САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «ЛЭТИ»
им . В. И. Ульянова (Ленина)

КАФЕДРА АВТОМАТИКИ
И ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ (АПУ)

Проектирование активных систем отказоустойчивого управления техническими объектами

Докл. Зав. каф. АПУ, д.т.н. Шестопалов М.Ю.

25 октября 2017 г.

Санкт-Петербург

СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

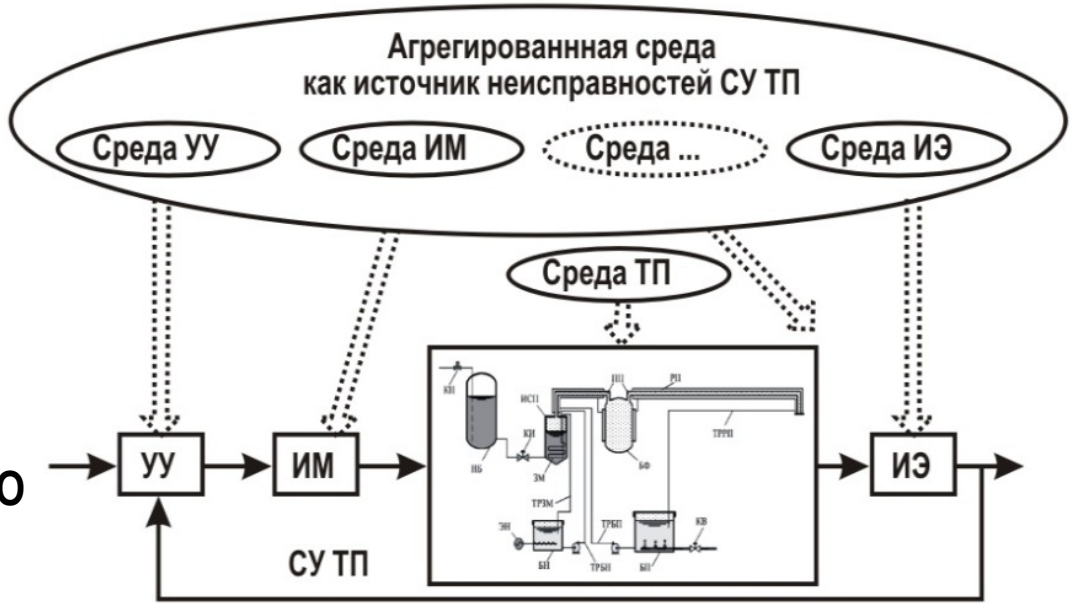
Известные работы	Актуальность дальнейших исследований
1. Объектно-ориентированность (авиация, ядерная энергетика) 2. Типовые структуры 3. Аппаратная избыточность 4. Моделирование неисправностей как вариации параметров 5. Восстановление свойств передач (по каналам воспроизведения заданий) 6. Восстановление как подстройка параметров 7. Исследования во временной области по моделям в форме пространства состояний	1. Ориентация на класс математических моделей систем управления 2. Произвольные структуры 3. Алгоритмическая (аналитическая, программная) избыточность 4. Моделирование неисправностей как вариации структур операторов и топологии систем 5. Восстановление запасов устойчивости и свойств инвариантности 6. Восстановление путем реструктуризации и реконфигурирования топологии 7. Методы разработки СОУ в комплексно-частотной области

ПРИНЯТЫЕ КОНЦЕПЦИИ

1. СУ ТП - ИНФОРМАЦИОННО-АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ комплексы, обеспечивающие функционирование ТП в условиях возмущающих воздействий.

2. НЕИСПРАВНОСТИ - возмущения среды вышележащего по отношению к «штатной» среде ТП уровня иерархии.

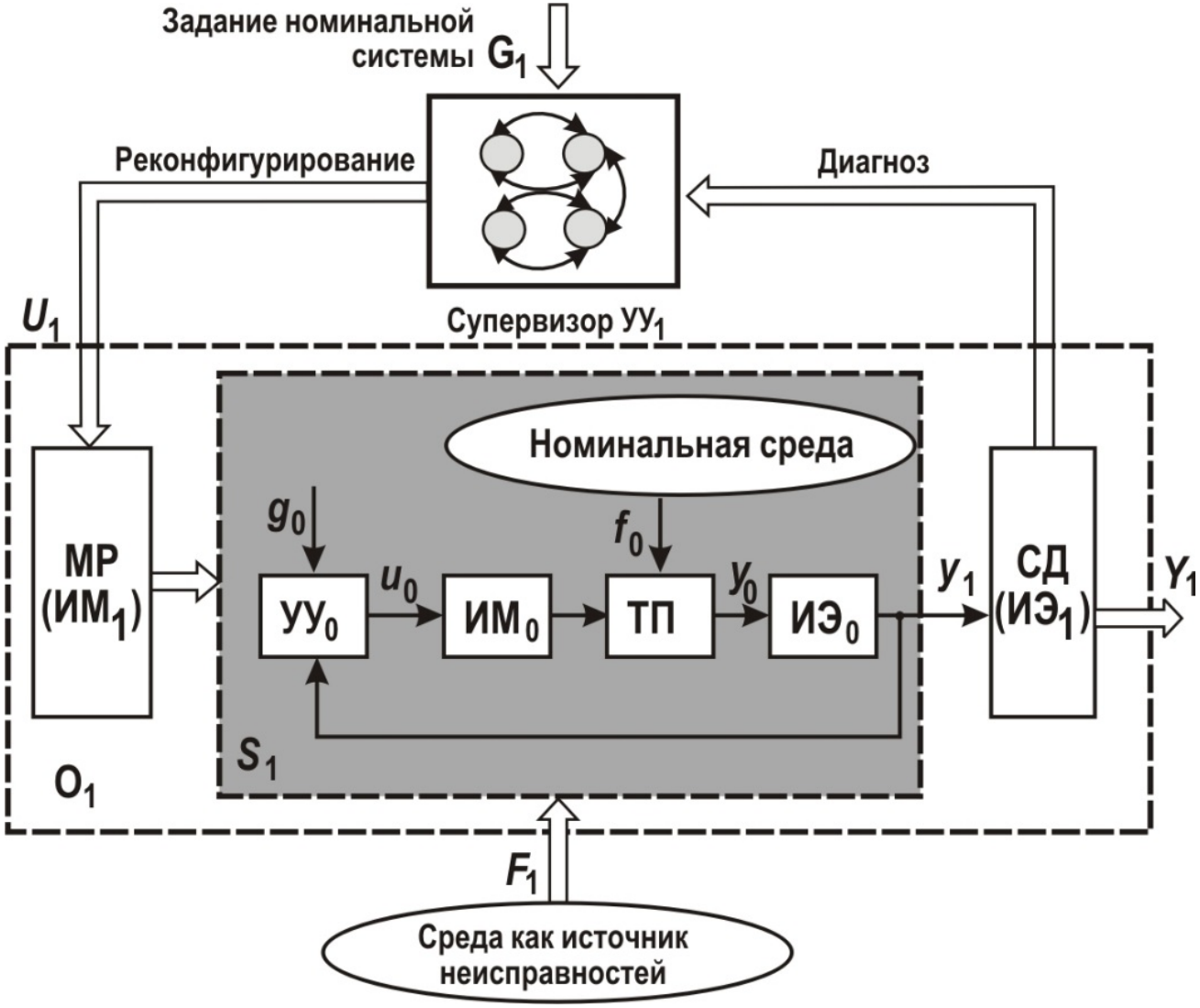
3. РАСШИРЕННЫЙ ОБЪЕКТ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОГО УПРАВЛЕНИЯ (ООУ):



