

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Разработка и тестирование системы противоаварийного управления изолированной энергосистемой



Андранович Богдан

Санкт-Петербург
2022

Цель и задачи диссертационной работы

- **Цель работы** - разработка системы противоаварийного управления, работающей в режиме реального времени (ИСПАУ), действие которой направлено на предотвращение развития аварийных ситуаций в изолированных энергосистемах, сопровождающихся недопустимыми отклонениями частоты.
- **Задачи работы:**
 - 1) проведение анализа особенностей протекания аварий в изолированных ЭЭС;
 - 2) проведение анализа существующих способов ПАУ в изолированных энергосистемах;
 - 3) выявление влияния современного теплосилового оборудования на протекание электромеханических переходных процессов (ЭМП) с учётом изменения частоты и особенностей его математического моделирования;
 - 4) разработка архитектуры ИСПАУ;
 - 5) разработка и программная реализация математических моделей элементов изолированной ЭЭС с целью решения задач противоаварийного управления, поставленных перед ИСПАУ;
 - 6) выбор и программная реализация алгоритма интегрирования дифференциальных уравнений для проведения расчётов ЭМП подсистемами ИСПАУ;
 - 7) разработка алгоритмов выбора управляющих воздействий подсистемами ИСПАУ;
 - 8) разработка рекомендаций по определению настроек и тестирование корректности работы в ИСПАУ в реальной изолированной энергосистеме.

Актуальность диссертационной работы

- **Концепция развития ПАУ ЕЭС России подразумевает создание новых и развитие существующих централизованных систем противоаварийной автоматики (ЦСПА);**
- **Отсутствие в ЦСПА алгоритмов выбора управляющих воздействий, направленных на решение задач ПАУ в изолированных ЭЭС;**
- **Выделение в 2025-м году на изолированную работу Калининградской энергосистемы с преобладанием ПГУ и ГТУ;**
- **Наличие ГТУ и ПГУ оказывает негативное влияние на развитие аварий в изолированных ЭЭС.**

Влияние ГТУ и ПГУ на протекание Эл.Мех.ПП с учётом изменения частоты

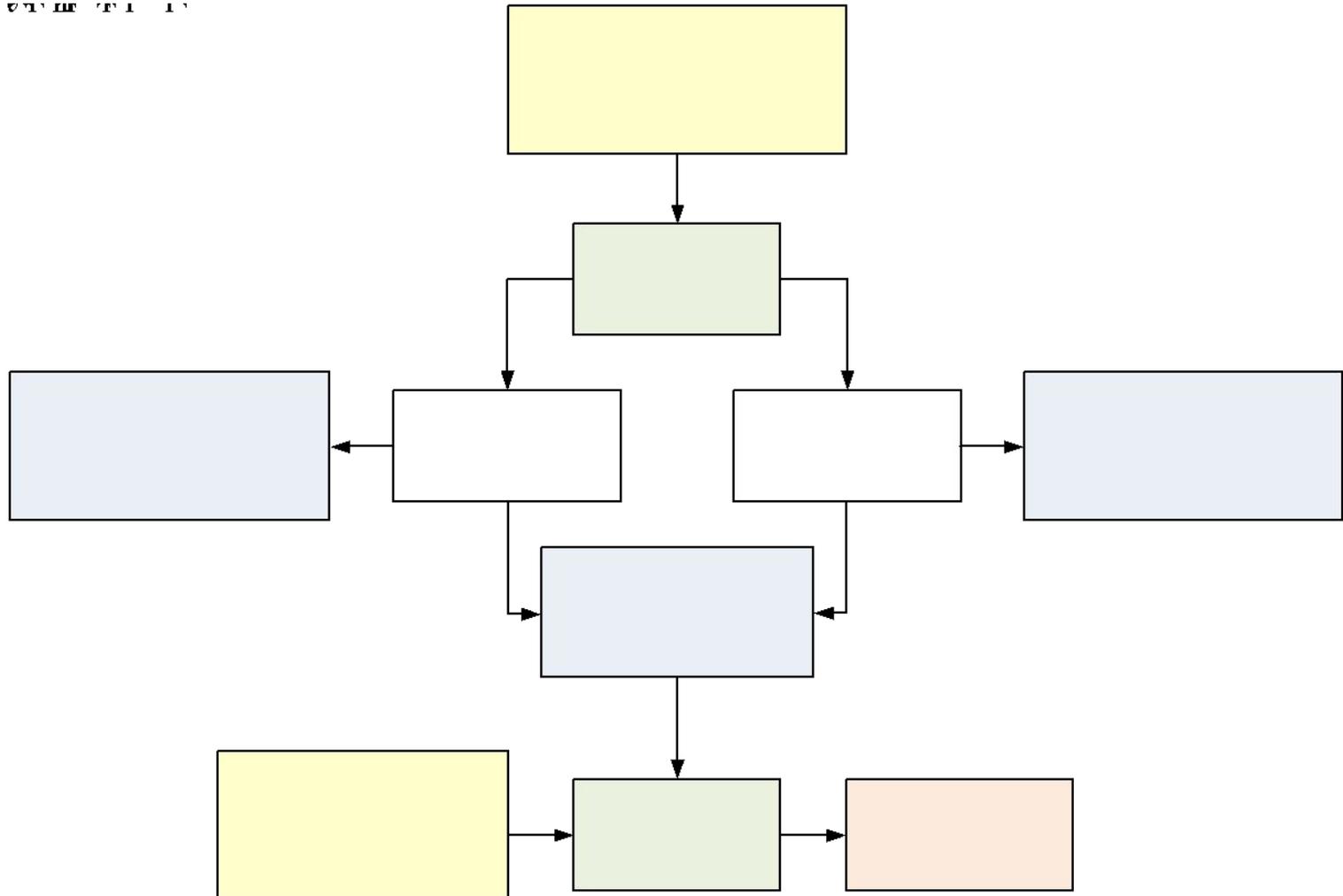
Особенность	Энергетическое оборудование	Влияние на протекание Эл.Мех.ПП в изолированной ЭЭС
Низкое значение инерционной постоянной времени (T_j)	Многовальные ГТУ	Быстрое и глубокое снижение частоты в энергосистеме в том числе при незначительных небалансах активной мощности
Возможное неучастие в первичном регулировании частоты по экономическим соображениям	Паровые турбины ПГУ	
Наличие встроенных защит и автоматик, осуществляющих отключение энергоблоков от сети при незначительном снижении частоты в ЭЭС	ГТУ, ПГУ (вне зависимости от типа энергоустановки)	Увеличение небаланса мощности в энергосистеме в процессе развития аварий, приводящее к избыточному объёму отключения потребителей действием устройств АЧР
Наличие регулятора температуры выхлопных газов	ГТУ (вне зависимости от типа энергоустановки)	

Способы противоаварийного управления в изолированных энергосистемах

- За 2019-2020 гг. в Калининградской ЭЭС было зафиксировано **29 случаев** аварийных отключений мощных энергоблоков ГТУ и ПГУ;
- Предотвращение развития аварий в настоящее время осуществляется путём использования устройств **АЧР** и **ДАР**;
- **К основным недостаткам** устройств АЧР и ДАР относятся:
 - ✓ АЧР – отключение потребителей, неконтролируемое для диспетчерского персонала;
 - ✓ ДАР – отсутствие привязки реализуемых объёмов управляющих воздействий к текущей балансовой ситуации.
- **Яркие примеры** – аварии в ЭЭС Великобритании 2019 г., Малайзии 1996 г. и 2005 г., Калининградской области 2011 г. и 2013 г.
- **Новая концепция:** АЧР живучесть; ИСПАУ аварии после НВ.

Принцип действия ИСПАУ

УЧЕБНИК



Архитектура ИСПАУ

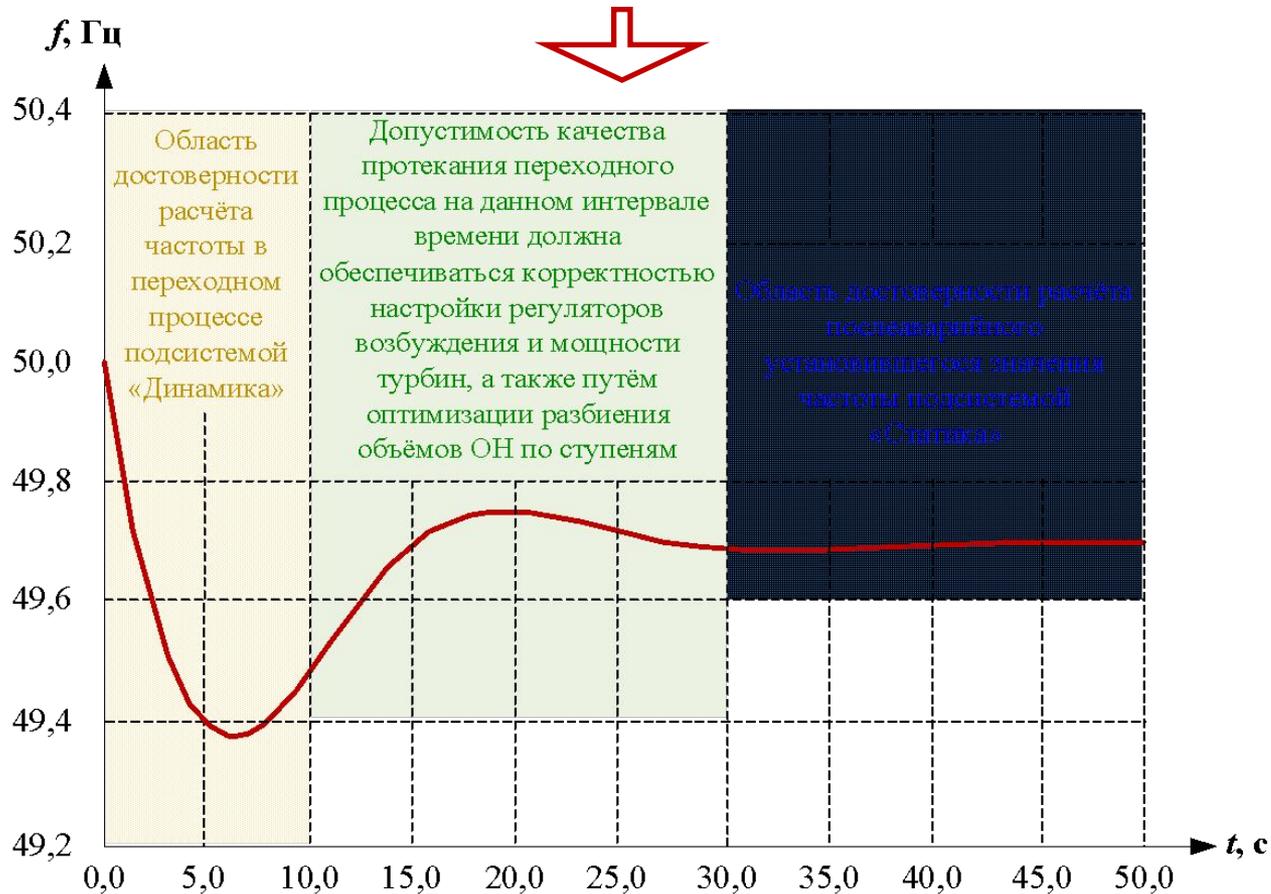
- Сервер верхнего уровня – **диспетчерский центр** изолированной ЭЭС;
- Низовое устройство – одно на наиболее крупной **электростанции**;
- Структура сети передачи аварийных сигналов и команд – **кольцевая**;
- Места реализации ОН – потребители, **не подключенные к АЧР**;
- Объём ОН – равен P_{max} наиболее крупного энергоблока, делится на n **независимых ступеней** ОН с объёмами k -й ступени:

$$P_{\text{ОН.}k} = \frac{2^{k-1}}{2^n - 1} \cdot P_{\text{УВ.дост.ИСПАУ}}$$

где: $P_{\text{УВ.дост.ИСПАУ}}$ – максимальный объём УВ, доступный ИСПАУ, МВт

Стратегия формирования ТУВ ИСПАУ

Изолированная ЭЭС – «Компактность» + незначительное влияние уровней напряжения на изменение нагрузки в процессе изменения частоты



Области достоверности расчёта частоты подсистемами ИСПАУ

Подсистема «Статика»

- **Задача – рассчитать объёмы УВ** в режиме реального времени для обеспечения допустимых значений частоты **в послеаварийном режиме**, характеризующимся окончанием действия первичных регуляторов частоты вращения турбин.

