



ТОМСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ



ИНЖЕНЕРНАЯ  
ШКОЛА  
ЭНЕРГЕТИКИ

# ПРИЧИНЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ СУБСИНХРОННЫХ КОЛЕБАНИЙ В СОВРЕМЕННЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Докладчик:

**СУВОРОВ АЛЕКСЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ,**

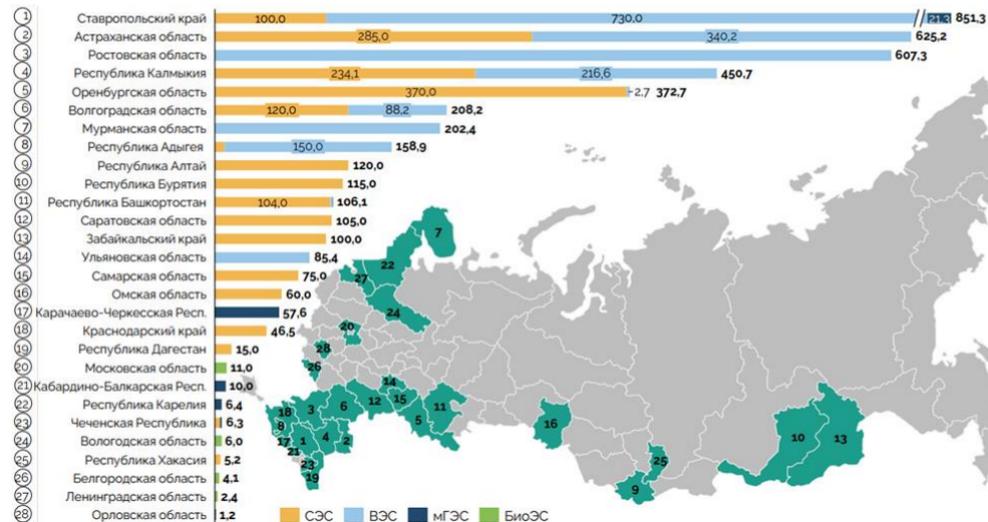
к.т.н., доцент, доцент ОЭЭ ИШЭ, НИЛ «Моделирование ЭЭС»

Организация: Томский политехнический университет

26.11.2026

# Введение

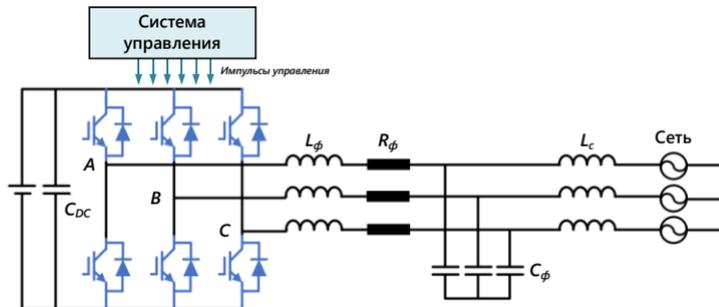
**Региональное распределение введенных объектов ВИЭ в РФ, функционирующих в рамках мер стимулирования, по итогам IV квартала 2023 года, МВт\***



*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\*\***



# 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)\*:

$$OKZ = \frac{S_{\min}}{S_{ВИЭ}} \approx \frac{S_{\min}}{P_{ВИЭ}} \approx \frac{X_{сети}}{R_{сети}} \approx \frac{1}{X_{сети}},$$

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

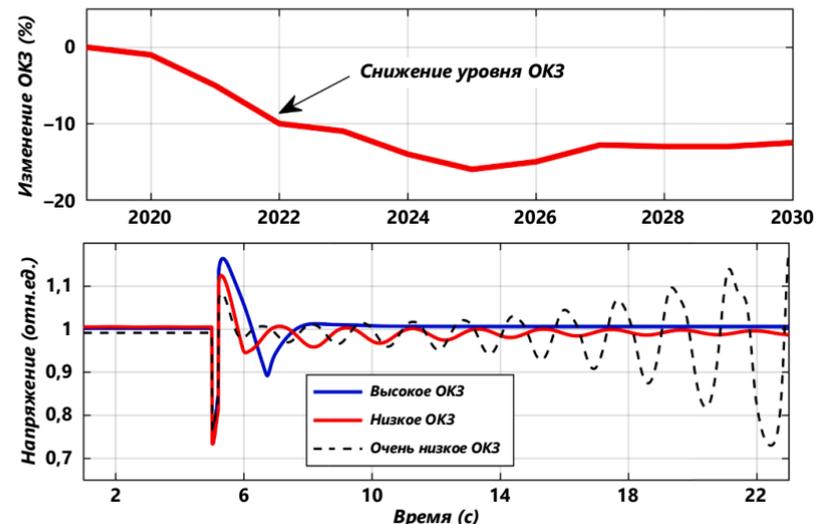


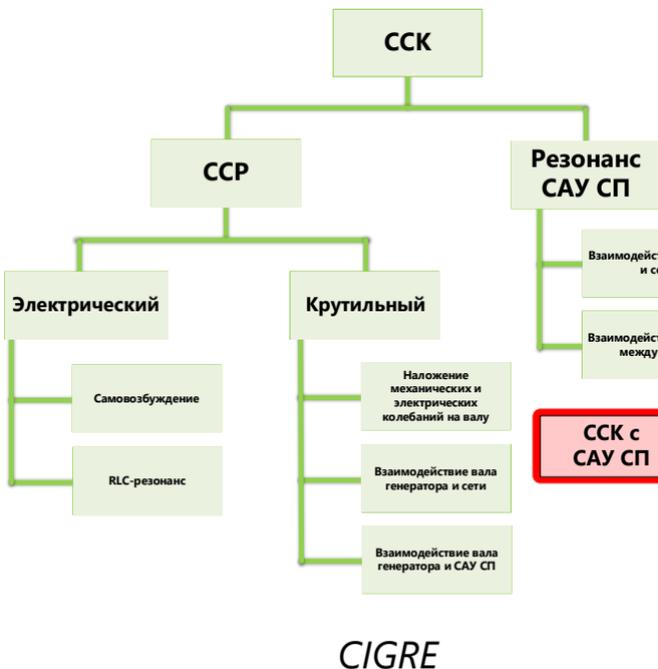
Рис. 1 – Прогноз по изменению ОКЗ в британской национальной сети\*\*



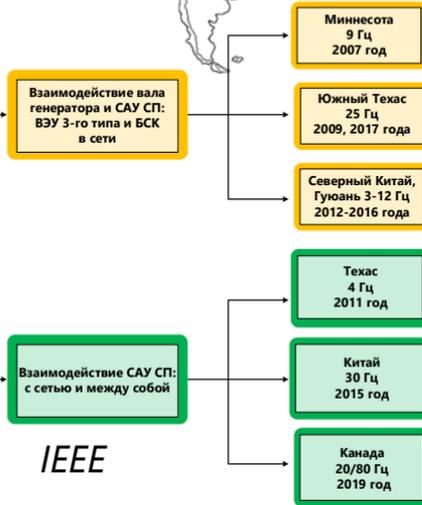
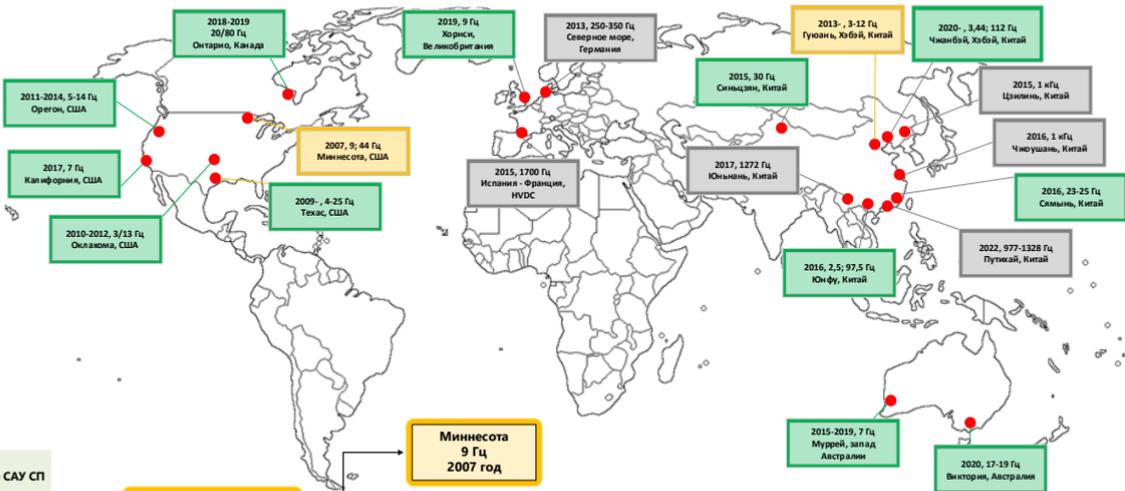
Рис. 2 – Временной масштаб работы регуляторов в САУ СП