4. Концепция ДИСКРЕТНО-СОБЫТИЙНОГО ООУ. Дискретными состояниями, входами и выходами ООУ (событиями) являются множества стационарных систем.

5. Концепция ИЕРАРХИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ. Активные СОУ образуют вышележащие по отношению к СУ ТП уровни иерархии.

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ ОБОБЩЕННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СОУ



Система 2-го уровня S2 – СОУ с раскрытым ООУ

Концептуальная модель СОУ непрерывных ТП.

Концептуальную модель *K* активной СОУ определим как пару – бинарное несимметричное отношение *M* на множестве *D*:

K=<D,M>,

где *D*={Основная СУ ТП в номинальной среде;

Среда функционирования *F1* как источник неисправностей;

Подсистема диагностики СД (ИЭ1);

Супервизор УУ1;

Механизм реконфигурирования МР (ИМ1)}.

Элементы бинарного отношения - упорядоченные пары

***M*={(СУ ТП *S1*, Среда *F1*)**

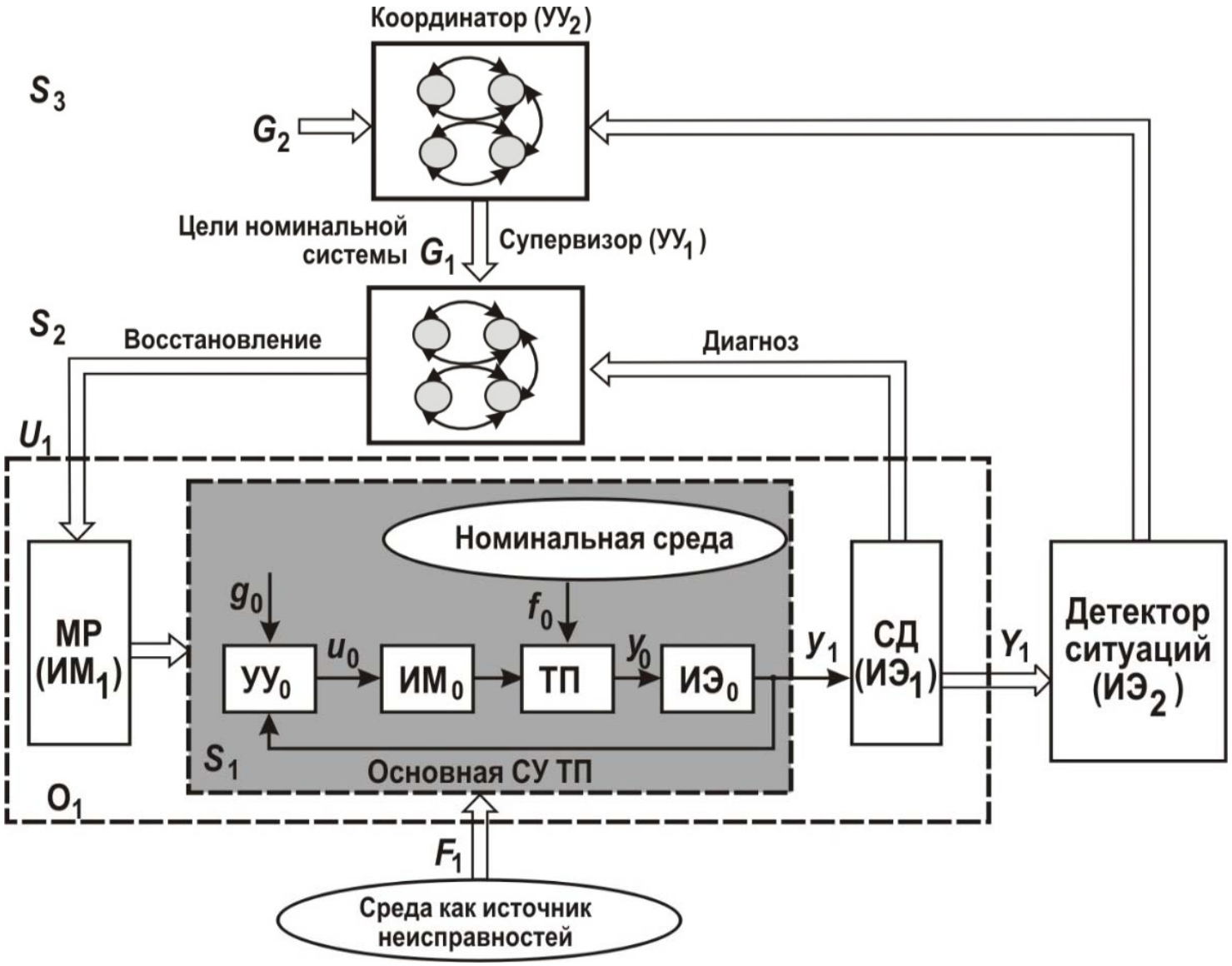
(СУ ТП *S1*, МР)