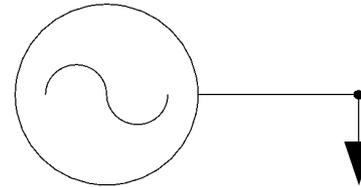
$$\Delta P_{УВ.min} = \Delta P_{нб} - \left(k_{\Gamma} \cdot \frac{\sum_i P_{т.ном.пар.i}}{P_{н0}} + K_{н} \right) \cdot P_{н0} \cdot \frac{f_{тек} - f_{min.доп}}{f_{ном}}$$

$$k_{\Gamma} = \begin{cases} k'_{\Gamma} & \text{если } \Delta P_{рез.дост} > K_{рез} \\ \frac{k'_{\Gamma} - K_0}{K_{рез}} \cdot \Delta P_{рез.дост} + K_0 & \text{если } \Delta P_{рез.дост} \leq K_{рез} \end{cases}$$

$$k'_{\Gamma} = \frac{\sum_i (K_{гfi} \cdot P_{т.ном.пар.i})}{\sum_i P_{т.ном.пар.i}} \quad \text{Новое в ИСПАУ (дост. резерв ПРЧ)}$$

$$\text{если } \frac{P_{ги}}{P_{т.ном.пар.i}} \geq P_{кр.i} \text{ то } K_{гfi} = 0$$

Ранее в ЦСПА



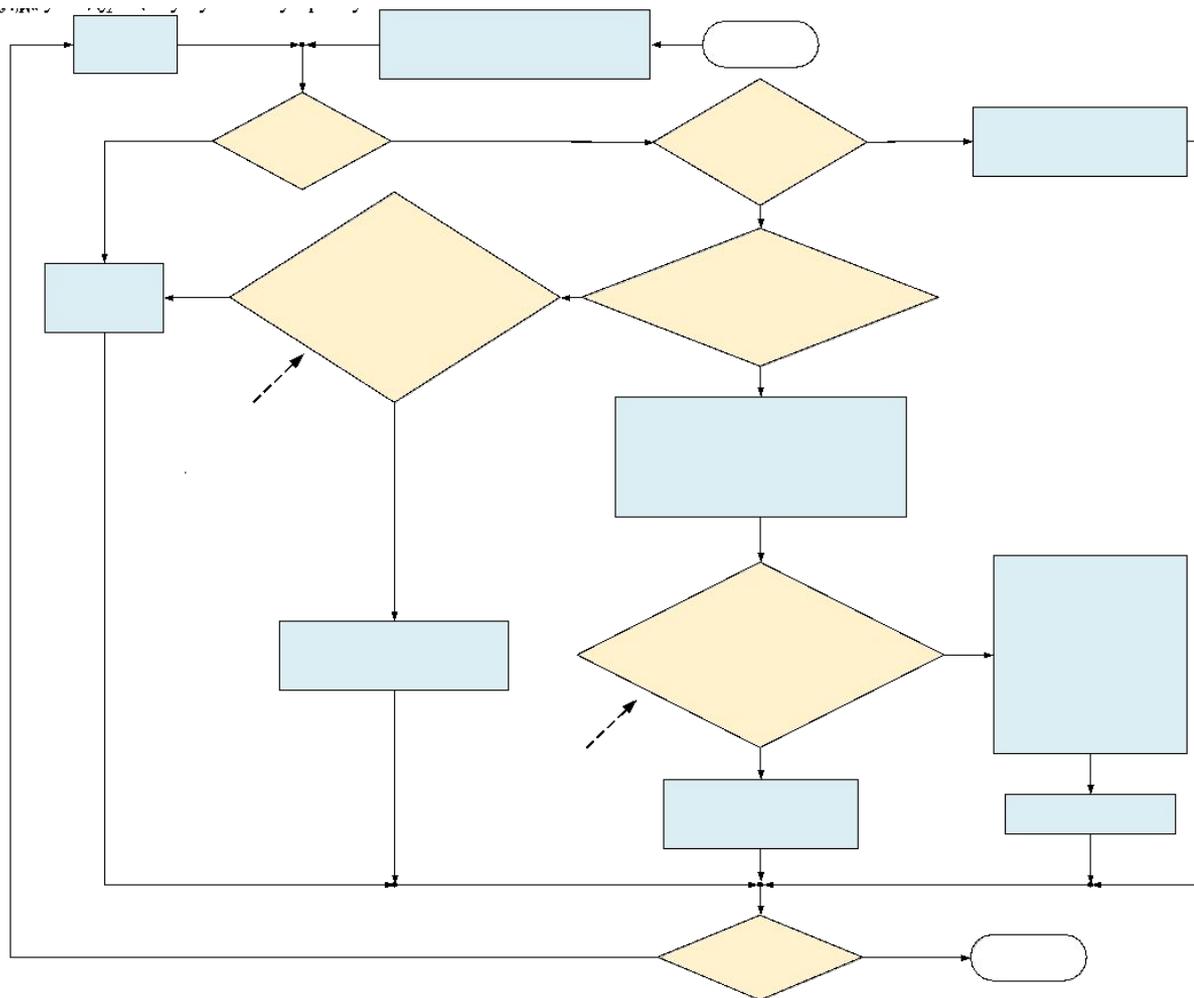
Математическая модель элементов изолированной ЭЭС в подсистеме «Статика»

Перечень сокращений:

$\Delta P_{УВ.min}$ – объём УВ для обеспечения $f_{min.доп}$, МВт; $\Delta P_{нб}$ – величина аварийного небаланса в ЭЭС, МВт; $P_{т.ном.пар.i}$ – номинальная мощность i -го энергоблока, участвующего в первичном регулировании частоты (ПРЧ) в послеаварийном режиме (ПАР), МВт; $f_{тек}$ – доаварийное

значение частоты, Гц; $f_{min.доп}$ – допустимое значение частоты в ПАР, Гц; $f_{ном}$ – номинальное значение частоты, Гц; $\Delta P_{рез.дост}$ – доступный резерв активной мощности в ПАР относительно величины $\Delta P_{нб}$, о.е.; $K_{рез}$ – значение $\Delta P_{рез.дост}$, при котором величина k_2 начинает существенно отличаться от значения k'_{Γ} , о.е.; K_0 – значение k_2 при $\Delta P_{рез.дост} = 0$, о.е.; $K_{гfi}$ – «паспортный» коэффициент крутизны статической характеристики автоматического регулятора частоты вращения i -го энергоблока, о.е.; $P_{ги}$ – нагрузка по мощности i -го энергоблока в доаварийном режиме, МВт; $P_{кр.i}$ – нагрузка по мощности i -го энергоблока, при котором генерирующее оборудование не участвует в первичном регулировании частоты, о.е.

Алгоритм выбора оптимальных ступеней УВ подсистемой «Статика»



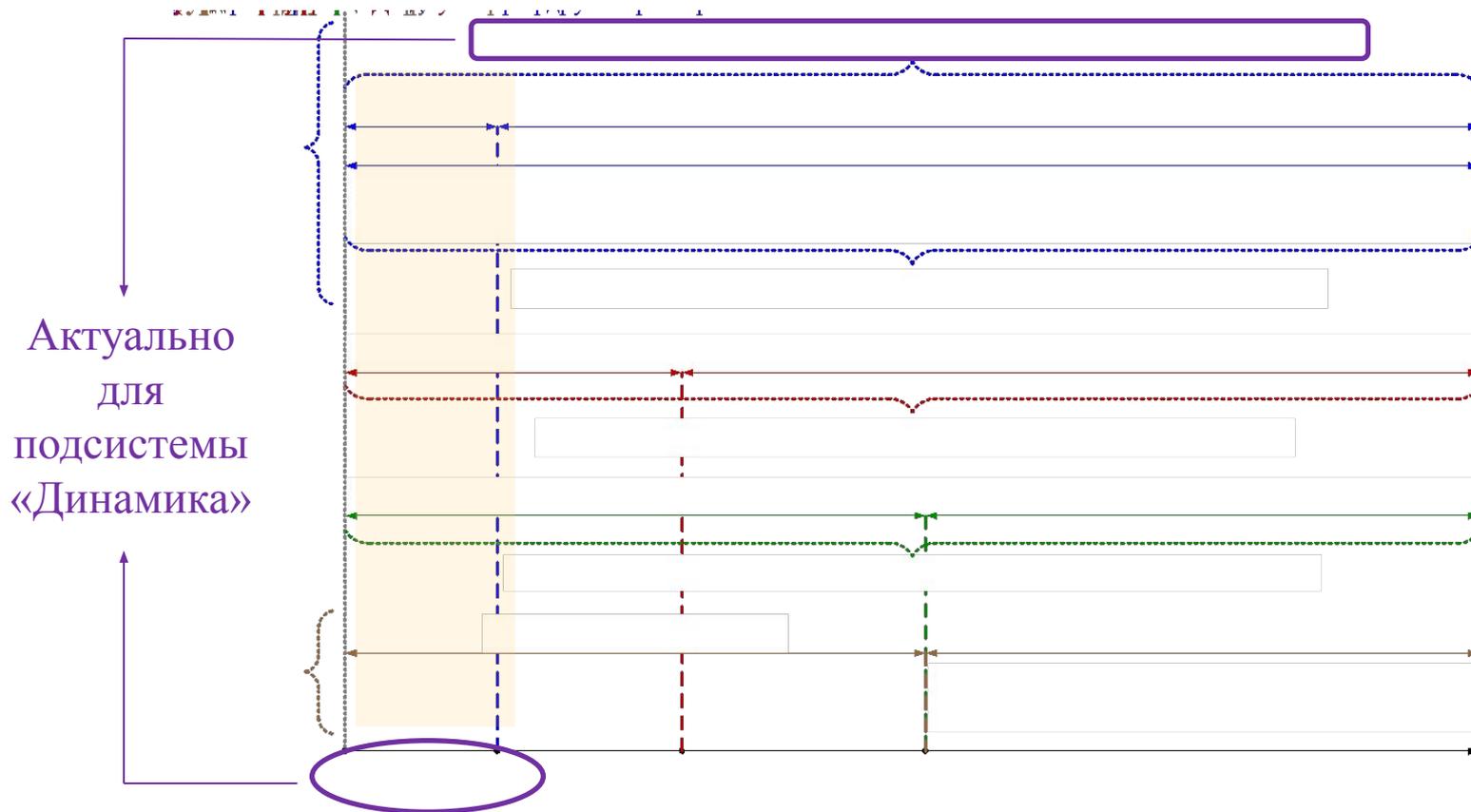
Перечень сокращений:

i – номер ПОр; $УВ_{ПАР}$ – наименование ТУВ, формируемой подсистемой «Статика»; $УВ_{ПАР}^i$ – значение i -го элемента ТУВ модуля «Статика», МВт; $УВ_{ИСПАУmax}$ – максимальный объем УВ, доступный ИСПАУ, МВт; $УВ_{ИСПАУmin}$ – минимальный объем УВ, доступный ИСПАУ, МВт; $\Delta P_{нб.доп}$ – допустимый небаланс мощности в ЭЭС, равный разности $\Delta P_{нб}$ и $\Delta P_{УВ.min}$, МВт; $f_{min.доп}$ – минимально допустимое значение частоты в ПАР, Гц; $f_{max.доп}$ – уставка срабатывания ИСПАУ, характеризующая максимально допустимое значение частоты в ПАР, Гц.