# Трансформация ЭЭС. Последствия

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



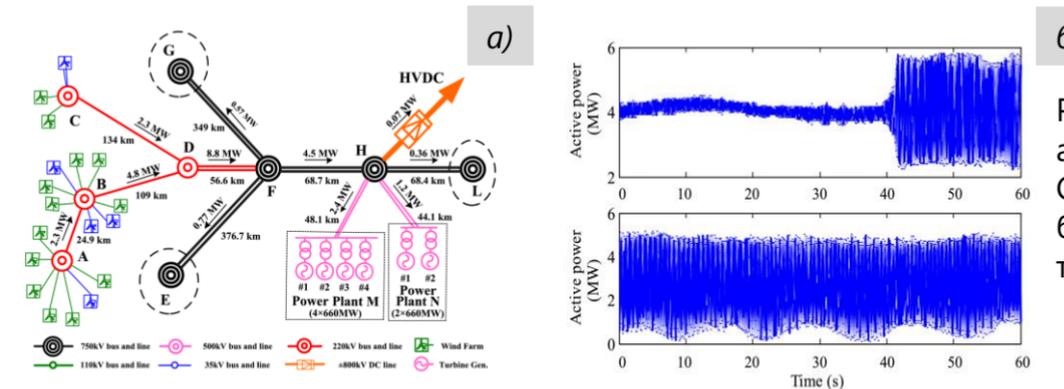
CIGRE



IEEE

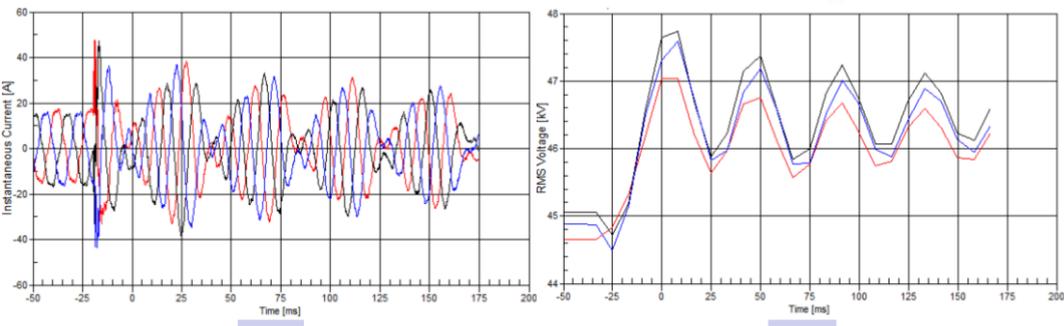
До настоящего времени уже зафиксировано более 20 случаев с ССК из-за САУ СП, получивших официальное подтверждение и освещение в научной периодике, которые наблюдались в энергосистемах разных стран с 2007 года.

# 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\*\*

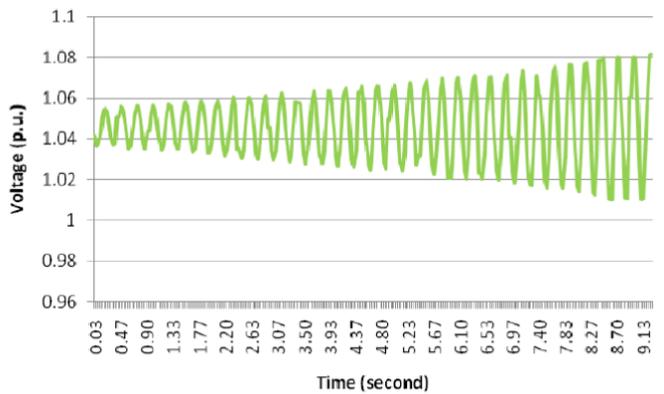


Рис. 3 – Осциллограммы напряжения в энергосистеме ERCOT (Техас, США) в случае незатухающих колебаний при увеличении уровня генерации за счёт ВИЭ\*\*\*

\*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

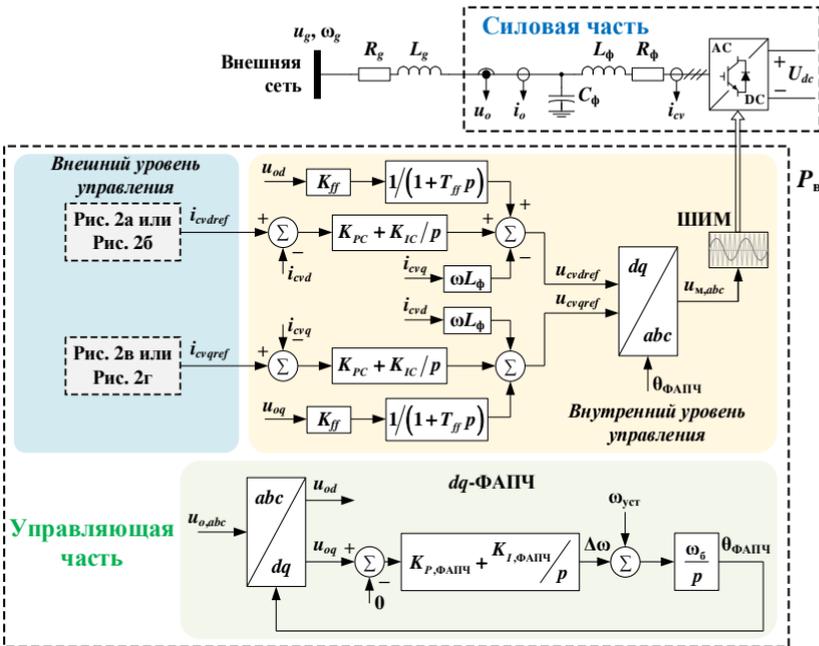


Рис. 1 – Обобщенная структура рассматриваемой электрической сети с сетевым инвертором, работающим в режиме ведомого сетью

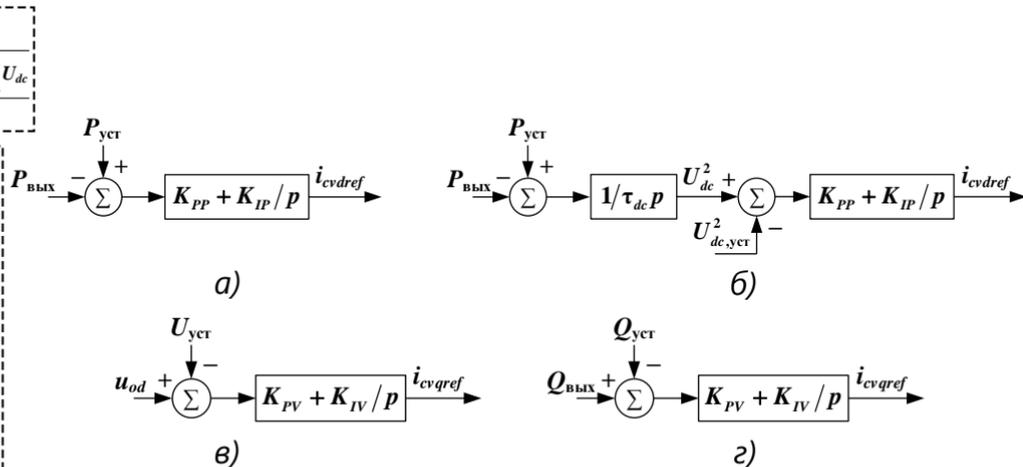
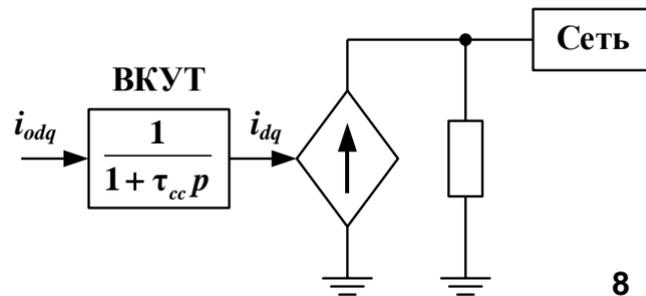


