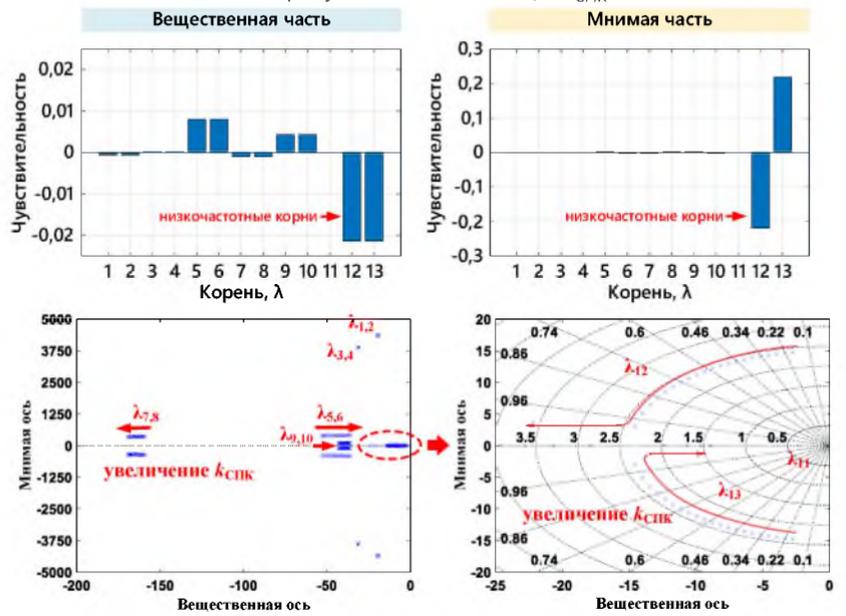
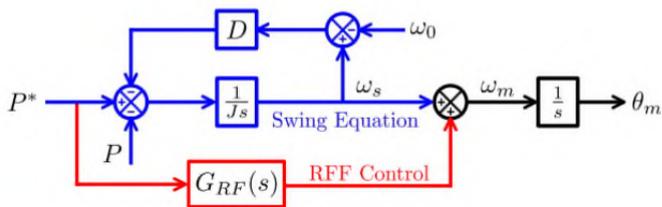
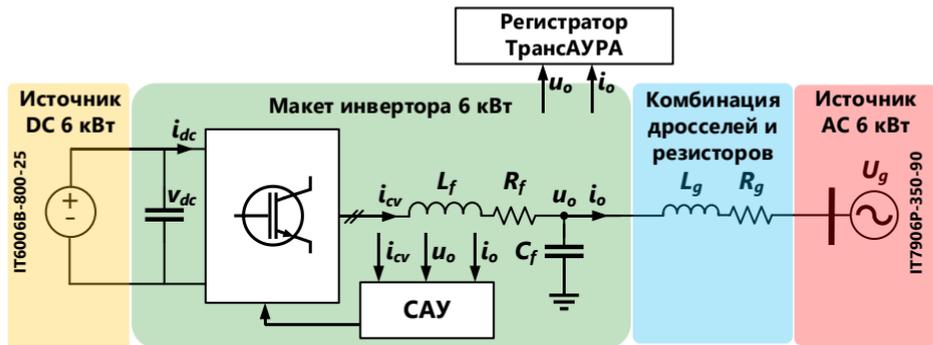
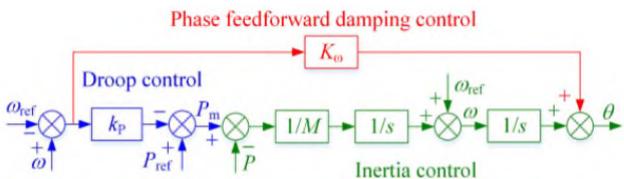


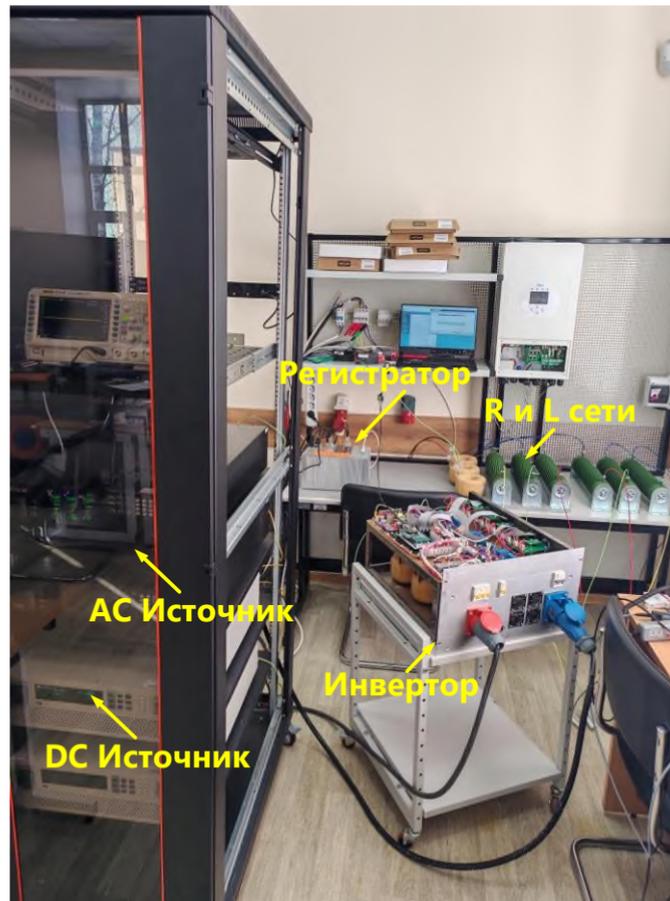
Схема тестирования модифицированного алгоритма