Подсистема «Динамика»

- **Задача – рассчитать объёмы УВ для предотвращения возникновения недопустимых отклонений частоты в переходном процессе;**
- **Формирование ТУВ осуществляется путём последовательного выполнения расчётов переходных процессов;**
- **Решение системы дифференциальных уравнений осуществляется по классическому методу интегрирования Рунге-Кутты 4-го порядка;**
- **В качестве 1-го приближения – объём УВ из подсистемы «Статика»;**
- **Проведение расчётов переходных процессов в изолированных ЭЭС требует обязательного учета моделей теплосилового оборудования (отсутствует в ЦСПА).**

Рекомендации по выбору математических моделей теплосилового оборудования



- $V_{pi} + Dband_i$ – линейное изменение мощности до максимально допустимых значений без привязки к величине отклонения частоты за границами зон нечувствительности первичных регуляторов частоты вращения турбин;
- $PCONST$ – постоянная выдача мощности турбиной;
- $t_{ЭМПП}$ – время рассмотрения ЭМПП; РДС – регулятор давления пара «до себя».

Уравнения для расчёта ЭМП в подсистеме «Динамика»

✓ Расчёт изменения частоты ЭЭС:

$$\frac{1}{f_{ном}} \cdot \frac{df(t)}{dt} = \frac{\sum_i P_{нб}^{ГТУ}(t) + \sum_i P_i^{ПТУ}(t) - \Delta P - P(t)}{\sum_i (T_{р\ddot{o}a\ddot{o}i} \cdot P_{генном\ddot{o}i} \cdot sta_{доав\ddot{o}i} \cdot sta_{ПАР\ddot{o}i})}$$

$$\Delta P_{нб} = \sum_i P_{гендоав\ddot{o}i} \cdot sta_{доав\ddot{o}i} \cdot (1 - sta_{ПАР\ddot{o}i})$$

✓ Расчёт изменения потребления ЭЭС:

$$P_n(t) = \begin{cases} P_n(0) \cdot \left(1 + \frac{f(t) - f_{доав}}{f_{ном}} \cdot K_n \right), & t < t_{УВИСПАВ} \\ (P_n(0) \text{ или } P_{УВИСПАВ}) \cdot \left(1 + \frac{f(t) - f_{доав}}{f_{ном}} \cdot K_n \right), & t \geq t_{УВИСПАВ} \end{cases}$$

✓ Расчёт изменения мощности ГТУ:

$$P_{доав\ddot{o}i}^{ГТУ}(t) = sta_{ПАР\ddot{o}i} \cdot sta_{\ddot{o}i} \cdot P^{ГТУ'}(t)$$

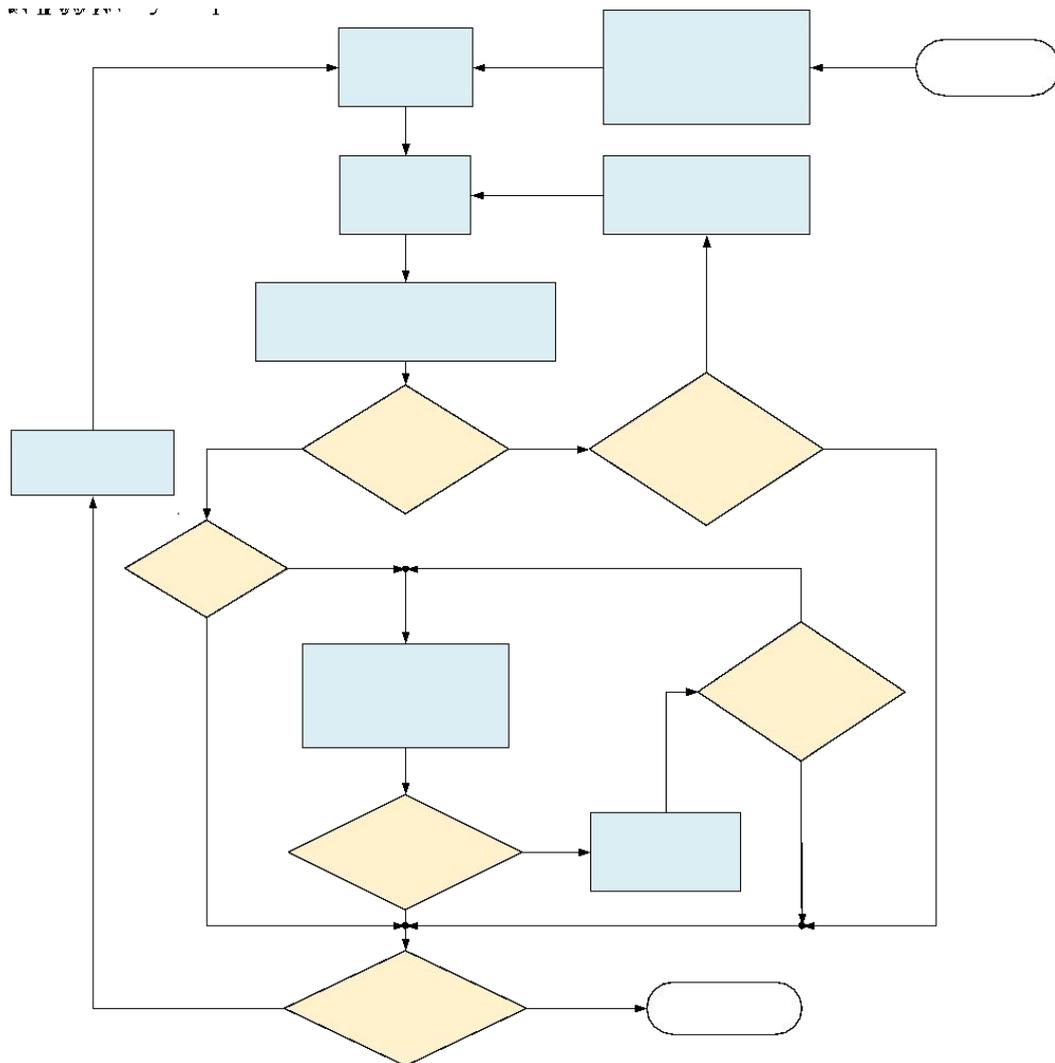
$$P_i^{ГТУ'}(t) = \begin{cases} P_{ном}^{ГТУ'}(0) \text{ или } f_m \geq f - D_{band\ddot{o}i}^{ГТУ} \\ k_{ТНВ\ddot{o}i} \cdot P_{ном\ddot{o}i}^{ГТУ} \text{ если } P_i^{ГТУ'}(t) \geq k_{ТНВ\ddot{o}i} \cdot P_{ном\ddot{o}i}^{ГТУ} \\ P_i^{ГТУ'}(0) + V_{p15} \cdot (t - t_{pi}), \\ \text{если } f_{ном} < f - D_{band\ddot{o}i}^{ГТУ} \text{ и } 0 \leq t - t_{pi} \leq 15; \\ P_i^{ГТУ'}(0) + V_{p15} \cdot 15 + V_{p15-30} \cdot (t - t_{pi} - 15), \\ \text{если } f_{ном} < f - D_{band\ddot{o}i}^{ГТУ} \text{ и } 15 < t - t_{pi} \leq 30; \\ P_i^{ГТУ'}(0) + (V_{p15} + V_{p15-30}) \cdot 15 + V_{p30-120} \cdot (t - t_{pi} - 30), \\ \text{если } f_{ном} < f - D_{band\ddot{o}i}^{ГТУ} \text{ и } 30 \leq t - t_{pi} \leq 120 \end{cases}$$

✓ Расчёт изменения мощности ПТУ:

$$P_{доав\ddot{o}i}^{ПТУ}(t) = sta_{ПАР\ddot{o}i} \cdot sta_{\ddot{o}i} \cdot P^{ПТУ'}(t)$$

$$P_i^{ПТУ'}(t) = \begin{cases} P_{ном}^{ПТУ'}(0) \text{ или } f_m \geq f - D_{band\ddot{o}i}^{ПТУ} \\ -T_{ni} \cdot \frac{dP_i^{ПТУ'}(t)}{dt} + P_{ном\ddot{o}i}^{ПТУ}, \\ K_{f\ddot{o}i} \cdot P_{ном\ddot{o}i}^{ПТУ} \cdot \left(-\frac{f_m - D_{band\ddot{o}i}^{ПТУ}}{f_{ном}} \right) \text{ (Ф)}^{ПТУ'} \geq P_{ном\ddot{o}i}^{ПТУ} \\ -T_{ni} \cdot \frac{dP_i^{ПТУ'}(t)}{dt} + K_{zf\ddot{o}i} \cdot P_{ном\ddot{o}i}^{ПТУ} \cdot \left(1 - \frac{f_m - D_{band\ddot{o}i}^{ПТУ}}{f_{ном}} \right) + P_i^{ПТУ'}(0), \\ \text{если } f_{ном} < f - D_{band\ddot{o}i}^{ПТУ} \end{cases}$$