(СД, СУ ТП *S1*),

(Супервизор, СД),

(МР, Супервизор) }

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ТРЕХУРОВНЕВОЙ СОУ

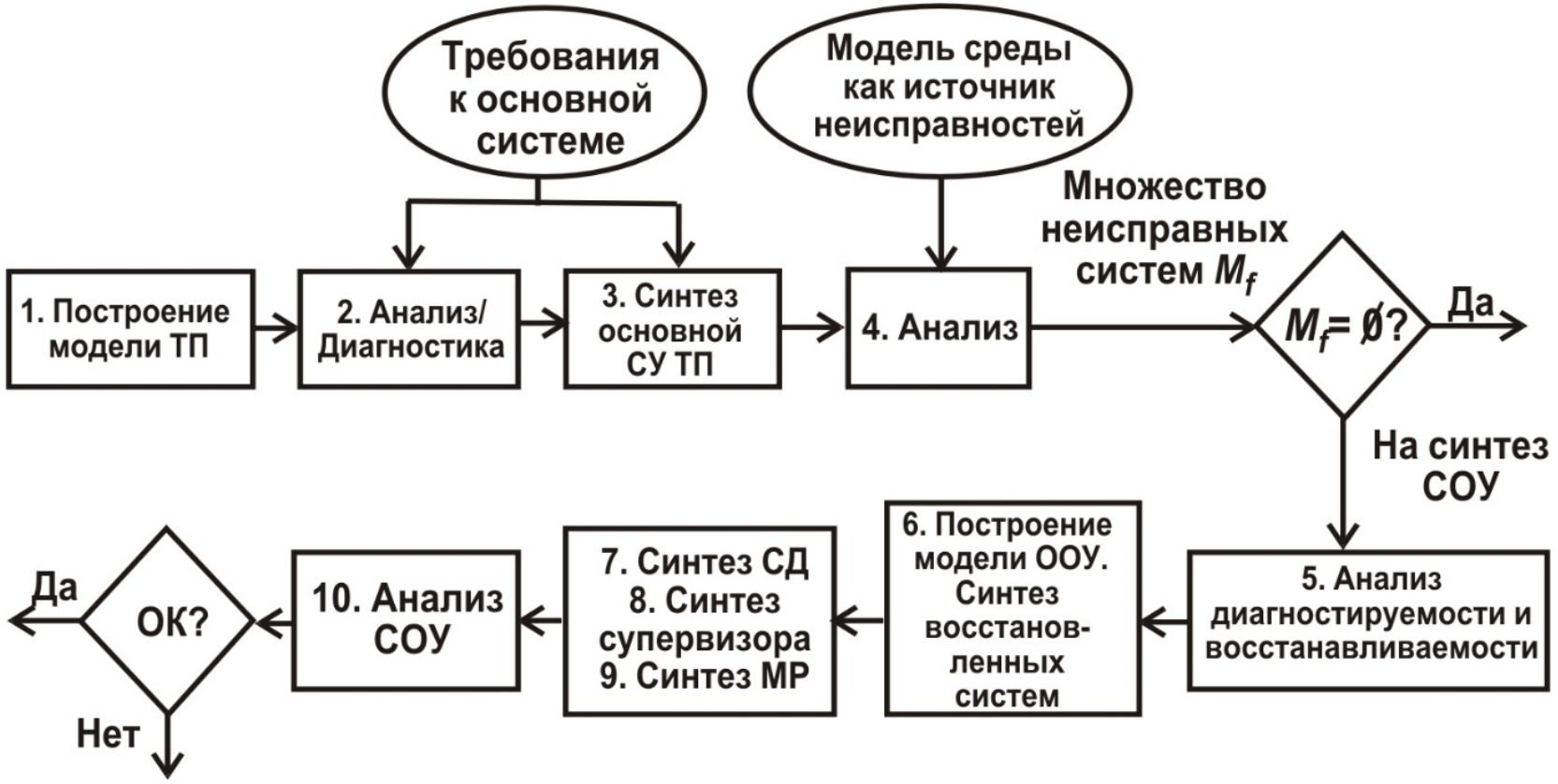


ИНТЕГРИРОВАННЫЙ ПОДХОД К СИНТЕЗУ СОУ ТП

Синтез СОУ ТП рассмотрим для следующих случаев:

1 - проектирование «основной» СУ ТП во взаимосвязи с СОУ ТП;