Рис. 2 – Структуры внешних контуров управления:  
 а) и в) P-U управление; а) и г) P-Q управление;  
 б) и в) DVC-U управление; б) и г) DVC-Q управление

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):

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

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

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

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

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

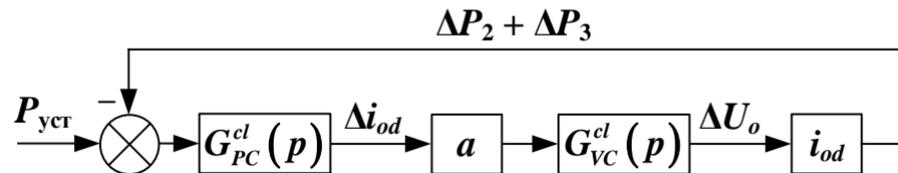
$$G^{ol}(p) = \left( K_p + \frac{K_I}{p} \right) \left( \frac{1}{1 + \tau_{cc} p} \right) \quad (3)$$

**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):

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



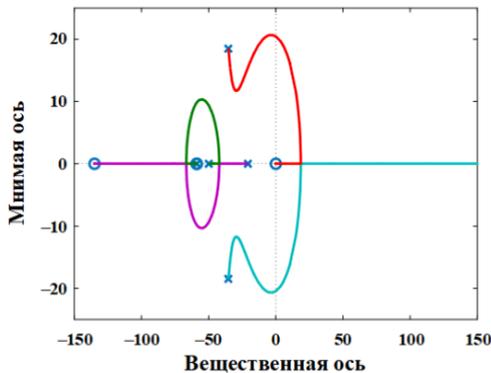
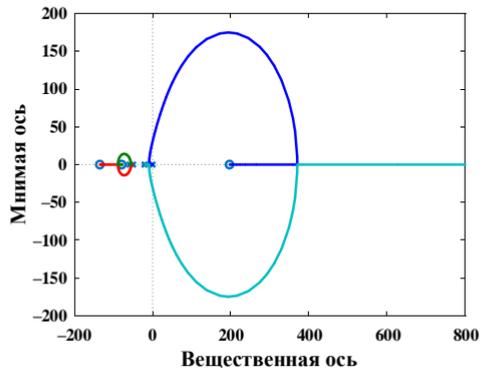
Структурная схема замкнутой передаточной функции для СП, отражающей взаимовлияние регуляторов активной мощности и напряжения

# Упрощенная модель СП с регулятором активной мощности

Коэффициенты усиления для разомкнутых функций, отражающих влияние изменения уставки по активной мощности на отклонения тока по оси  $d$   $\Delta i_{od}$  ( $\Delta P_1$ ) и напряжения  $\Delta u_{od}$  ( $\Delta P_2 + \Delta P_3$ ):

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

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

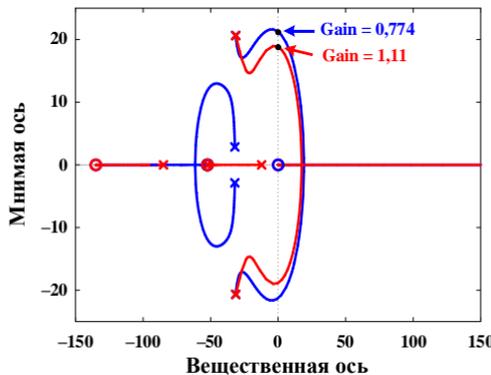
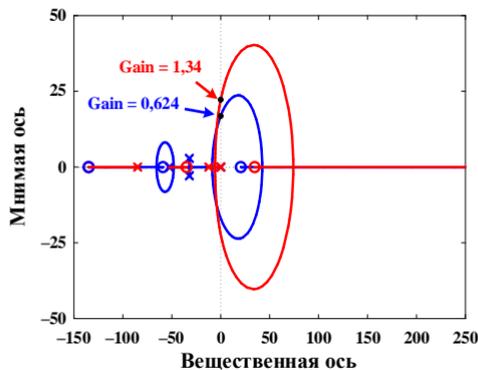


Корневые годографы при  $X_g = 0,8$ ;  $K_{PV} = 0,25$  для разомкнутых функций

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 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  $\delta_o$  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:

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

$\Delta P_2 + \Delta P_3$

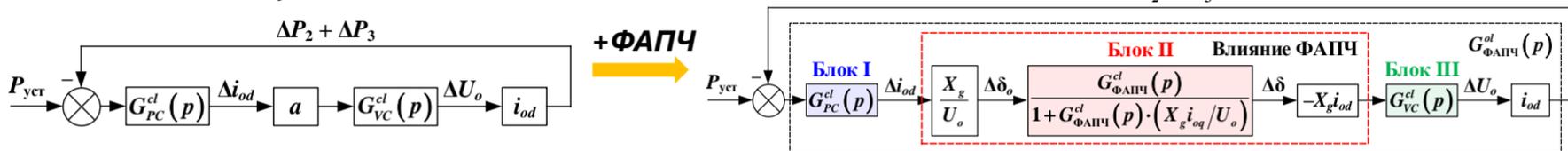


Рис. 1 – Структурная схема замкнутой передаточной функции для СП, отражающей влияние ФАПЧ

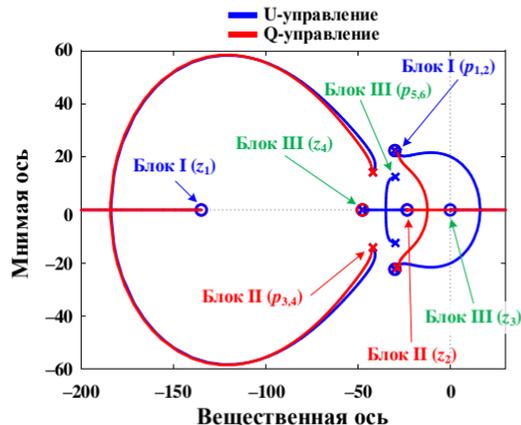
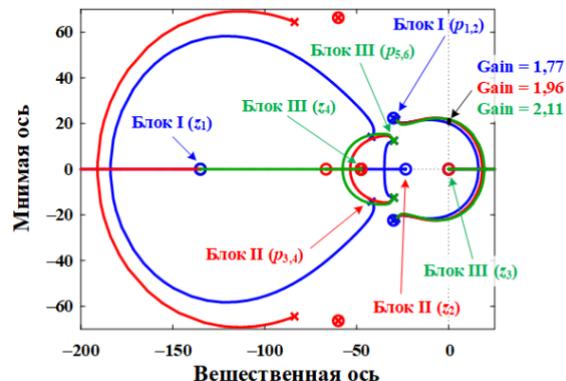


Рис. 2 – Корневые годографы:

- 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  $q$

# Верификация механизмов ССК с помощью детальной модели

Модель в пространстве состояний:

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

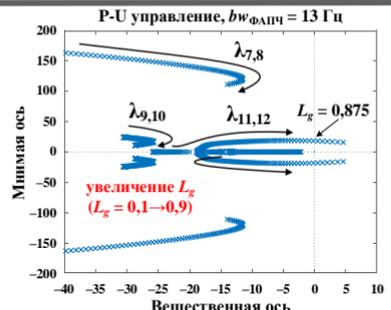
$$\Delta \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \Delta u_{od} & \Delta u_{oq} & \Delta i_{cvd} & \Delta i_{cvq} & \Delta \gamma_d & \Delta \gamma_q & \Delta i_{od} & \Delta i_{oq} & \dots \\ & & \Delta \varepsilon_{\text{ФАПЧ}} & \Delta \xi_d & \Delta \xi_q & \Delta \theta_{\text{ФАПЧ}} & \Delta u_{cd} & \Delta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

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

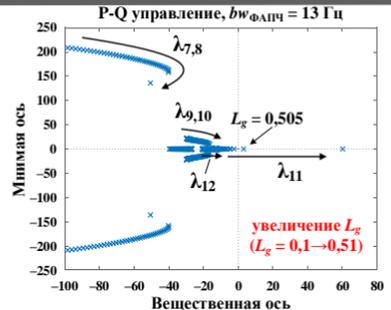
Анализ коэффициентов участия для случая P-U управления СП:

Элемент системы	Переменные состояния	P-U управление								
		$\lambda_{1,2}$	$\lambda_{3,4}$	$\lambda_{5,6}$	$\lambda_{7,8}$	$\lambda_{9,10}$	$\lambda_{11}$	$\lambda_{12}$	$\lambda_{13}$	$\lambda_{14}$
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	$\xi_d$	0	0	0,004	0,022	0,047	<b>0,513</b>	0,049	0,108	0,038
	$\xi_q$	0	0	0,001	0,011	0,008	0,03	<b>0,866</b>	0	0,084
ВКУТ	$\gamma_d$	0	0	0,003	0,014	0,01	0,107	0,001	0,83	0,023
	$\gamma_q$	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	<b>0,455</b>	0,085	0,008	0,001	0,013
	$\theta_{\text{ФАПЧ}}$	0,001	0,002	0,014	0,059	<b>0,411</b>	0,001	0,005	0	0,004
Контур СПК по $u_{odq}$	$u_{cd}$	0,04	0,044	0,15	<b>0,211</b>	0,014	0,019	0,002	0,009	0,015
	$u_{cq}$	0,033	0,052	0,139	<b>0,204</b>	0,022	0,04	0	0	0,015

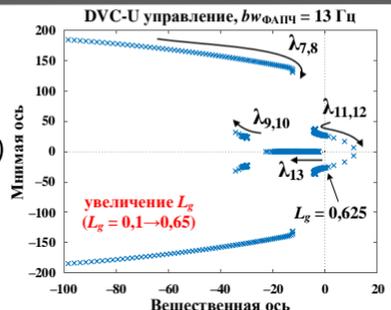
# Анализ собственных чисел аналитической модели СП



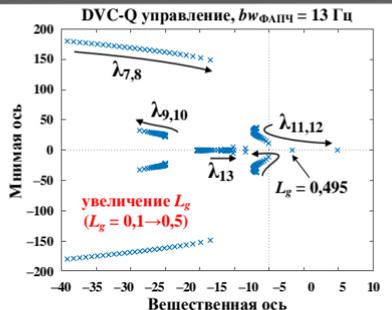
1a)



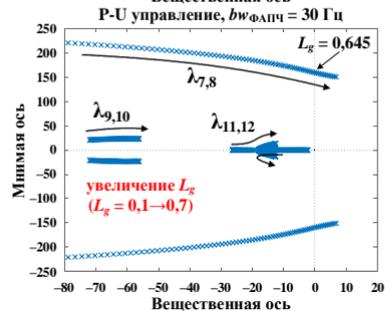
2a)



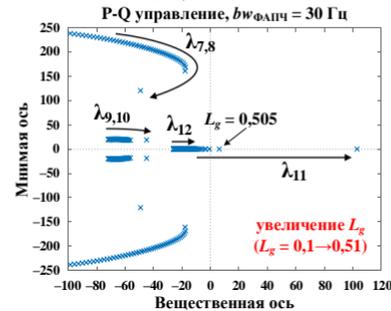
3a)



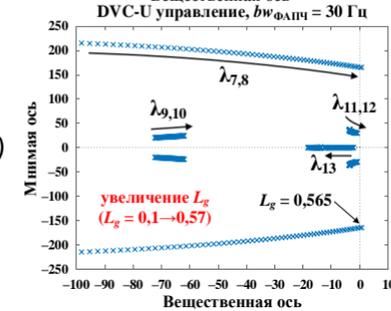
4a)



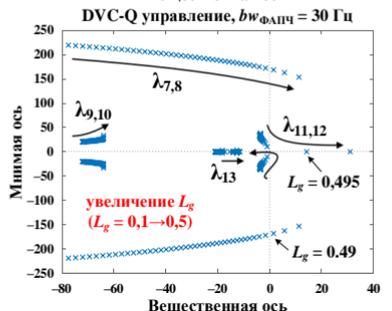
1б)



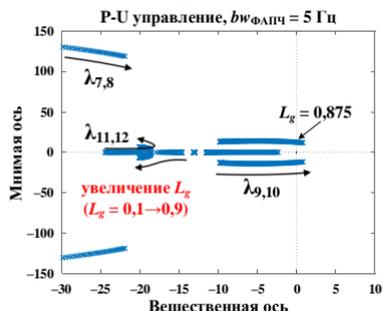
2б)



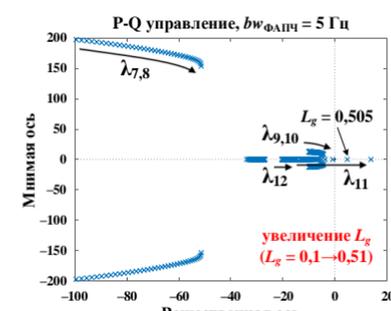
3б)



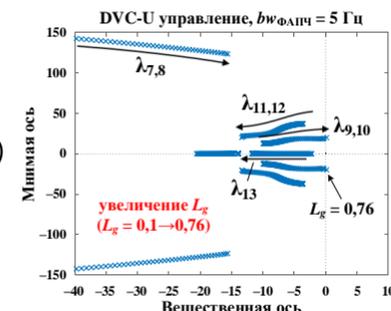
4б)



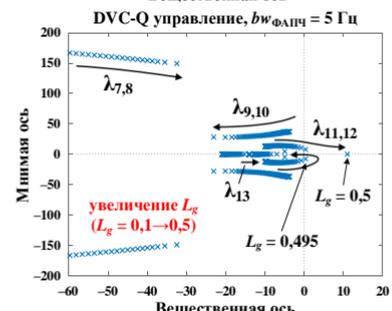
1в)



2в)

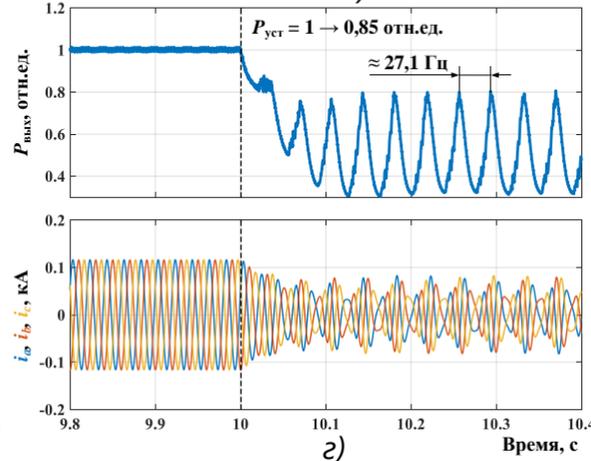
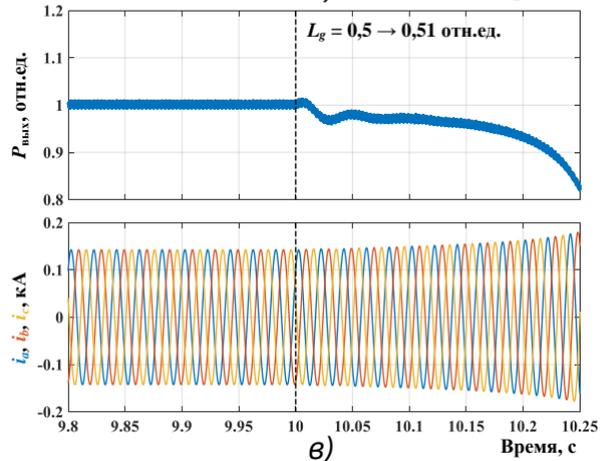
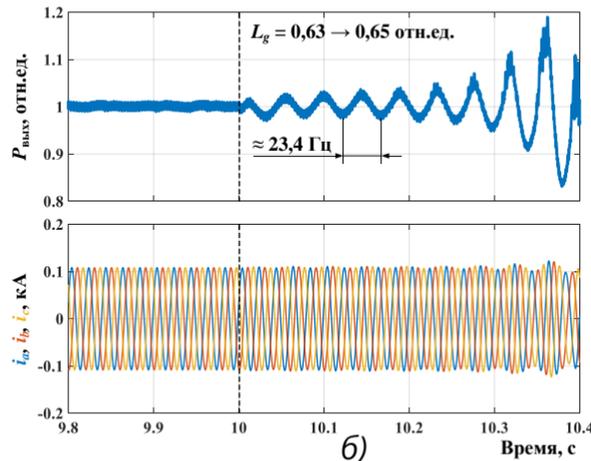
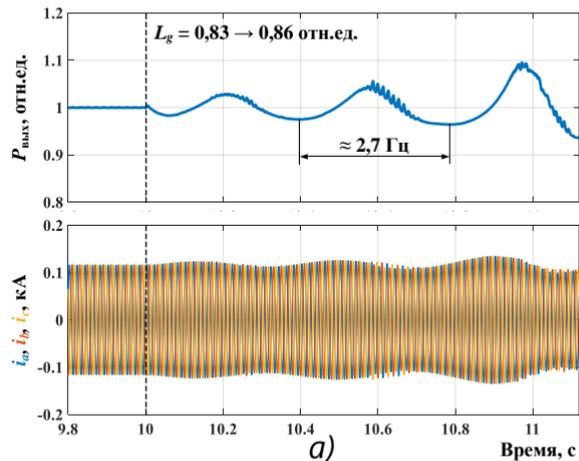