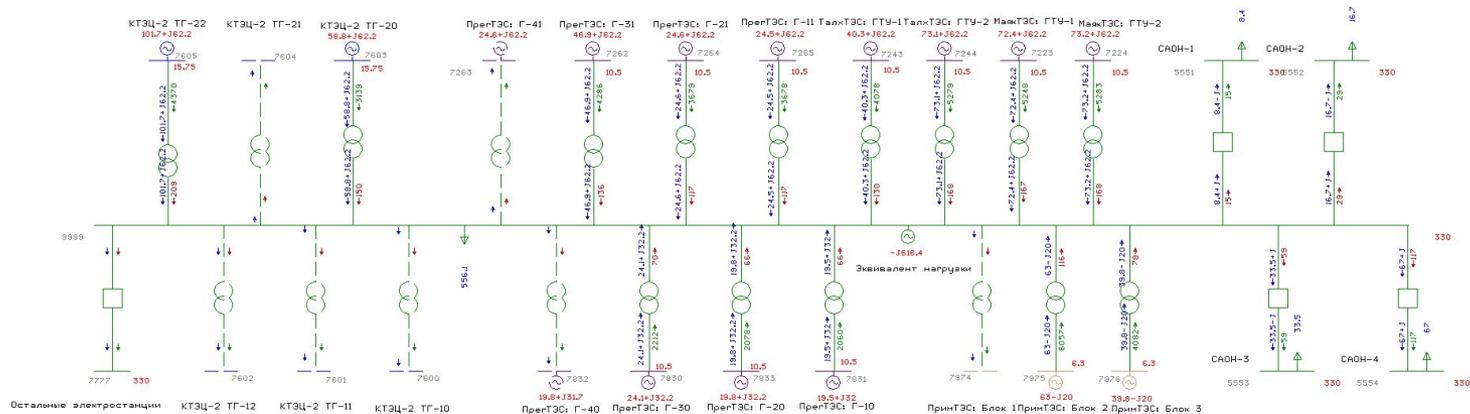
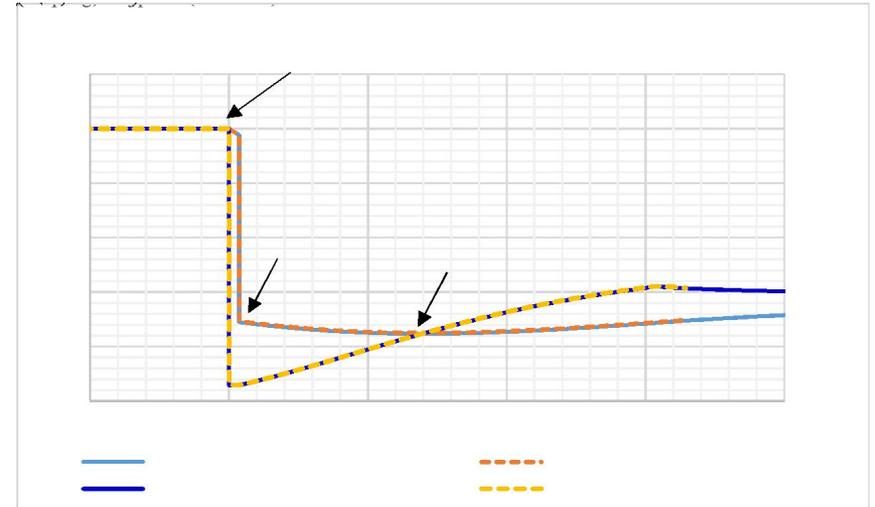
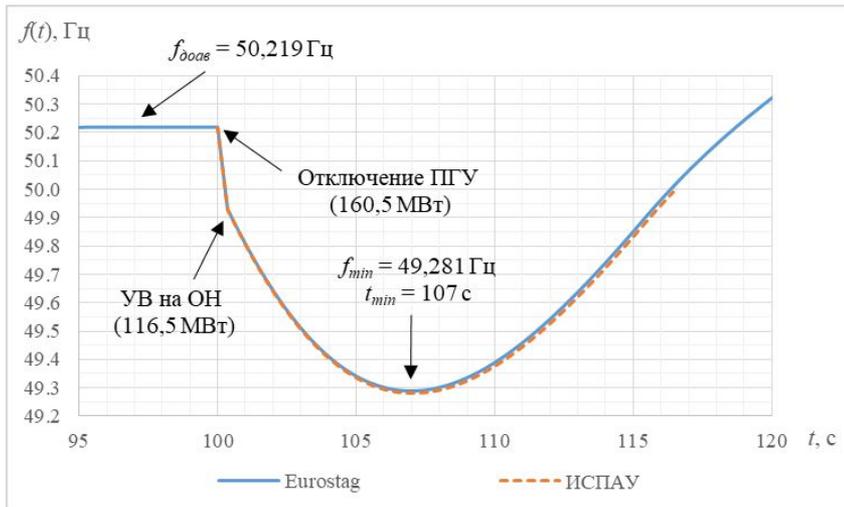
Алгоритм выбора оптимальных ступеней УВ подсистемой «Динамика»



Перечень сокращений:

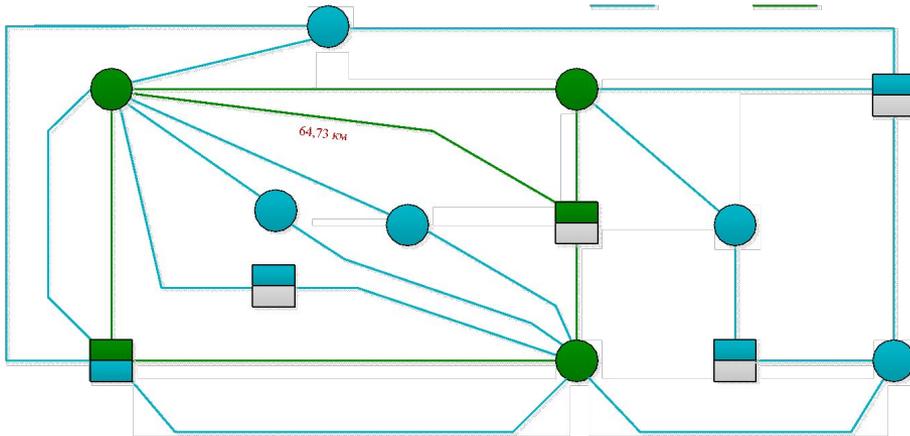
k – номер расчёта ЭМПП, выполняемого ИСПАУ; $УВ_{дин}$ – наименование таблицы управляющих воздействий, формируемой подсистемой «Динамика»; $УВ_{дин}^{i,k}$ – значение i -го элемента ТУВ подсистемы «Динамика», полученное после проведения k -го расчёта ЭМПП, МВт; $УВ_{стат}^i$ – значение i -го элемента ТУВ подсистемы «Статика», МВт; $f_{min.расч.}^{i,k}$ – минимальное значение частоты, рассчитанное подсистемой «Динамика» после проведения k -го расчёта ЭМПП для i -го ПОр, Гц; $f_{стат}^{i,k}$ – установившееся значение частоты, рассчитанное подсистемой «Статика» после проведения k -го расчёта ЭМПП для i -го ПОр, Гц; $f_{дин.min}$ – уставка срабатывания ИСПАУ, характеризующая минимально допустимое значение частоты в переходном процессе, Гц; $FLAG$ – параметр, определяющий приоритетность непревышения $f_{max.доп}$ (0 – приоритетно, 1 – неприоритетно); $УВ_{ИСПАУ}$ – массив данных, содержащий объёмы УВ, доступные ИСПАУ; $УВ_{ИСПАУ+1}$ – объём УВ из таблицы $УВ_{ИСПАУ}$, больший текущего значения $УВ_{дин}^{i,k}$ на одну ступень, МВт; $УВ_{ИСПАУ-1}$ – объём УВ из таблицы $УВ_{ИСПАУ}$, меньший текущего значения $УВ_{дин}^{i,k}$ на одну ступень, МВт.

Тестирование корректности программной реализации подсистемы «Динамика»

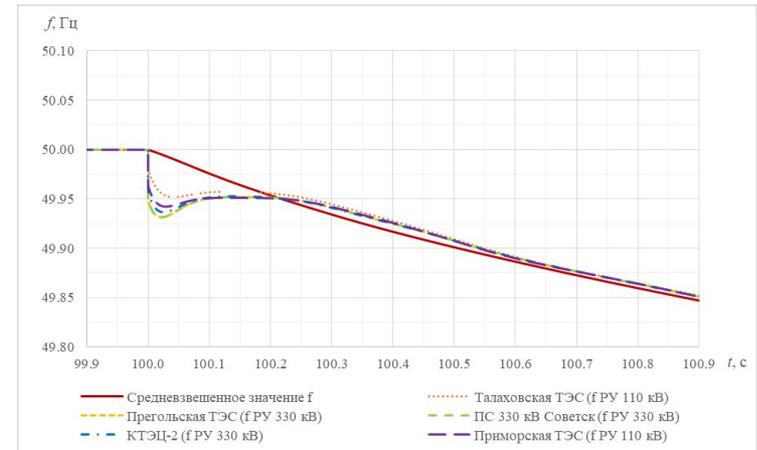


- Корректность программной реализации подсистемы «Динамика» подтверждена сравнением результатов расчётов ЭМПП с её аналогом в ПВК Eurostag (10 ГТУ, ПГУ, ПТ).

Характеристика энергосистемы Калининградской области



Структурная схема энергосистемы Калининградской области при изолированном режиме работы

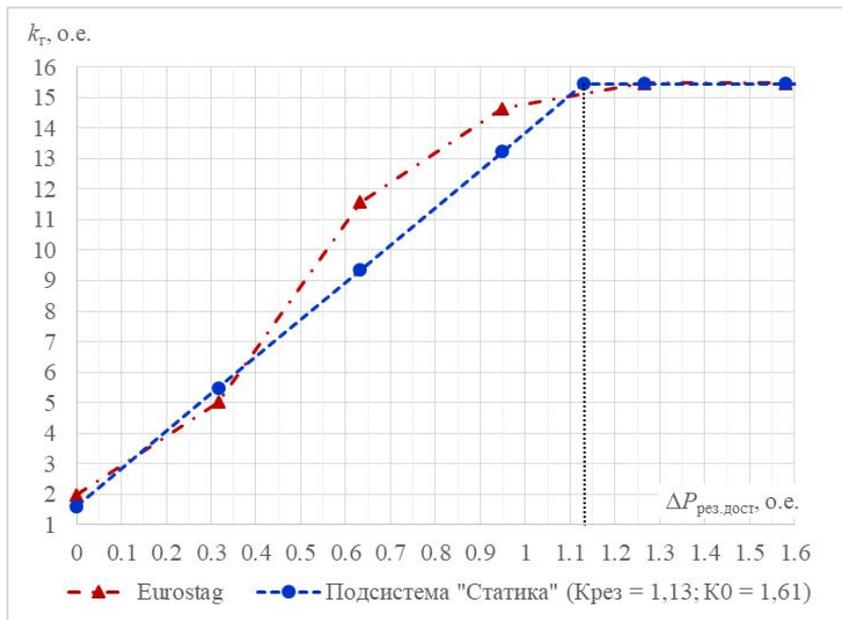


Изменение частоты в ЭЭС при выполнении её замеров в различных узловых точках

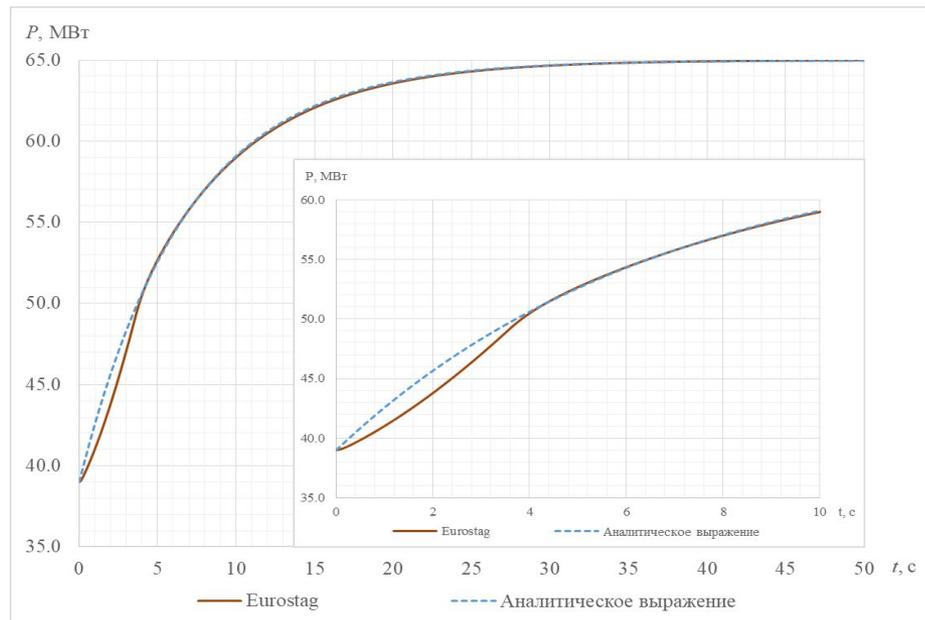
- Исторический максимум потребления Калининградской ЭЭС составляет 843 МВт при минимальном потреблении около 300 МВт. Типовые значения потребления – 616 МВт для максимальных и 416 МВт для минимальных режимов. Около 68 % потребителей относятся к бытовому сектору;
- Установленная мощность электростанций – 1444,53 МВт, из которых: 5,1 МВт – Ушаковская ВЭС, 8,5 МВт – Гусевская ТЭС (турбины с противодавлением), 1,64 МВт – мини-ГЭС;
- В Калининградской энергосистеме отсутствуют потребители, групповое отключение которых может приводить к недопустимому повышению частоты при изолированном режиме работы ЭЭС. Действие комплекса АОПЧ направлено на предотвращение недопустимого повышения частоты при аварийном отделении Калининградской ЭЭС от энергосистемы Литвы.