2 - модернизация системы управления ТП за счет введения элементов СОУ ТП

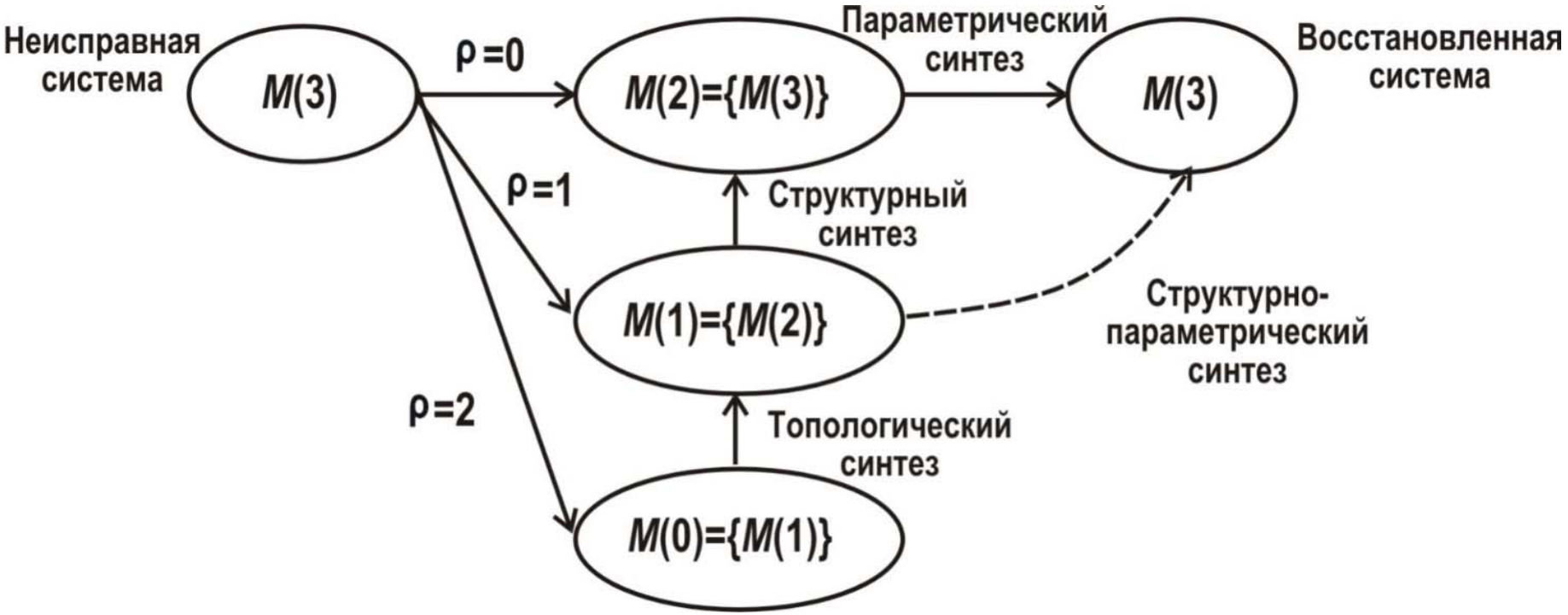


Моделирование и анализ ТП, проектирование «основной» СУ ТП и функционирование СОУ ИНТЕГРИРУЮТСЯ В ЕДИНЫЙ ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ

«ЭВОЛЮЦИИ» НЕИСПРАВНОЙ СИСТЕМЫ

Последовательность восстановления неисправных систем

$$M_S(1) \to M_S(2) \to M_S(3) \to M_{YSF}(1) \to M_{YSF}(2) \to M_{YSF}(3) \to M_{RS} \ldots$$



Параметрический синтез – <u>подстройка параметров</u>

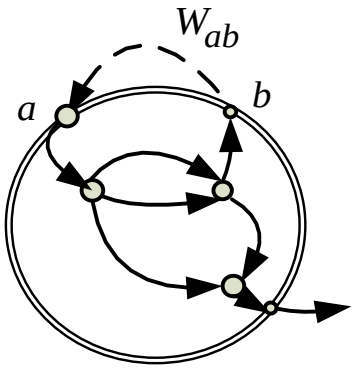
Структурный синтез – <u>реструктуризация</u>

Топологический синтез – <u>реконфигурация</u>

ОПТИМАЛЬНОЕ РЕКОНФИГУРИРОВАНИЕ СУ

Единственный способ восстановления СУ, потерявших запас устойчивости, - изменение контурной части системы:

- ***реконфигурирование*** **- введение дуги** (a,b) **для образования новых контуров в графе. Изменение топологии – модели первого ранга** $M_S(1)$ **;**
- ***реструктуризация*** **– изменение модели второго ранга** $M_S(2)$ **- структуры оператора дуги** $W_{ab}(s)$ **;**
- ***подстройка параметров*** **– изменение модели третьего ранга** $M_S(3)$



Необходимое условие восстанавливаемости — селективная управляемость «плохих» корней ХП по каналу:

$$\Phi_{ba}(s_i) \neq 0$$

Если единственный вариант (a,b) **удовлетворяет условию, то задача реконфигурирования решена.**
Несколько вариантов $\{(a,b)\}$ **- поиск наилучшего места.**
ОСНОВНАЯ ПРОБЛЕМА: неизвестен оператор вводимой дуги $W_{ab}(s)$ **.**

Критерии ***потенциальной эффективности*** **на множестве** $\{(a,b)\}$ **.**

- **идентифицированы «плохие» с.з.** s_i **:** $\operatorname{mod} T^{\Delta}_{ab}(j|s_i|)\ \underset{\Omega}{\rightarrow}\ \max$ **или** $\operatorname{mod}\Phi_{ba}(j|s_i|)\rightarrow \max$ **;**
- **идентифицирован интервал частот** Ω **, определяющий запасы устойчивости:**

$$\operatorname{mod} T^{\Delta}_{ab}(j\omega)\ \underset{\Omega}{\rightarrow}\ \max \quad \text{или} \quad \operatorname{mod}\Phi_{ba}(j\omega)\xrightarrow[\Omega]{}\max .$$

ВЫВОД: оптимальный вариант реконфигурирования обеспечивает требуемое перемещение «плохих» с.з. при минимальной сложности восстановленной СУ (минимальном усилении дуги на существенных частотах).

МЕТОД РЕСТРУКТУРИЗАЦИИ НЕИСПРАВНЫХ СУ

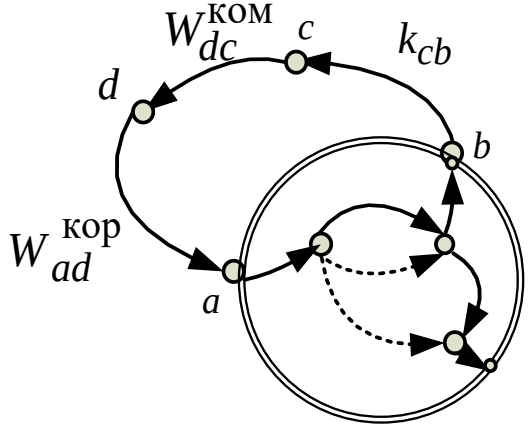
Задача: выбор структуры оператора дуги (a,b). Предлагается последовательное формирование («эволюция») ПФ

$$W_{ab}(s) = W_{dc}^{\text{ком}}(s)\, k_{cb}\, W_{ad}^{\text{кор}}(s) \ ,$$

где $W_{dc}^{\text{ком}}(s)$ - компенсатор, обеспечивающий селективную неуправляемость «хороших» полюсов ПФ , путем введения нулей z_j ;

k_{cb} - усилитель, обеспечивающий подвижность «плохих» корней ХП;

$W_{ad}^{\text{кор}}$ - корректор, обеспечивающий желаемое перемещаемых корней.



Метод реструктуризации основан на:

- вычисления ПФ систем со сложной структурой;

- представления ПФ в факторизованной форме

$$K_{\text{e}}(s) = \Phi_{ba}(s) W_{ab}(s) = k \frac{\prod_j (s - z_j)}{\prod_i (s - p_i)}$$

позволяющей контролировать условия компенсации нулей z_j и полюсов p_i ;

- создания искусственных условий селективной (избирательной) управляемости;

- построения ЛАЧХ $L_{\text{e}}(\omega) = 20\lg\left|K_e(j\omega)\right|$.