3в)



4в)

# Моделирование во временной области



Осциллограммы процессов моделирования во временной области при увеличении  $L_g$ :

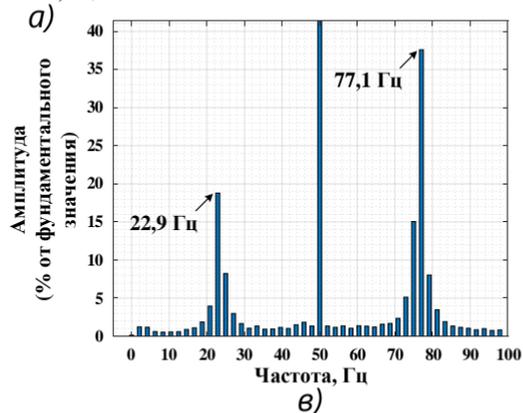
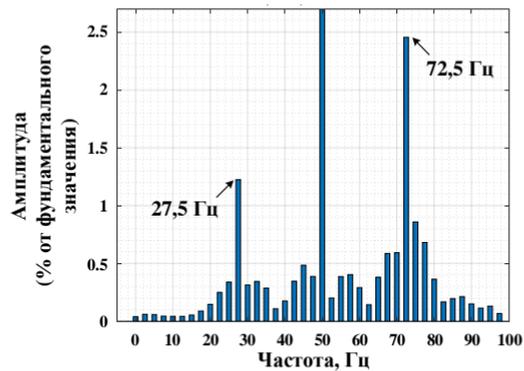
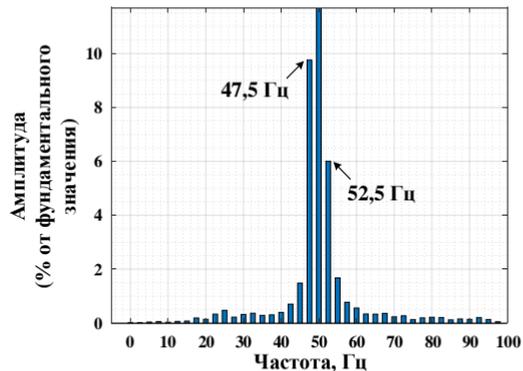
а)  $P$ - $U$  управление с  $bw_{\text{ФАПЧ}} = 13 \text{ Гц}$ ;

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

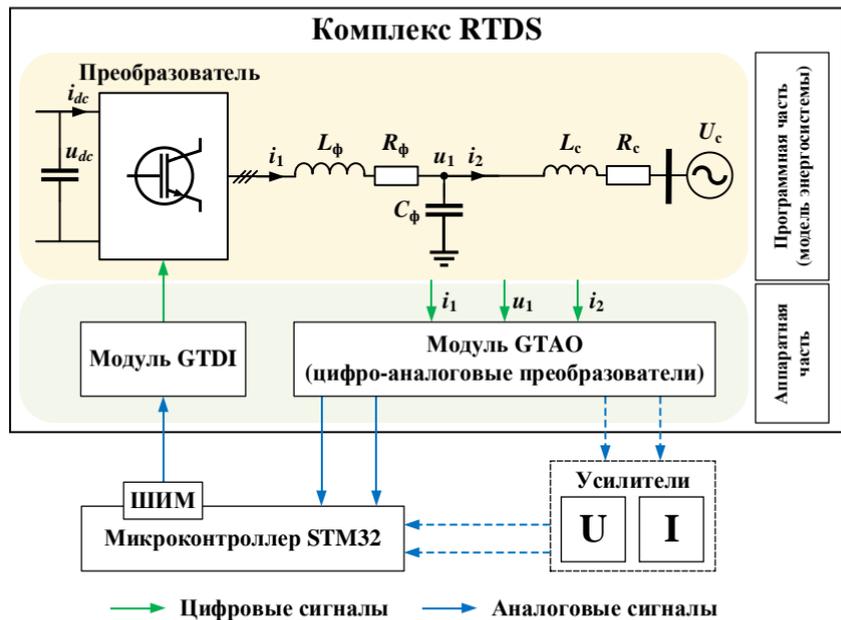
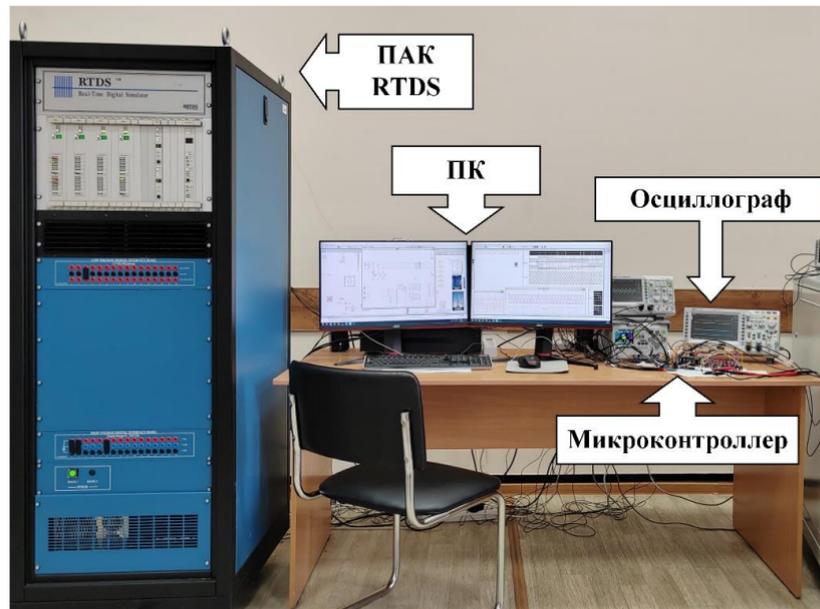


Схема тестирования в замкнутом цикле



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:

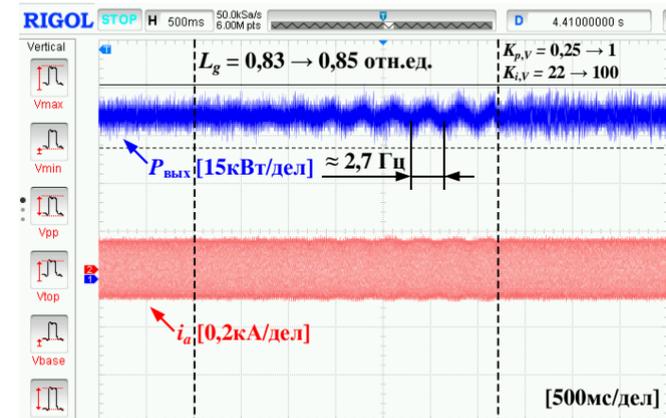


Рис. 1 – При  $bw_{\text{ФАПЧ}} = 13$  Гц и увеличении  $L_g$ , а затем изменении параметров настройки регулятора напряжения