«Экспертные» настройки ИСПАУ

Подсистема «Статика» - параметры $K_{рез}$ и K_0



Подсистема «Динамика» - постоянные времени $T_{п_экв}$



$$k_r = f_{ном} \cdot \frac{\sum_i \Delta P_{турб.пар.i}}{\sum_i P_{т.ном.пар.i} \cdot \Delta f_{уст}}$$

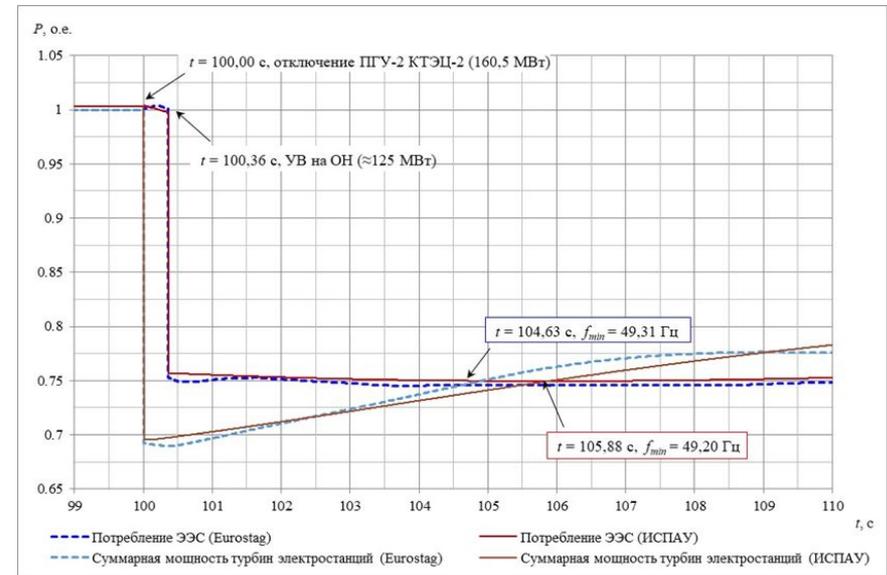
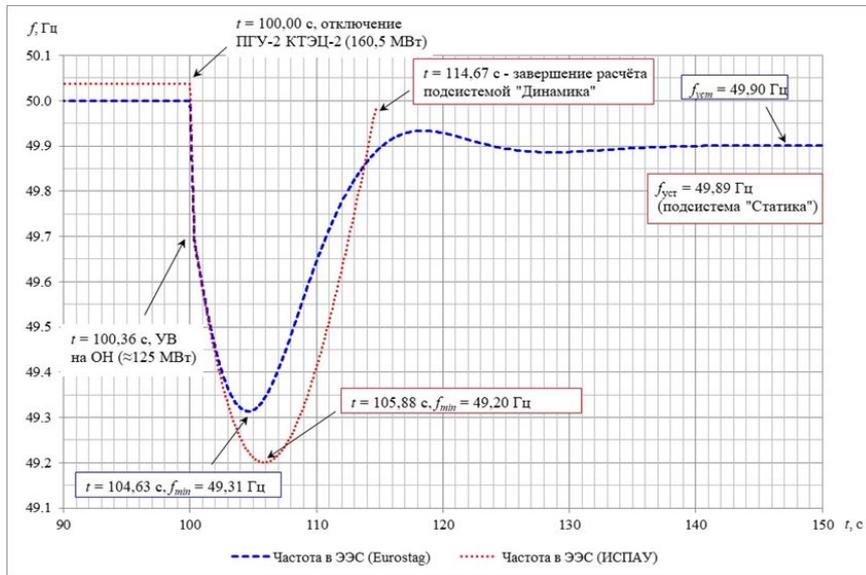
$$K_H = f_{ном} \cdot \frac{\Delta P_{нб}}{P_{потр} \cdot \Delta f_{уст}}$$

$$P_{т.ПТУ}(t) = P_{т0} + (P_{гном} - P_{т0}) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{п_экв}}} \right)$$

Регулирующий эффект нагрузки ЭЭС по частоте (K_H) – общая «экспертная» настройка для обеих подсистем

Значения «экспертных» настроек, принятые в ИСПАУ: $K_{рез} = 1,13$ о.е. $K_0 = 1,61$ о.е. $K_H = 0,986$ о.е. $T_{п_экв} = 6,74$ с

Результаты тестирования ИСПАУ (1)



Изменение частоты в Калининградской ЭЭС

Изменение генерации и потребления активной мощности

- Расхождения в характере протекания переходных процессов, полученные с использованием подробной математической модели Калининградской ЭЭС и математических моделей, используемых подсистемами ИСПАУ, в первую очередь, **связаны с различиями в математических моделях ГТУ**;
- В 3-х случаях из 84-х максимальные отклонения частоты, полученные в ПВК Eurostag, превышали отклонения, полученные ИСПАУ (максимальная разница 0,02 Гц). В 81-м случае указанные отклонения были менее, рассчитанных ИСПАУ, и находились в диапазоне от 0,00 до 0,20 Гц \square **УВ от ИСПАУ выбираются с небольшим запасом.**

Результаты тестирования ИСПАУ (2)


 АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
 «СИСТЕМНЫЙ ОПЕРАТОР
 ЕДИНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ»
 (АО «СО ЕЭС»)
 Китайгородский проезд, д. 7, стр. 3, Москва,
 Россия, 109074
 Тел.: (495) 627-83-65 Факс: (495) 627-95-15
 E-mail: secr@so-eps.ru
<http://www.so-eps.ru>
 ОКПО 68012820 ОГРН 1027700201352
 ИНН/КПП 7705454461/770501001

Заместителю Председателя
 Диссертационного совета
 У.05.14.02, созданного при
 СПбПУ,
 д.т.н., профессору,
 Смолову С.В.

18.03.2022 № В2-В-19-2895

на № _____ от _____

О внедрении результатов диссертации

Уважаемый Сергей Владимирович!

АО «СО ЕЭС» подтверждает, что результаты диссертации Андрановича Богдана, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по теме «Разработка и тестирование системы противоаварийного управления изолированной энергосистемой», в виде:

- принципов построения интеллектуальной системы противоаварийного управления изолированной энергосистемой (далее – ИСПАУ);
- математических моделей теплосилового оборудования и других структурных элементов изолированной энергосистемы, реализованных в составе программного обеспечения подсистем ИСПАУ;
- алгоритмов выбора управляющих воздействий подсистемами ИСПАУ, реализованы в составе программно-технического комплекса противоаварийной автоматики (далее – ПТК ПА) энергосистемы Калининградской области и испытаны во время проведения натурного эксперимента по выделению энергосистемы Калининградской области на изолированную работу.

ПТК ПА энергосистемы Калининградской области введен в промышленную эксплуатацию в 2020 году приказом Филиала АО «СО ЕЭС» Балтийское РДУ №138 от 18.12.2020.

Первый заместитель Председателя Правления



С.А. Павлушко

Лужковский Юрий Игоревич
(499) 7881532

№ настройки параметров ИСПАУ	Частота в доаварийном режиме		ТНВ		Учёт сложных ПОР		Значение параметра FLAG	
	50 Гц	Текущее значение	+10°C	Текущее значение	Вкл.	Откл.	1,0	0,0
1		+		+		+	+	
2	+			+		+	+	
3		+	+			+	+	
4		+		+		+		+
5		+		+	+		+	

Настройки ИСПАУ во время проведения натурных испытаний

Набор параметров ИСПАУ	Максимальная разница УВ, выбранными ИСПАУ и боевыми серверами, МВт	Время (г. Калининград)	ПОР
1	+ 35,99	14:00	Отключение ПГУ-2 КТЭЦ-2
2	+ 19,85	13:00	
3	+ 35,99	14:00	
4	+ 36,86	13:00	
5	+19,85 -11,69	«+» – 13:00; «-» – 12:00	«+» – Отключение ПГУ-2 КТЭЦ-2; «-» – Отключение ПГУ-3,4 Прег.ТЭС

Максимальные расхождения в объёмах УВ, выбранных ИСПАУ и ПТК ПА («+» при условии, что УВ от ИСПАУ меньше, чем от ПТК ПА)

Текущее время (г. Калининград)	9:15	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00
Импорт телеметрии, с	1,13	1,13	2,14	2,14	1,12	1,13	2,16	1,13	2,14
Оценка состояния, с	2,19	3,16	5,28	3,16	2,24	3,13	2,24	2,27	3,25
Расчет после оценки, с	2,14	2,19	2,27	2,15	2,25	2,14	2,36	2,27	2,27
Расчет ТУВ, с	3,17	3,16	4,17	4,19	4,14	4,17	3,19	4,19	4,17
Передача ТУВ, с	1,27	1,25	1,45	1,25	1,47	1,25	1,50	1,48	1,49
Финиш режима, с	0,28	0,30	0,34	0,28	0,31	0,30	0,37	0,28	0,28
Итого, с	10,17	11,17	15,66	13,17	11,54	12,11	11,81	11,61	13,60