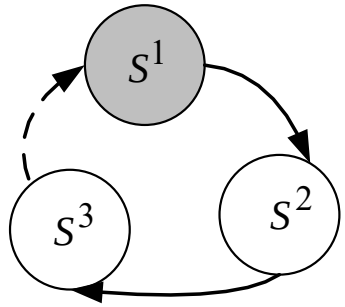
СИНТЕЗ СЛОЖНЫХ СУ

При синтезе ССУ в полном объеме решаются задачи синтеза СУ подсистем, а кроме того, возникают задачи организации их коллективного поведения.

Схемы синтеза ССУ зависят от степени АВТОНОМНОСТИ подсистем:

1 – синтез подсистем с последующим их ИНТЕГРИРОВАНИЕМ в ССУ, сопровождаемым анализом роли взаимосвязей, а при необходимости, их компенсацией;

2 – ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЙ синтез с учетом связей между подсистемами.



МЕТОДИКА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО СИНТЕЗА **иллюстрируется на примере ТП подготовки паров ТКН, модель которого образуют взаимосвязанные подсистемы** $\{M_{S1}\, M_{S2}\, M_{S3}\, M_{S4}\}$.

«Восстановление» ТП сводится к последовательному устранению недостатков подсистем в любом порядке, например: $M_{S1} \rightarrow M_{S2} \rightarrow M_{S3} \rightarrow M_{S4}$.

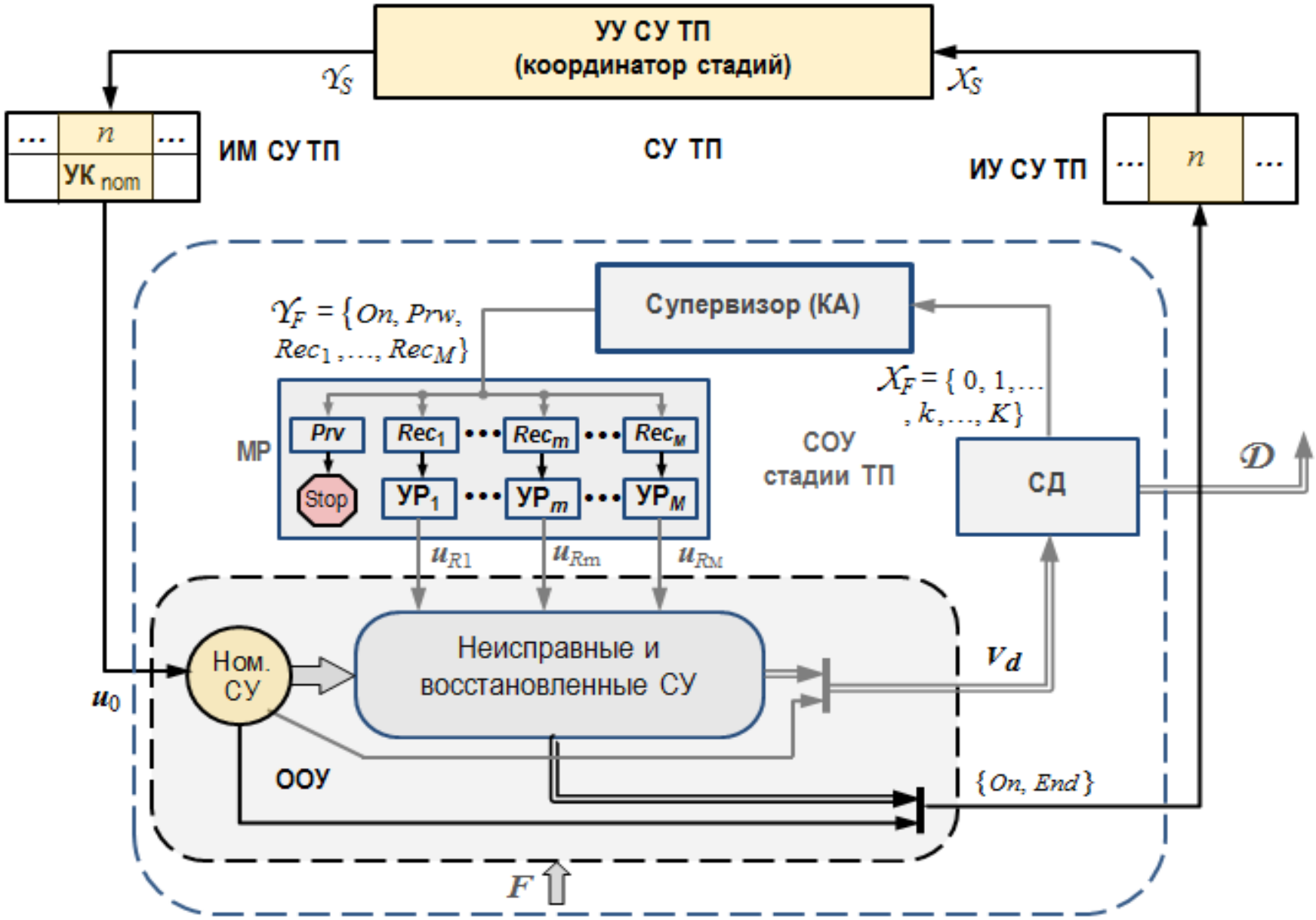
Если синтез последующей подсистемы $M_{S(i+1)}$ **недопустимо нарушает качество подсистемы** $M_{S(i)}$ **, т. е. относительно сильны взаимосвязи подсистем, то:**

- **повторить процедуры синтеза подсистем с целью повышения усилений контуров подсистем, что ослабляет относительное влияние контуров взаимосвязи;**
- **невозможна декомпозиция — следует объединить подсистемы.**

ПРОЦЕСС ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО СИНТЕЗА **сходится, если возможна:**