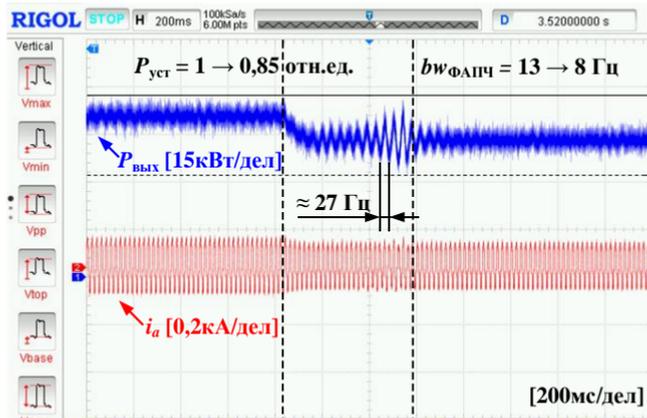


Рис. 2 – При уменьшении  $P_{\text{уст}}$  и полосы пропускания ФАПЧ

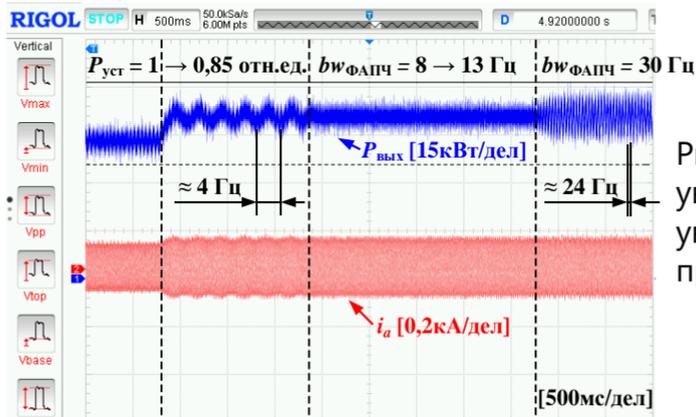


Рис. 3 – При  $bw_{\text{ФАПЧ}} = 8$  Гц и увеличении  $P_{\text{уст}}$ , а затем увеличении полосы пропускания ФАПЧ

# Обобщение результатов исследований ССК

Тип управления		P-U управление				P-Q управление			DVC-U управление				DVC-Q управление		
		bw <sub>ФАПЧ</sub>			bw <sub>УС</sub>	bw <sub>ФАПЧ</sub>			bw <sub>ФАПЧ</sub>			bw <sub>УС</sub>	bw <sub>ФАПЧ</sub>		
Условие		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

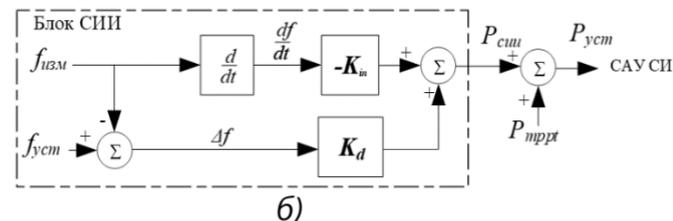
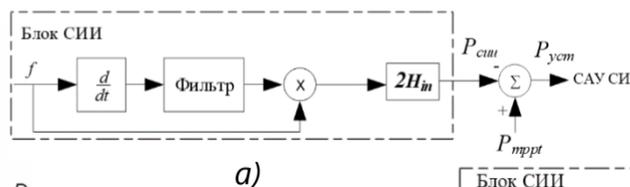
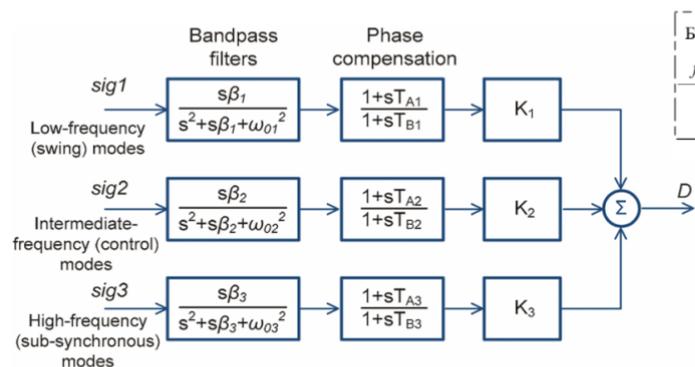


Рис. 1 – Комбинированная система регулятора демпфирования колебаний [1]

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

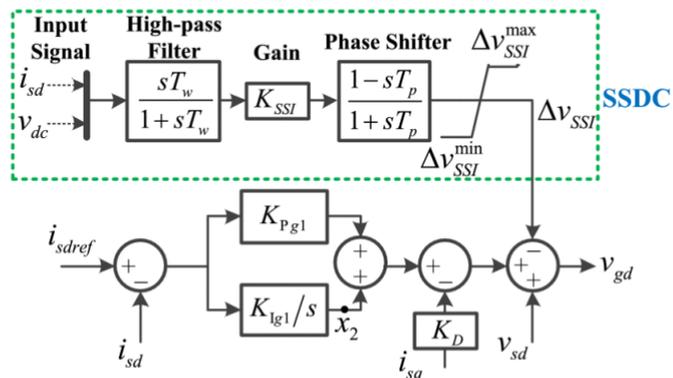
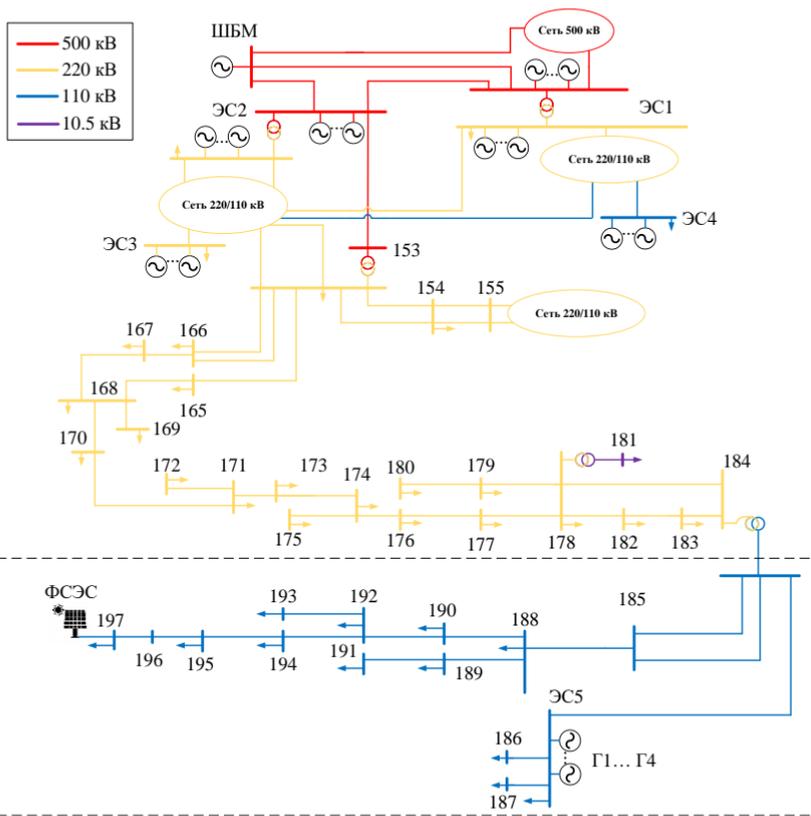


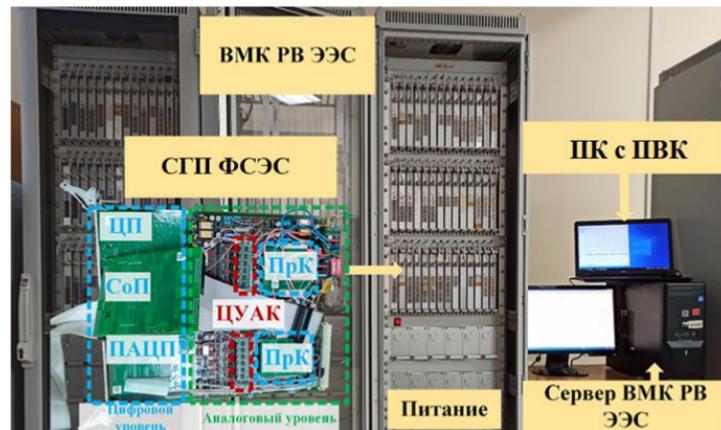
Рис. 3 – Регулятор демпфирования ССК [3]