Длительность процедур расчётного цикла ИСПАУ

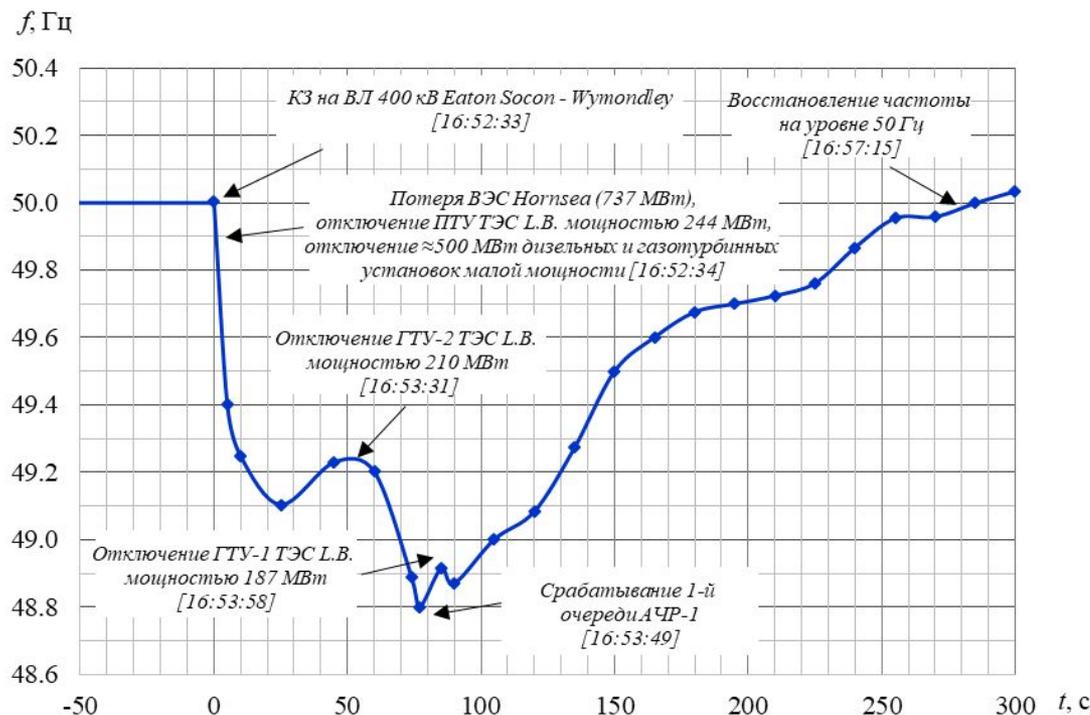
Заключение

- Разработана система противоаварийного управления, работающая в режиме реального времени, обеспечивающая предотвращение срабатывания устройств АЧР и заданный уровень частоты в послеаварийном режиме, а также исключающая недостатки устройств АЧР и ДАР;
- Сформированы рекомендации по выбору математических моделей теплосилового оборудования с целью проведения расчётов электромеханических переходных процессов с учётом изменения частоты;
- Сформированы рекомендации по оптимальному разбиению потребителей по ступеням отключения нагрузки для нужд централизованного ПАУ;
- Выполнено тестирование работоспособности ИСПАУ при её работе в реальной изолированной энергосистеме;
- Результаты выполненной диссертационной работы использованы в рамках модернизации комплекса ПТК ПА энергосистемы Калининградской области в 2022-м году.

Спасибо за внимание!

Авария в энергосистеме Великобритании

09.08.2019 г.



На момент возникновения аварии:

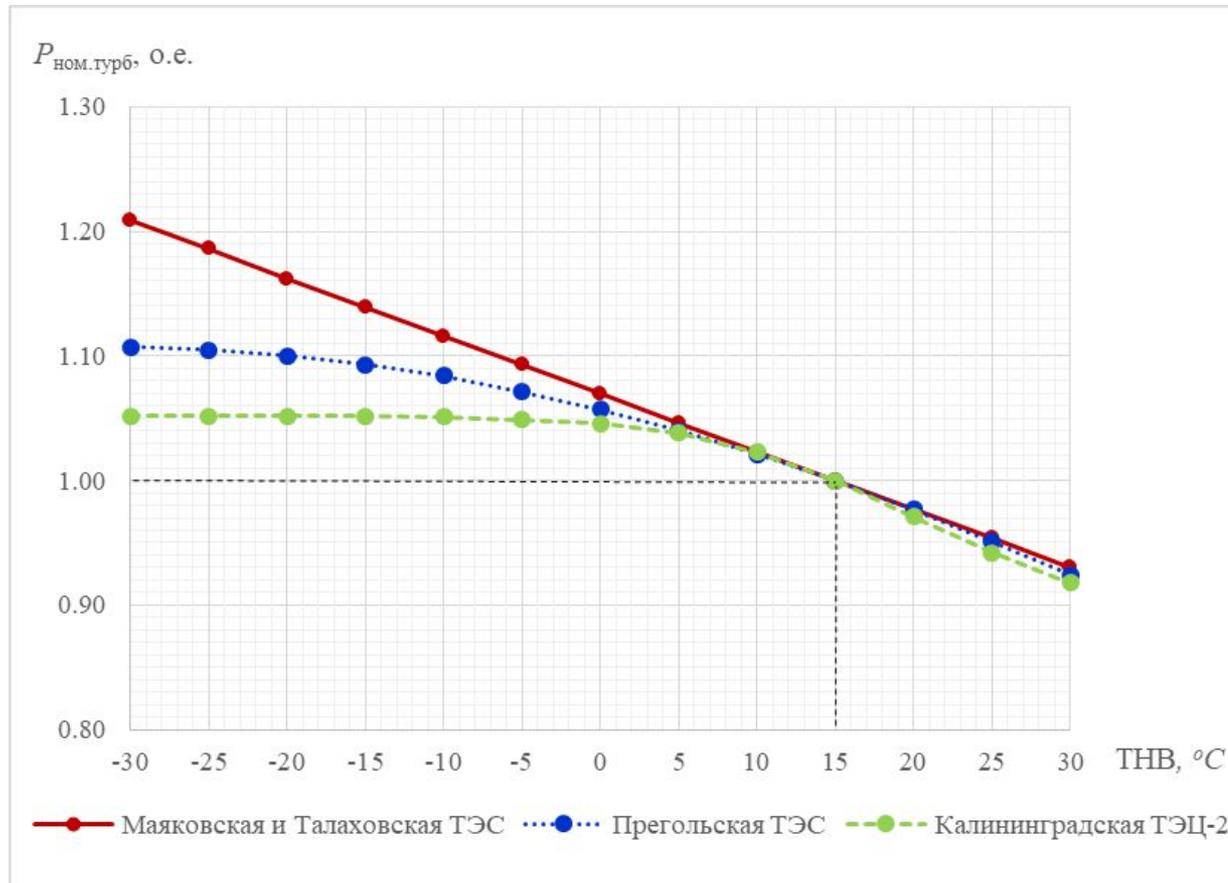
- ✓ Потребление ЭЭС – **29 ГВт**;
- ✓ ПГУ и ГТУ – 29% (8,41 ГВт), дизельные энергоблоки и ГТУ малой мощности – 5% (1,45 ГВт);
- ✓ ВЭИ – 30% (8,70 ГВт);
- ✓ «Классические» энергоблоки – **31% (8,99 ГВт)**;
- ✓ Начальный аварийный небаланс – **2,5% (0,74 ГВт)**;
- ✓ Резерв первичного регулирования – **1,00 ГВт** (около 50% резерва – аккумуляторные батареи).

На момент завершения аварии:

- ✓ Действием АЧР отключено около **3,2%** или **931 МВт** потребления, в т.ч. больница г. Ипсвич и аэропорт г. Ньюкасл.

Аналогичные события происходили во время аварий в энергосистеме **Малайзии** 03.09.1996 г. и 13.01.2005 г., а также аварий в энергосистеме **Калининградской области** 13.08.2011 г. и 11.08.2013 г.

Дополнительные слайды (1)



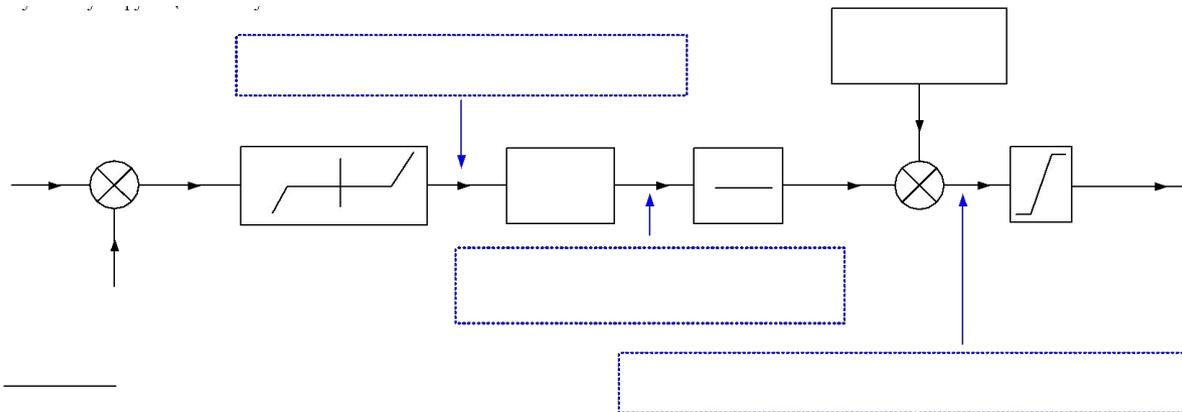
Графики зависимостей номинальных мощностей ГТУ Маяковской, Талаховской и Прегольской ТЭС от температуры наружного воздуха

Дополнительные слайды (2)

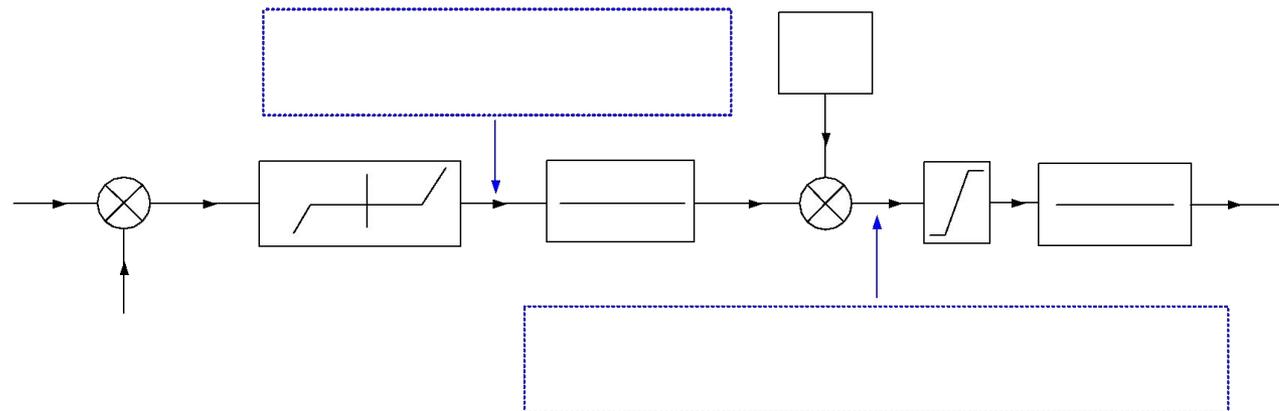
$$F(t) = \frac{d\Delta f(t)}{dt} \quad \left\{ \begin{array}{l} k_1 = h \cdot F(t_i, \Delta f_i) \\ k_2 = h \cdot F\left(t_i + \frac{h}{2}, \Delta f_i + \frac{h}{2} \cdot k_1\right) \\ k_3 = h \cdot F\left(t_i + \frac{h}{2}, \Delta f_i + \frac{h}{2} \cdot k_2\right) \\ k_4 = h \cdot F(t_i + h, \Delta f_i + h \cdot k_3) \\ \Delta f_{i+1} = \Delta f_i + \frac{1}{6} \cdot (k_1 + 2 \cdot k_2 + 2 \cdot k_3 + k_4) \end{array} \right.$$

*Система алгебраических уравнений для решения
дифференциального уравнения первого порядка по методу
Рунге-Кутты 4-го порядка*

Дополнительные слайды (3)