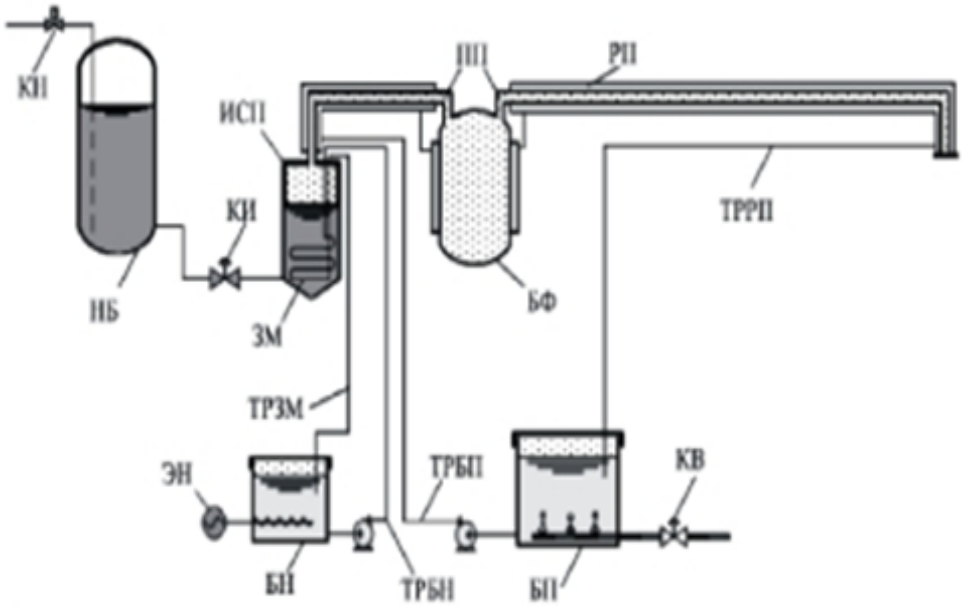
- **топологическая декомпозиция графа на автономные подсистемы;**
- **частотная декомпозиция (относительно высокочастотные СУ подсистем и низкочастотные контуры взаимодействия подсистем).**

СТРУКТУРА СОУ УРОВНЯ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

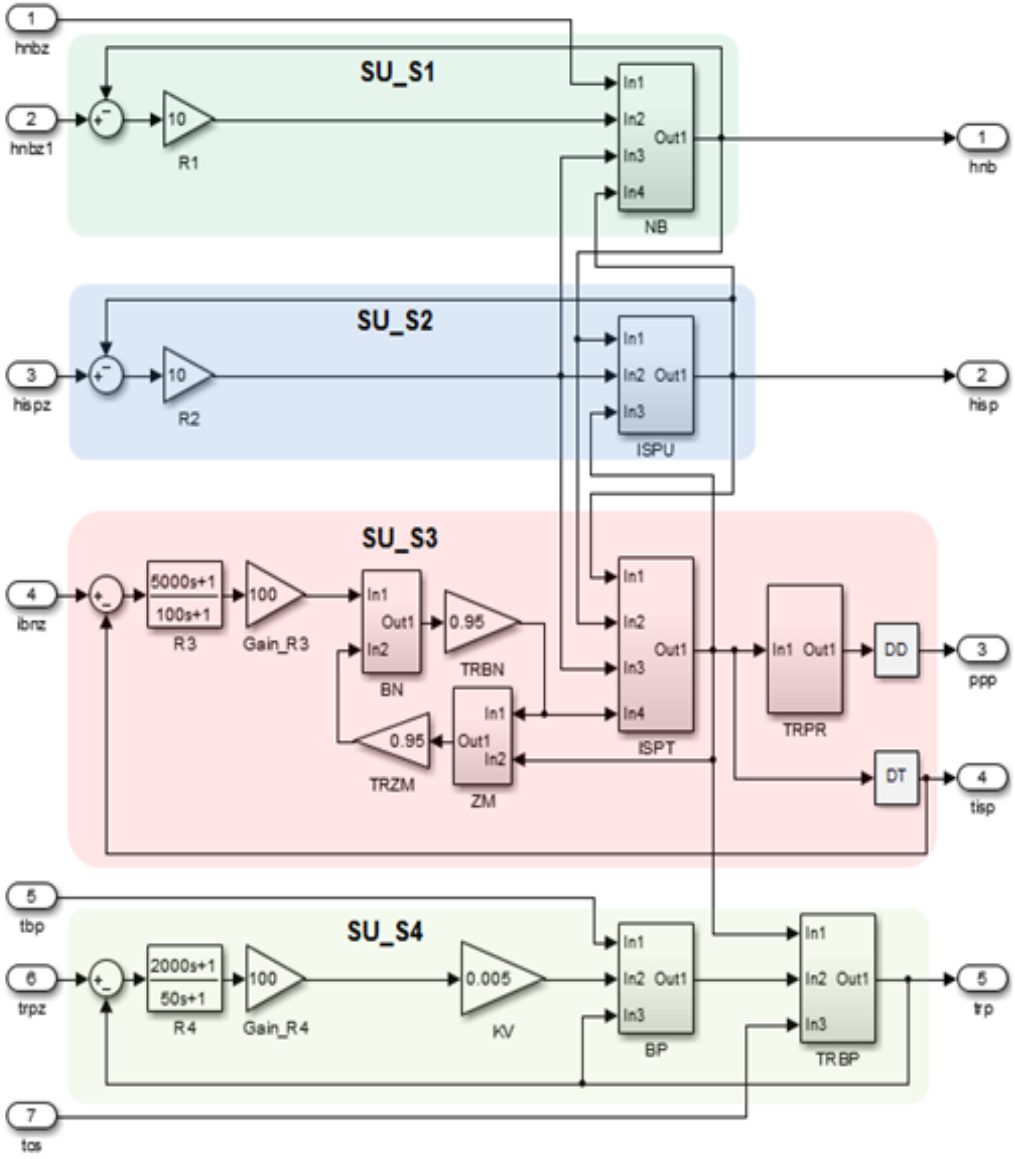


ПРИМЕР РАЗРАБОТКИ СОУ ПОДСИСТЕМЫ ТП

ТП приготовления паров ТКН никелевого производства

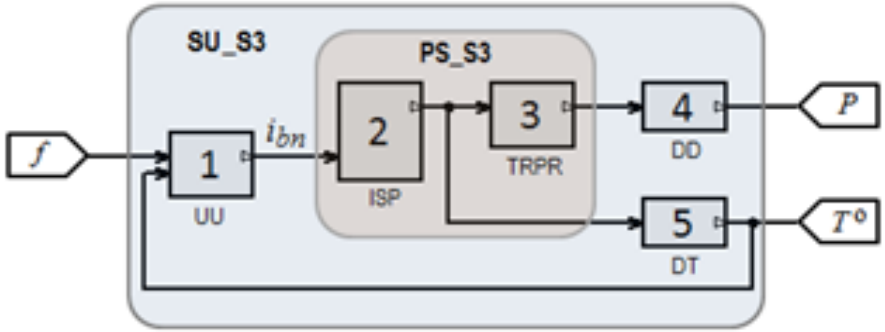


Система децентрализованного управления ТП



СИНТЕЗ СОУ ПОДСИСТЕМЫ *S3* ТП ПОДГОТОВКИ ПАРОВ ТКН

Укрупненная схема СУ *S3*



Потенциальные неисправности СУ *S3*

Номер неиспр.	Неисправность
1	Отказ главной ОС (5→1)
2	Отказ датчика температуры DT
3	Отказ датчика давления DD
4	Отказ управляющего устройства UU
5	Критическая температура
6	Критическое давление