[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



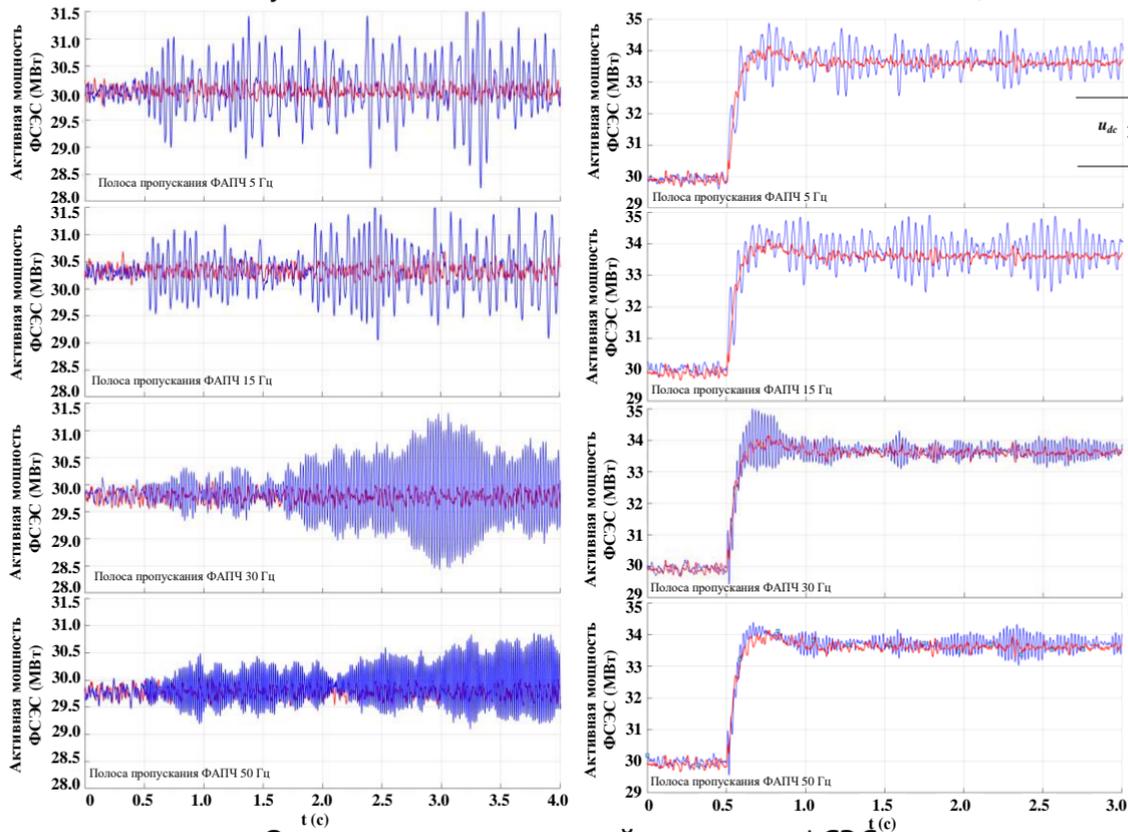
Программно-аппаратный комплекс, в котором реализуется тестовая схема ЭЭС и ФЭС с демпфирующим регулятором

Состав тестовой ЭЭС

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

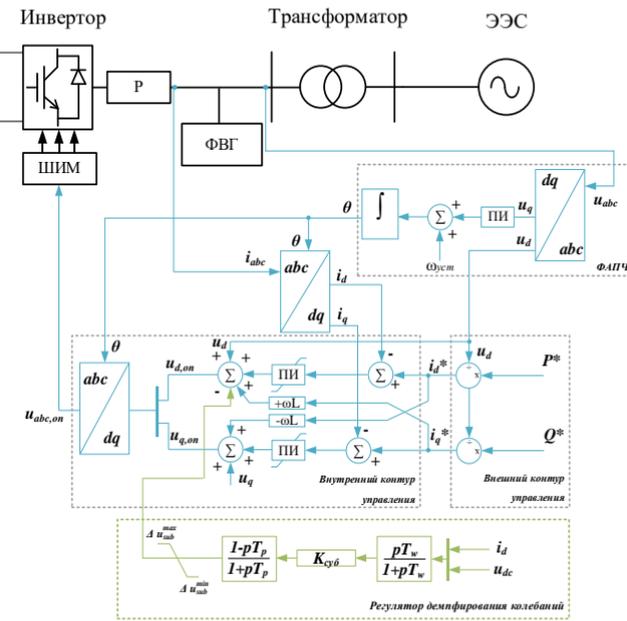
# Моделирование ССК в тестовой ЭЭС

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



Осциллограммы 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



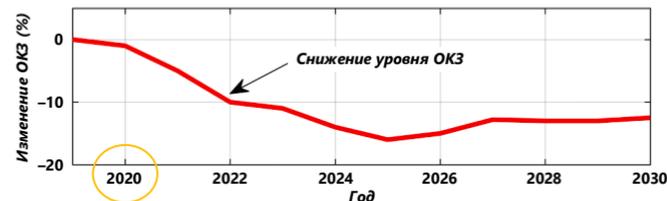
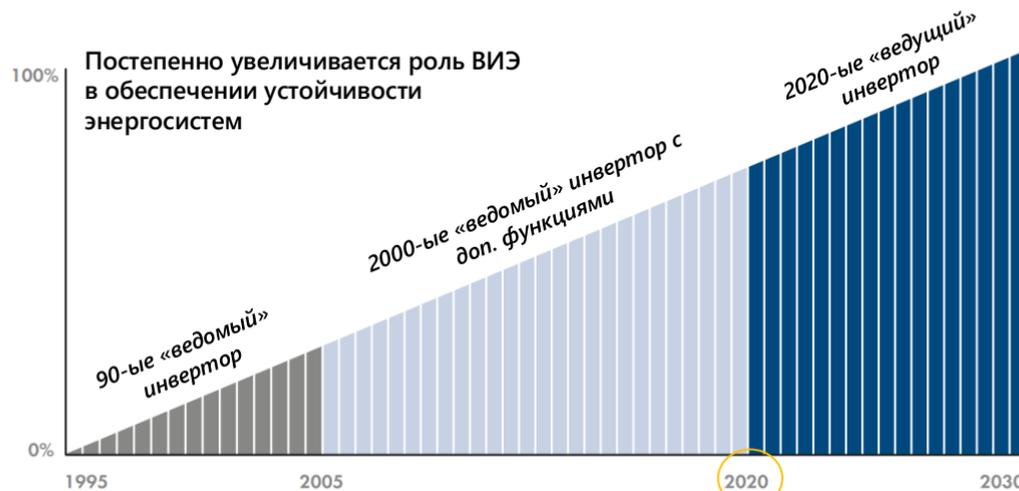
**«ведомый» инвертор с доп. функциями**  
(*grid-supporting inverter*)

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

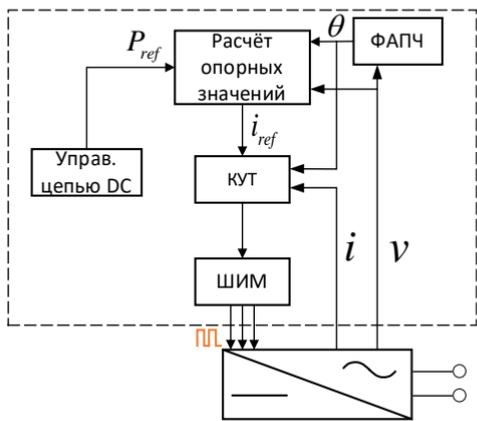


Прогноз по изменению ОКЗ в британской национальной сети\*

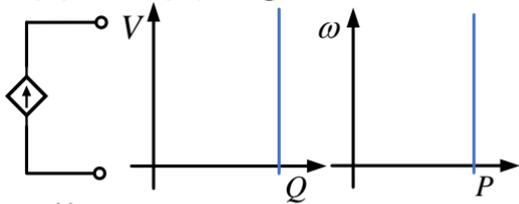
\*National Grid, Impact of declining short circuit levels, National Grid Warwick Technology Park, Gallows Hill, Warwick, UK., 2018