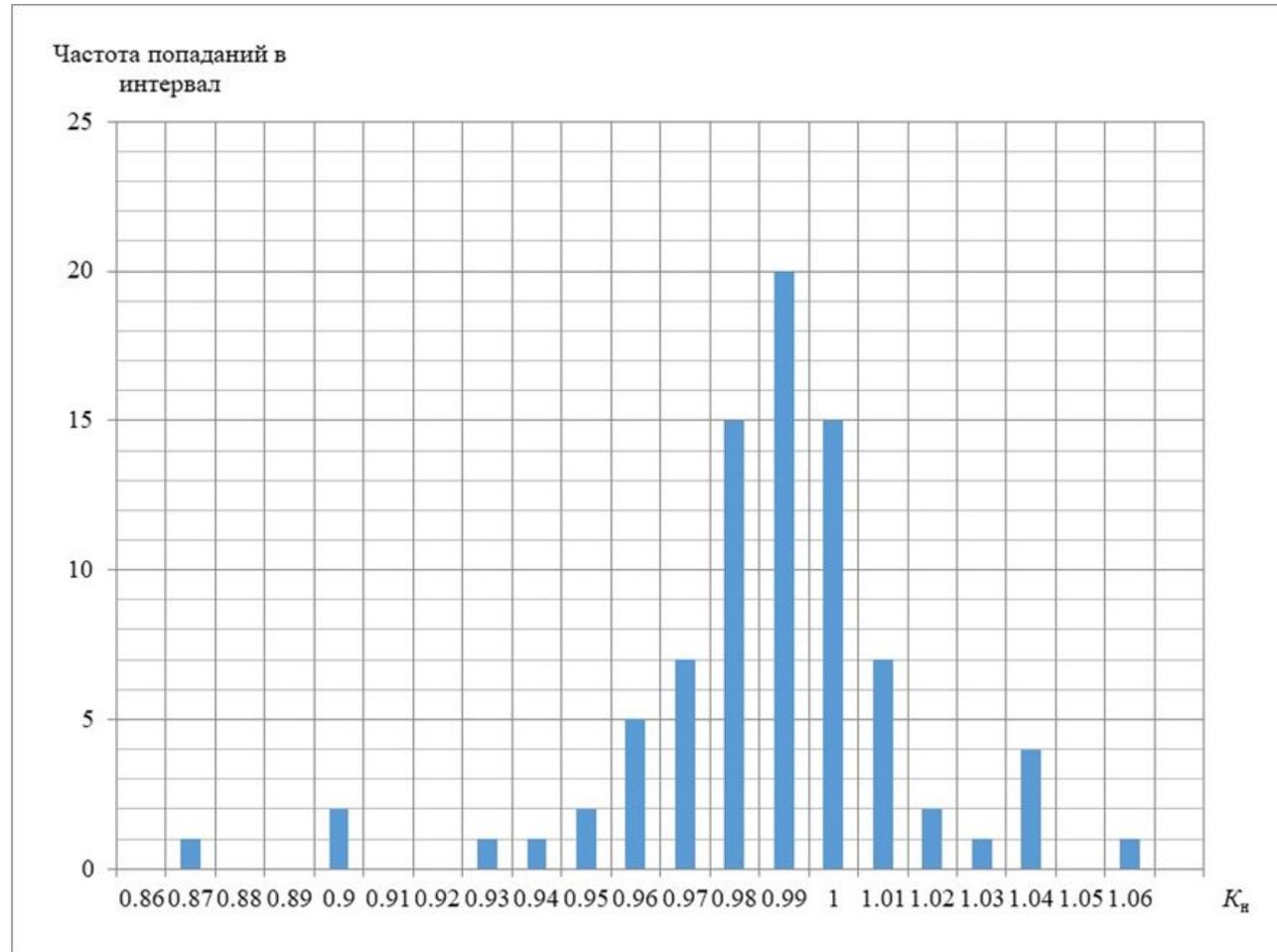


Структурная схема математической модели ГТУ, реализованной в ИСПАУ



Структурная схема математической модели «классической» ПТУ, реализованной в ИСПАУ

Дополнительные слайды (4)



Частота попадания K_n в интервалы значений от 0,86 до 1,08 длиной 0,01

Дополнительные слайды (5)

№	Параметр	Единица измерения	Расшифровка параметра	Примечание
1	«Паспортные» параметры и настройки ИСПАУ			
1.1	D_{bandi}	Гц	Зона нечувствительности автоматического регулятора частоты вращения (АРЧВ) i -го энергоблока	Паспортный параметр. Задаётся Технологом в соответствующей таблице
1.2	f_{down}	Гц	Максимально допустимый уровень снижения частоты в ЭЭС в переходе в одном процессе	Задаётся Технологом (уставка срабатывания ИСПАУ, по умолчанию равная 49,2 Гц)
1.3	$f_{max,down}$	Гц	Максимально допустимый уровень повышения частоты в ЭЭС в ПАР	Задаётся Технологом (уставка срабатывания ИСПАУ, по умолчанию равная 50,4 Гц)
1.4	$f_{min,down}$	Гц	Максимально допустимый уровень снижения частоты в ЭЭС в ПАР	Задаётся Технологом (уставка срабатывания ИСПАУ, по умолчанию равная 49,6 Гц)
1.5	$f_{ном}$	Гц	Номинальное значение частоты в ЭЭС	Внутренняя настройка ИСПАУ (50 Гц)
1.6	$FLAG$	–	Настройка ИСПАУ, определяющая приоритетность между задачами ПАУ, решаемыми подсистемами «Статика» и «Динамика»	Задаётся Технологом (1 – приоритетно обеспечение допустимой глубины снижения частоты; 0 – приоритетно недопущение повышения частоты свыше заданных значений)
1.7	h	с	Шаг интегрирования расчётного модуля подсистемы «Динамика»	Задаётся Технологом (настройка подсистемы «Динамика», по умолчанию равная 0,01 с)
1.8	$K_{ГУi}$	о.е.	Коэффициент передачи АРЧВ i -го энергоблока	Паспортный параметр. Задаётся Технологом в соответствующей таблице
1.9	$k_{ГТНБ}(T_{тек})$	о.е.	Коэффициенты зависимости номинальной мощности ГТУ от ТНВ	Паспортные параметры. Задаются Технологом в соответствующих таблицах
1.10	$P_{кри}$	о.е.	Загрузка по мощности i -го энергоблока, при котором генерирующее оборудование не участвует в первичном регулировании частоты	Задаётся Технологом (настройка подсистемы «Статика», по умолчанию равная 1,0 о.е. при участии энергоблока в первичном регулировании частоты и 0,0 о.е. – при неучастии)
1.11	$P_{т,номi}$	МВт	Номинальная мощность i -го энергоблока	Паспортный параметр. Задаётся Технологом в соответствующей таблице
1.12	$staПорi$	–	Коммутационное состояние i -го энергоблока в ПОр	Задаётся Технологом в таблице пусковых органов (1 – энергоблок участвует в ПОр, 0 – энергоблок не участвует)
1.13	T_{ji}	с	Постоянная инерции i -го энергоблока	Паспортный параметр. Задаётся Технологом в соответствующей таблице
1.14	$T_{расч.ЭМПП}$	с	Время окончания расчёта переходного процесса	Задаётся Технологом (настройка подсистемы «Динамика», по умолчанию равная 50,0 с)
1.15	$t_{ув.ИСПАУ}$	с	Время реализации УВ действием ИСПАУ	Экспериментальный или расчётный параметр (принимается одинаковым для всех ступеней ОН)
1.16	V_{pi}	МВт/с	Паспортная скорость набора мощности i -й ГТУ	Паспортный параметр. Задаётся Технологом в соответствующей таблице

Дополнительные слайды (6)

№	Параметр	Ед. измерения	Расшифровка параметра	Примечание
2	Данные из хранилища информации (ОИК)			
2.1	$sta_{доав.i}$	–	Коммутационное состояние i -го энергоблока в доаварийном режиме	Данные из ОИК (1 – энергоблок включен, 0 – энергоблок выключен)
2.2	$f_{тек}$	Гц	Текущее значение частоты в ЭЭС	Данные из ОИК (усреднённое значение по Калининградской области)
2.3	$P_{г.i}$	МВт	Загрузка i -го энергоблока по активной мощности в доаварийном режиме	Данные из ОИК (значение перетоков активной мощности по блочным трансформаторам электростанций)
2.4	$T_{тек}$	°С	Температура наружного воздуха на электростанциях	Данные из ОИК (усреднённое значение по Калининградской области)
2.5	$P_{УВ.ИСПАУ}$	МВт	Объёмы ступеней отключения нагрузки, доступные ИСПАУ	Данные из ОИК (при отсутствии точных данных используются дорасчётные величины)
3	Расчётные величины			
3.1	$\Delta P_{нб}$	МВт	Небаланс активной мощности в ЭЭС	$\Delta P_{нб} = \sum_i (P_{г.i} \cdot sta_{доав.i} \cdot sta_{ПОР.i})$
3.2	$P_{г.ном.пар.i}$	МВт	Номинальная мощность i -го энергоблока в ПАР	$P_{г.ном.пар.i} = P_{г.ном.i} \cdot sta_{доав.i} \cdot (1 - sta_{ПОР.i}) \cdot k_{ТНВ.i}(T_{тек})$
3.3	$P_{н0}$	МВт	Потребление активной мощности ЭЭС в доаварийном режиме	$P_{н0} = \sum_i (P_{г.i} \cdot sta_{доав.i})$
3.4	$\Delta P_{рез.дост}$	о.е.	Относительная величина доступного резерва активной мощности в послеаварийном режиме	$\Delta P_{рез.дост} = \frac{\sum_i P_{г.ном.пар.i} - \sum_i (P_{г.i} \cdot sta_{доав.i} \cdot (1 - sta_{ПОР.i}))}{\Delta P_{нб}}$

Ячейки первого столбца подсвечиваются зелёным цветом, если параметр, указанный в соответствующей строке таблицы используется только в подсистеме «Статика», синим – только в подсистеме «Динамика», красным – если параметр является общим для двух подсистем