ВСГ-Н с согласно-параллельным регулятором по уставке по активной мощности (ВСГ-Н с СПМ)*



ВСГ-Н с согласно-параллельным регулятором по углу (ВСГ-Н с СПУ)**

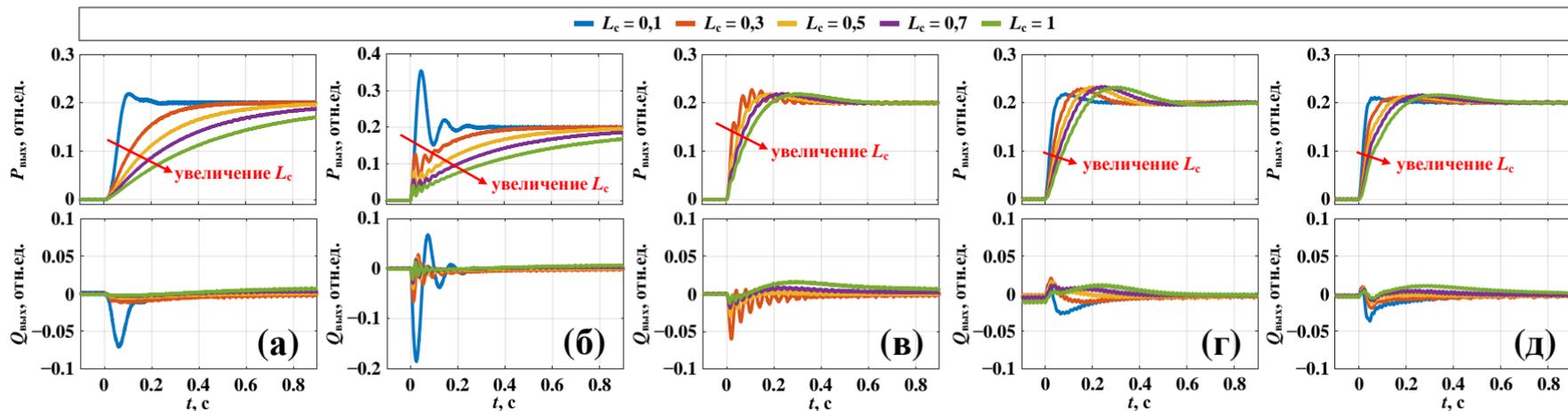


*doi: 10.1109/TPEL.2022.3152358

**doi: 10.1109/TPEL.2022.3150950

Сравнения динамических откликов различных структур ВСГ

Динамические отклики инвертора при изменении уставки по мощности и разных сопротивлениях сети



(а) настроенная структура ВСГ-Н

(б) ВСГ-Н с СПМ

(в) ВСГ-Н с СПУ

(г) исходный ВСГ-Т

(д) **ВСГ-Т с СПК**

- с увеличением L_c также увеличивается время набора мощности
- в условиях сильной сети возникает проблема взаимовлияния активной и реактивной мощности

- не обеспечивается устойчивость в условиях сильной сети без доп. настройки

- уменьшение перерегулирования
- сохранение быстрого отклика по мощности

Сравнения динамических откликов различных структур ВСГ

Качественное сравнение характеристик рассмотренных структур ВСГ:

Характеристики Структура ВСГ	Степень свободы	Порядок $G_{P/P}(p) = \frac{\Delta P_{\text{вых}}}{\Delta P_{\text{уст}}}$	Увеличение взаимовлияния мощностей в условиях сильной сети	Медленный отклик по активной мощности в условиях слабой сети	Влияние ζ на стабильность регулируемого по частоте	Влияние ζ на скорость изменения частоты
ВСГ-Н	0	2	Да	Да	Да	Несущественное
ВСГ-Н с СПМ	2 и выше	3 и выше	Да	Да	Да	Нет
ВСГ-Н с СПУ	1	2	–	Нет	Нет	Нет
Исходный ВСГ-Т	2	3	Нет	Нет	Нет	Несущественное
ВСГ-Т с ОС	2	3	Нет	Нет	Нет	Да, негативное
ВСГ-Т с СПК	1	2	Нет	Нет	Нет	Нет

Заключение и перспективы исследований

- **Доказано**, что механизмы возникновения нового вида ССК достаточно разнообразны. В итоге усложняются мероприятия по борьбе с ними, поскольку необходимо согласовывать настройку регуляторов между собой исходя из условий внешней сети.
- **Продемонстрировано**, что одна и та же настройка САУ СП может не подходить для разных схемно-режимных ситуаций в сети.
- **Обозначено**, что перспективным направлением предотвращения ССК является использование модернизированных алгоритмов управления СП.

Перспективные направления исследований и применения новых алгоритмов управления СП:

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.

Для разных источников:

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

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.



Механизмы возникновения и способы демпфирования субсинхронных колебаний в энергосистемах с силовыми инверторными преобразователями

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

Контакты:

СУВОРОВ АЛЕКСЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ,

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

Организация: Томский политехнический университет

e-mail: suvorovaa@tpu.ru

тел: 8-3822-701-777 (доб.1987)