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

## Ведомый

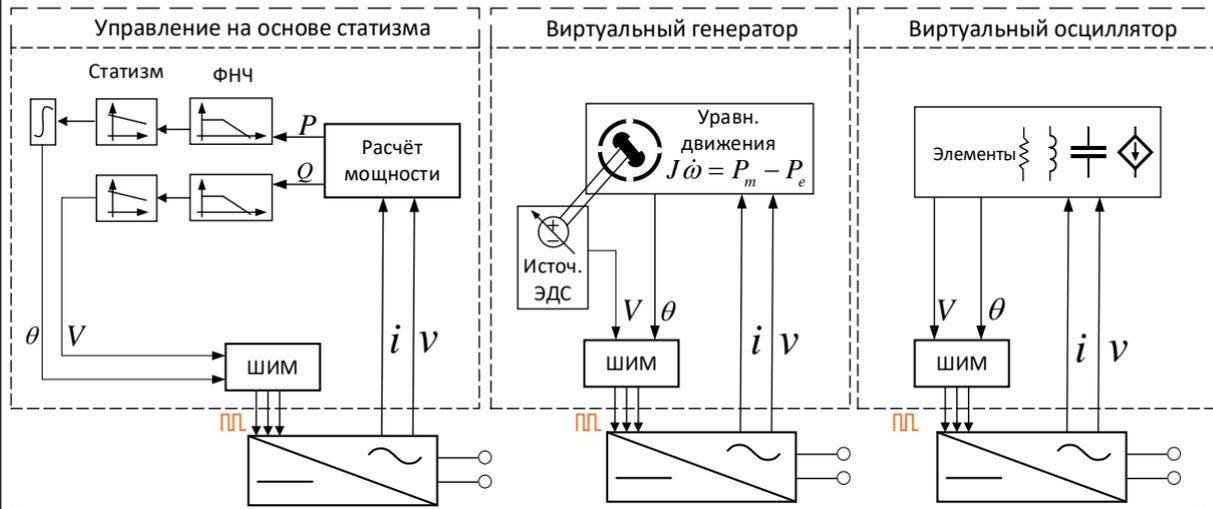


Источник тока

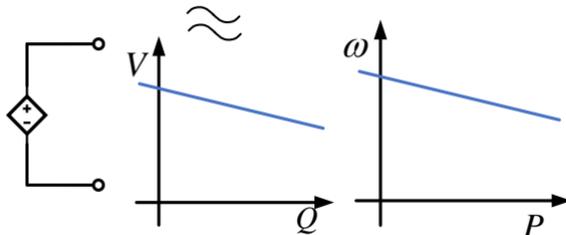


Не участвует в регулировании режима сети

## Ведущий

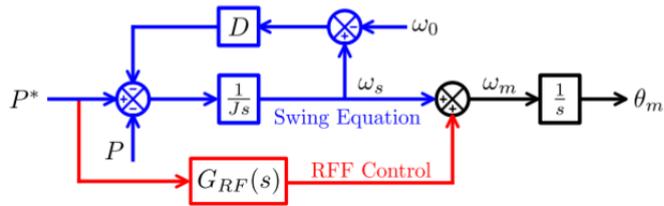
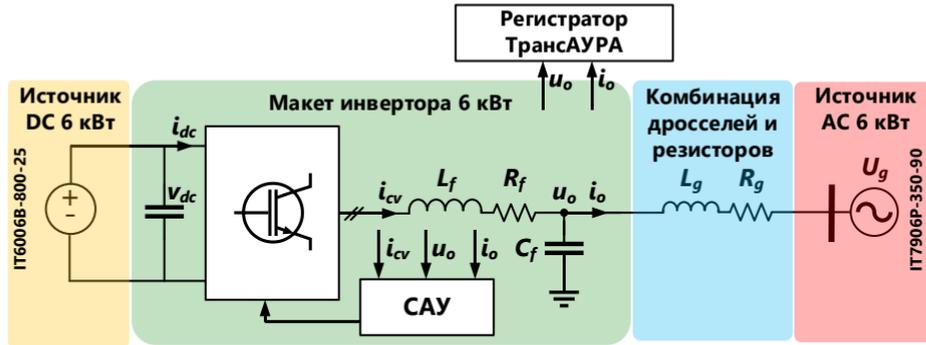


Источник напряжения

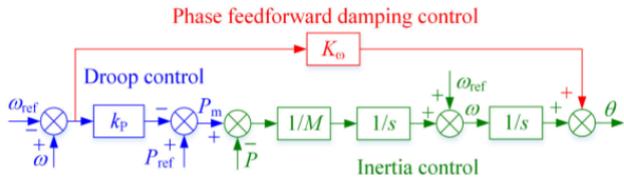


Участвует в регулировании режима сети

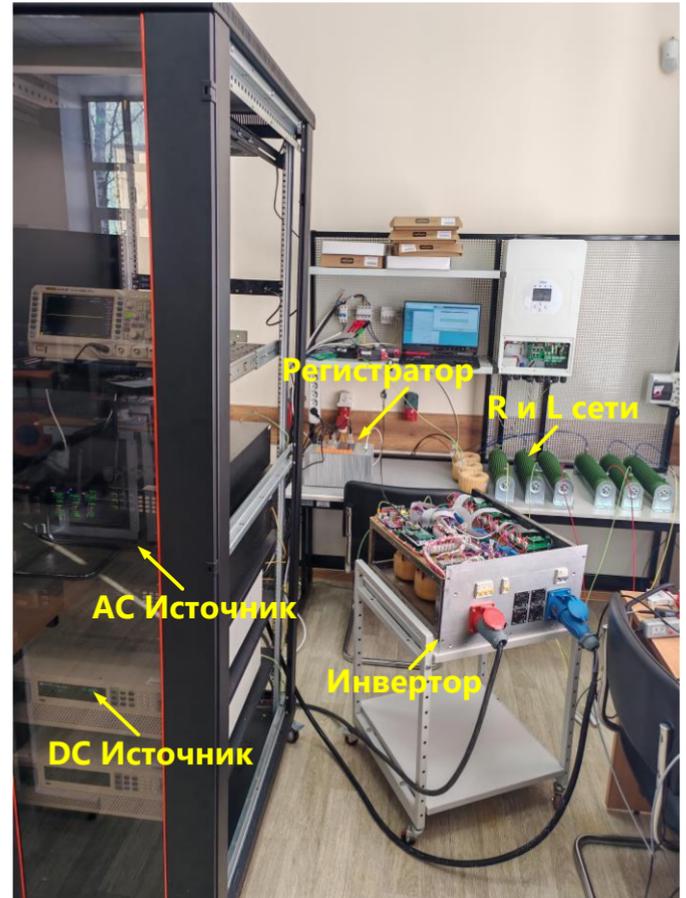
# Схема тестирования модифицированного алгоритма



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)\*\*

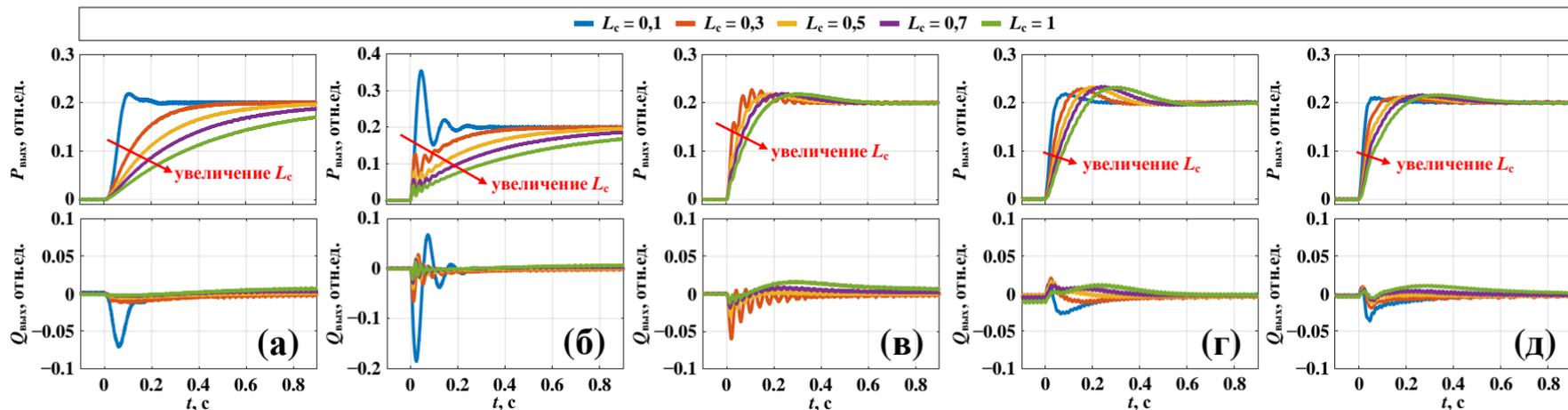


\*doi: 10.1109/TPEL.2022.3152358

\*\*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

# 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.

**Причины возникновения и технологии  
предотвращения субсинхронных колебаний в  
современных электроэнергетических системах**

**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](mailto:suvorovaa@tpu.ru)

тел: 8-3822-701-777 (доб.1987)