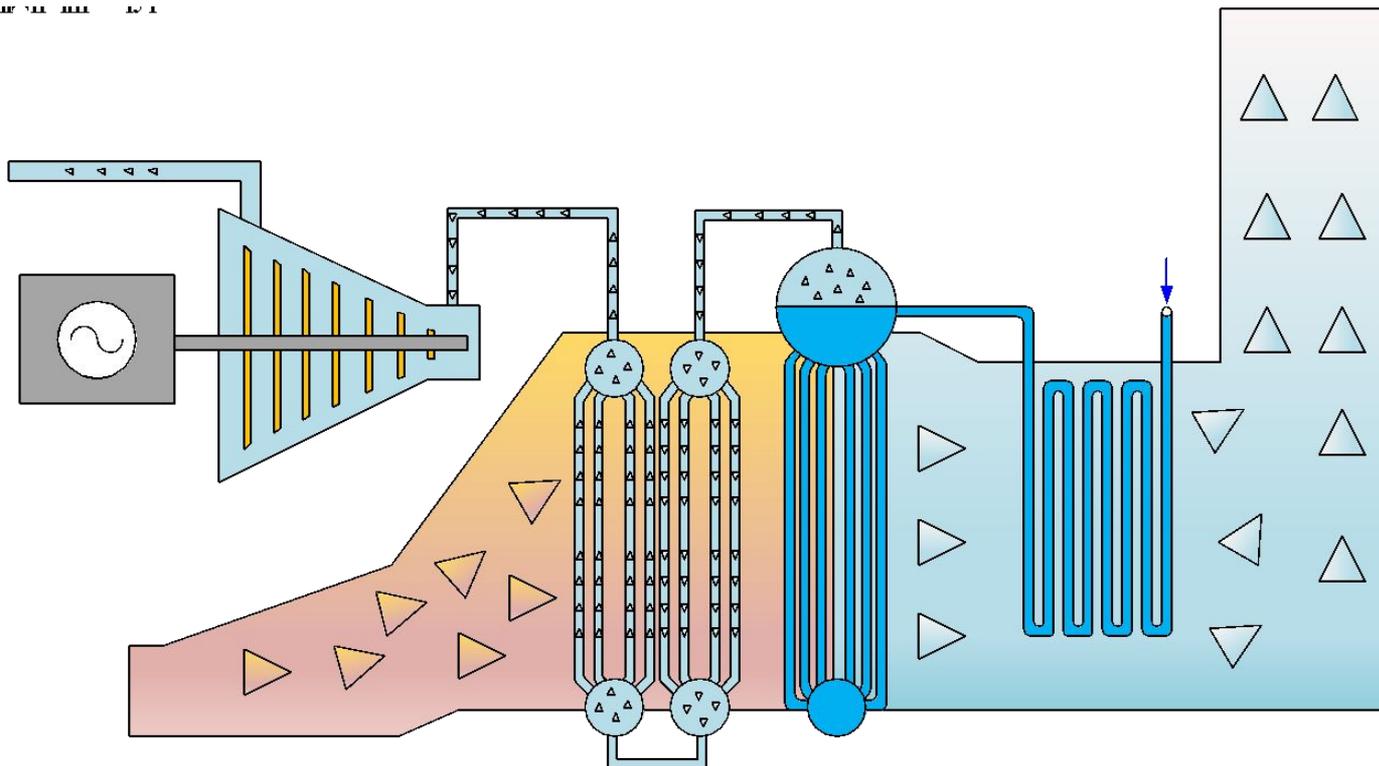
Дополнительные слайды (7)

$$\Delta P_{\text{нб}} = - \frac{T_{j\text{экв}} \cdot \Sigma P_{\text{т.ном.пар}}}{f_{\text{ном}}} \cdot \frac{df_0}{dt}$$

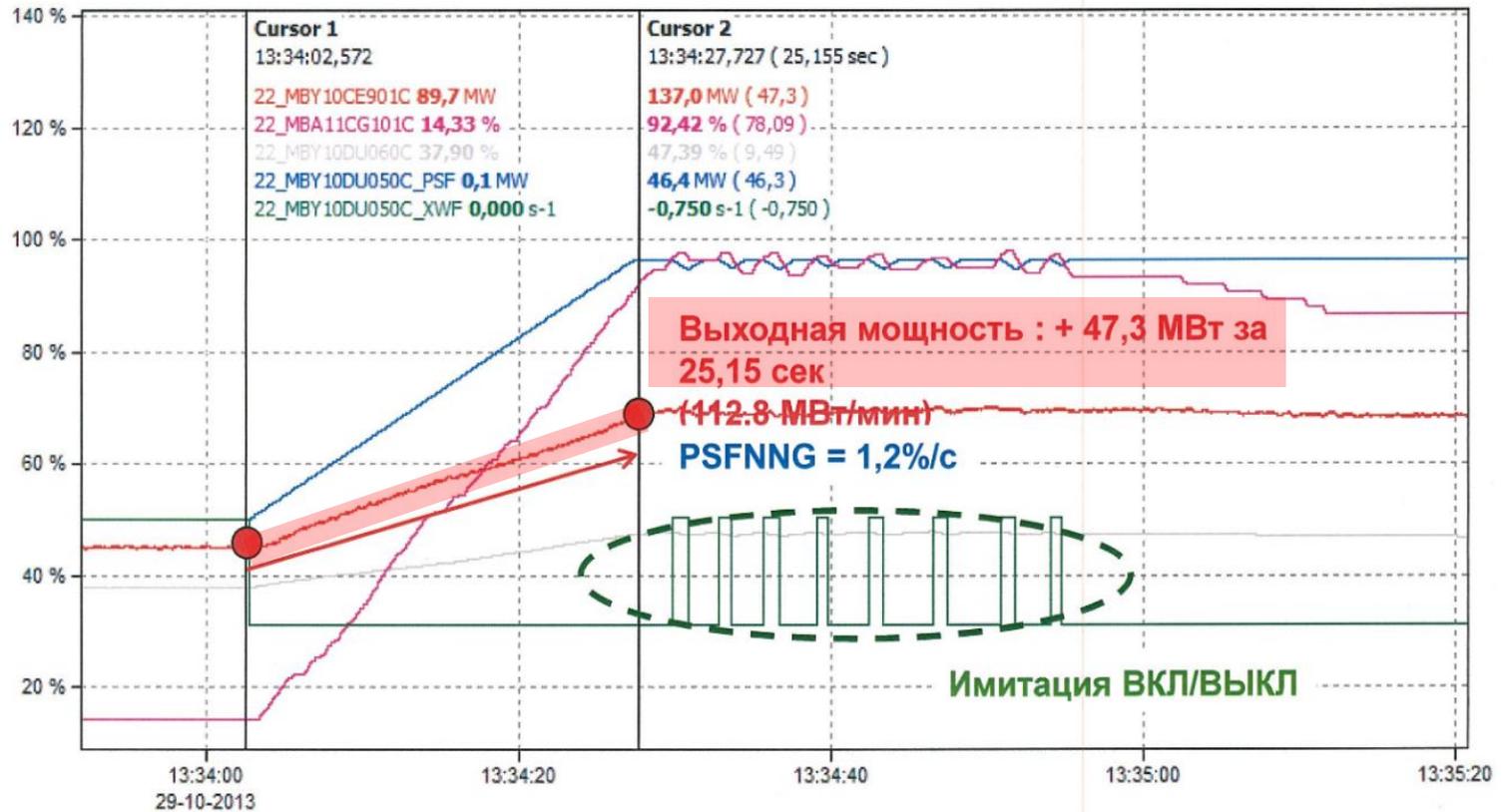
- Сложность определения точного значения производной (косвенные методы замера df_0/dt не позволяют обеспечить приемлемую точность измерений, а прямые методы требуют фильтрации гармоник, что увеличивает задержку на отключение нагрузки);
- Отсутствуют требования, регламентирующие допустимые значения df_0/dt ;
- Одно и то же значение df_0/dt может характеризоваться различными небалансами мощности в энергосистеме. Возникает сложность выбора объёмов нагрузок и уставок;
- Сложность разделения потребителей между очередями АЧР-1(2) и АЧР-С.

Дополнительные слайды (8)

4 3 2 1 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100



Дополнительные слайды (9)



Дополнительные слайды (10)

Если объём ОН равен величине $\Delta P_{\text{нб}}$, то отклонение частоты от текущего значения $f_{\text{тек}}$ будет равно 0;

Необходимо определить дополнительный объём ОН, равный A МВт, такой, чтобы отклонение частоты не превысило значение $f_{\text{max.доп}} - f_{\text{тек}}$;

Вследствие того, что отклонение частоты после реализации УВ должно быть не более $\pm 0,4$ Гц, то допустимо использование линейной зависимости между Δf и $\Delta P_{\text{нб}}$;

Известно, что величине $\Delta P_{\text{нб.доп}} = \Delta P_{\text{нб}} - \Delta P_{\text{УВ.min}}$ соответствует отклонение частоты $f_{\text{тек}} - f_{\text{min.доп}}$;

$$A \propto f_{\text{max.доп}} - f_{\text{тек}}$$

$$\square \text{ пропорция: } A = \Delta P_{\text{нб.доп}} * (f_{\text{max.доп}} - f_{\text{тек}}) / (f_{\text{тек}} - f_{\text{min.доп}})$$

$$\Delta P_{\text{нб.доп}} \propto f_{\text{тек}} - f_{\text{min.доп}}$$

Ветви алгоритмов «Статика» и «Динамика», связанные с проверкой непревышения уставки $f_{\text{max.доп}}$, фактически, нужны только при невыполнении рекомендаций по разбиению потребителей по ступеням ОН (в т.ч. если под минимальную ступень при фиксированной дискретности заведён такой объём нагрузки, реализация которого приводит к повышению частоты на величину $f_{\text{max.доп}} - f_{\text{min.доп}}$) или при выборе УВ для сложных ПОр.

Дополнительные слайды (10)

Изменение мощности i -й ГТУ в переходном процессе $P_i^{ГТУ}(t)$: ¶

$$P_i^{ГТУ}(t) = sta_{доавi} \cdot sta_{ПАРi} \cdot P_i^{ГТУ'}(t) \rightarrow \rightarrow \rightarrow$$

$$P_i^{ГТУ'}(t) = \begin{cases} P_i^{ГТУ'}(0), \text{ если } f_m \geq f_{НОМ} - D_{band\ i}^{ГТУ}; \\ k_{ТНВi} \cdot P_{НОМi}^{ГТУ}, \text{ если } P_i^{ГТУ'}(t) \geq k_{ТНВi} \cdot P_{НОМi}^{ГТУ}; \\ P_i^{ГТУ'}(0) + V_{p15} \cdot (t - t_{pi}), \\ \text{если } f_m < f_{НОМ} - D_{band\ i}^{ГТУ} \text{ и } 0 < t - t_{pi} \leq 15; \\ P_i^{ГТУ'}(0) + V_{p15} \cdot 15 + V_{p15-30} \cdot (t - t_{pi} - 15), \\ \text{если } f_m < f_{НОМ} - D_{band\ i}^{ГТУ} \text{ и } 15 < t - t_{pi} \leq 30; \\ P_i^{ГТУ'}(0) + (V_{p15} + V_{p15-30}) \cdot 15 + V_{p30-120} \cdot (t - t_{pi} - 30), \\ \text{если } f_m < f_{НОМ} - D_{band\ i}^{ГТУ} \text{ и } 30 < t - t_{pi} \leq 120 \end{cases}$$

Изменение мощности i -й конденсационной (теплофикационной) турбины в переходном процессе $P_i^{ПТУ}(t)$: ¶

$$P_i^{ПТУ}(t) = sta_{доавi} \cdot sta_{ПАРi} \cdot P_i^{ПТУ'}(t) \rightarrow \rightarrow \rightarrow$$

$$P_i^{ПТУ'}(t) = \begin{cases} P_i^{ПТУ'}(0), \text{ если } f_m \geq f_{НОМ} - D_{band\ i}^{ПТУ}; \\ -T_{ni} \cdot \frac{dP_i^{ПТУ'}(t)}{dt} + P_{НОМi}^{ПТУ}, \\ \text{если } K_{сfi} \cdot P_{НОМi}^{ПТУ} \cdot \left(1 - \frac{f_m - D_{band\ i}^{ПТУ}}{f_{НОМ}}\right) + P_i^{ПТУ'}(0) \geq P_{НОМi}^{ПТУ}; \\ -T_{ni} \cdot \frac{dP_i^{ПТУ'}(t)}{dt} + K_{сfi} \cdot P_{НОМi}^{ПТУ} \cdot \left(1 - \frac{f_m - D_{band\ i}^{ПТУ}}{f_{НОМ}}\right) + P_i^{ПТУ'}(0), \\ \text{если } f_m < f_{НОМ} - D_{band\ i}^{ПТУ} \end{cases}$$