Требования к СОУ *S3*

1. Диагностирование перечисленных неисправностей
2. Восстановление SU S3 при возможности реконфигурации
3. Корректное завершение ТП при критическом развитии неисправности

Восстановление (реконфигурация) в рамках СУ S3 – перенос ОС на датчик давления DD при отказах ОС (5→1) или датчика температуры DT

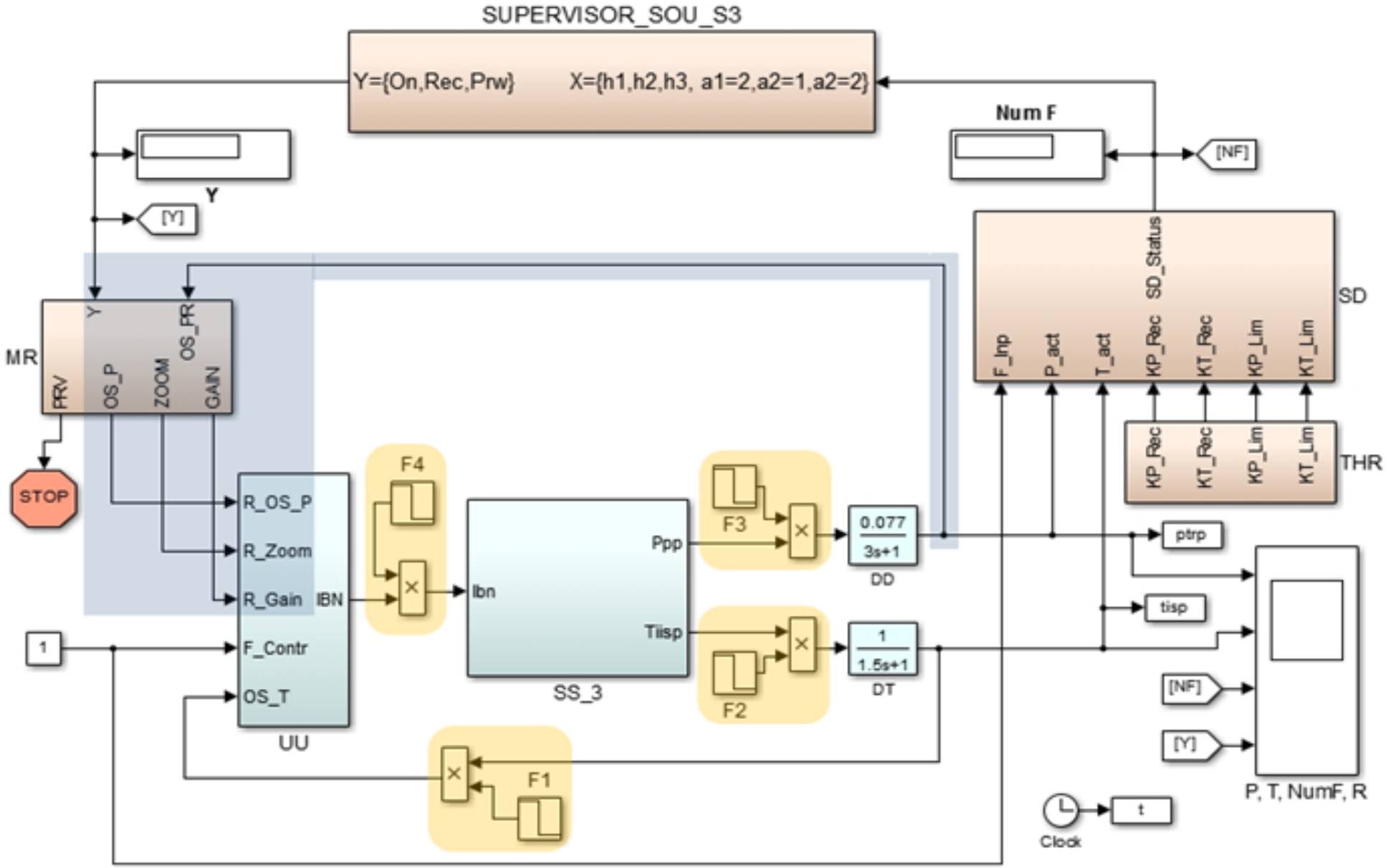
Топологический анализ

Объекты модели		Диагностируемые передачи $\Phi(f\to P)$ Φ_P	Диагностируемые передачи $\Phi(f\to T)$ Φ_{T^o}
Блоки M_S	1	++	++
	4	++	
	5	+	++
Связи M_S	(1→2)	++	++
	(2→5)	+	++
	(3→4)	++	
	(5→1)	+	+
Среда на входе	*f*	++	++
	(*f*→1)	++	++
Среда на выходе	*P*	++	
	(4→*P*)	++	
	T^o		++
	(5→*T*)		++

По результатам топологического анализа сформированы симптомы и локализованы неисправности блоков и связей СУ

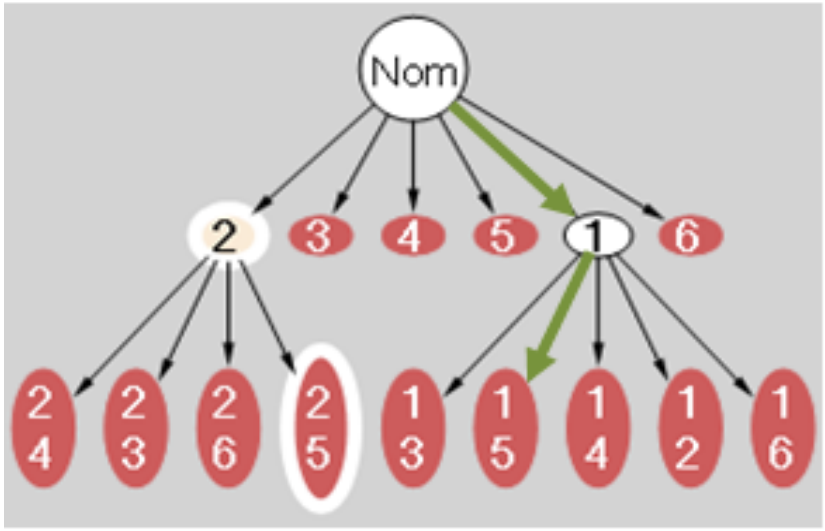
Номер симптома	Симптом ➡ Диагноз: Вариация или отказ передачи	Отказ блока или отказ связи
1	$(\tilde{\Phi}_P \wedge \tilde{\Phi}_T)$	$\{(5 \not\to 1)\}$
2	$(\Phi^0_P \wedge \Phi^0_T)$	$\{BL_1 \vee (1 \not\to 2)\}$
3	$(\tilde{\Phi}_P \wedge \Phi^0_T)$	$\{BL_5 \vee (2 \not\to 5)\}$
4	Φ^0_P	$\{BL_4 \vee (3 \not\to 4) \vee BL_P \vee (4 \not\to P)\}$
5	Φ^0_T	$\{BL_T \vee (5 \not\to T)\}$

КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ СОУ ПОДСИСТЕМЫ *S3*

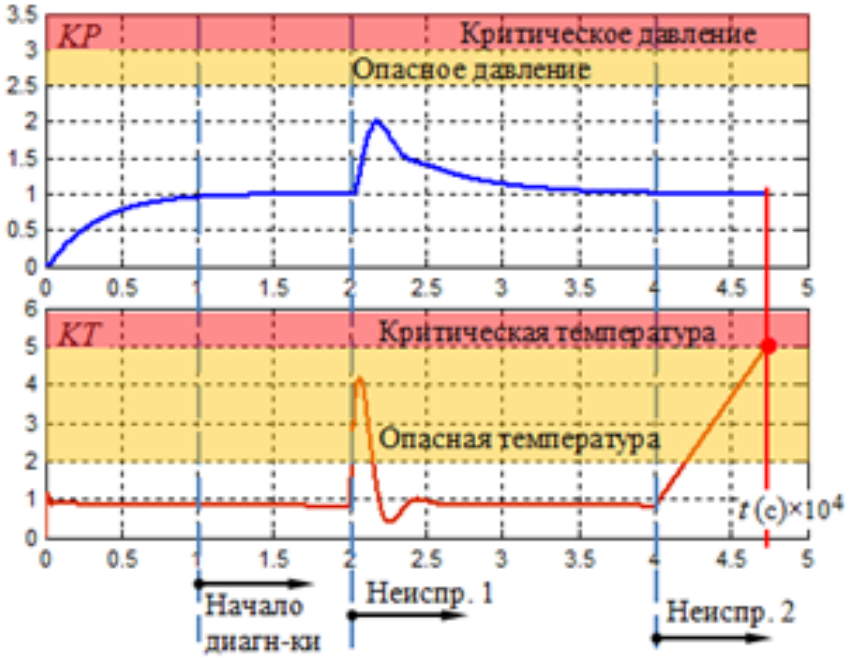


Реакция СОУ S3 на неисправности

Номер неиспр.	Действия СОУ
1	Восстановление СУ
2	Восстановление СУ
3	Завершение ТП
4	Завершение ТП
5	Завершение ТП
6	Завершение ТП



Графики изменений коэффициентов передач по давлению KP и по температуре KT при действии потока из двух неисправностей



Фиксация "журналом ТП" постановок диагнозов и действий СОУ

Figure 1: Process log

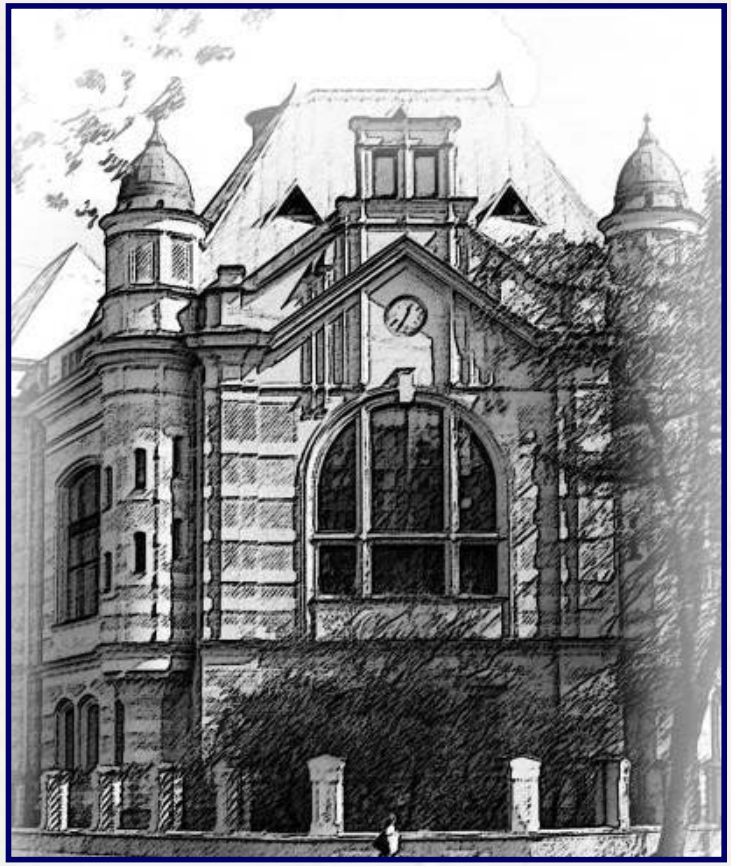
```
Время: 10000, Начало диагностирования
Время: 20147, Опасная температура
Время: 20147, Отказ главной ОС
Время: 20147, Реконфигурация
Время: 47334, Критическая температура
Время: 47334, Остановка
```

КАФЕДРА АВТОМАТИКИ
И ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ (АПУ)

КНИГИ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «ЛЭТИ»
им . В. И. Ульянова (Ленина)

КАФЕДРА АВТОМАТИКИ
И ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ (АПУ)



БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ!