



НИУ «МЭИ»  
Каф. РЗиАЭ



АО «НТЦ ФСК ЕЭС»



АО «СО ЕЭС»

# Комплекс РЗА с гибкой функциональной структурой

Васильев Р.В., Грачева Н.П.,  
Волошин Е.А., Волошин А.А.,  
Жуков А.В.,

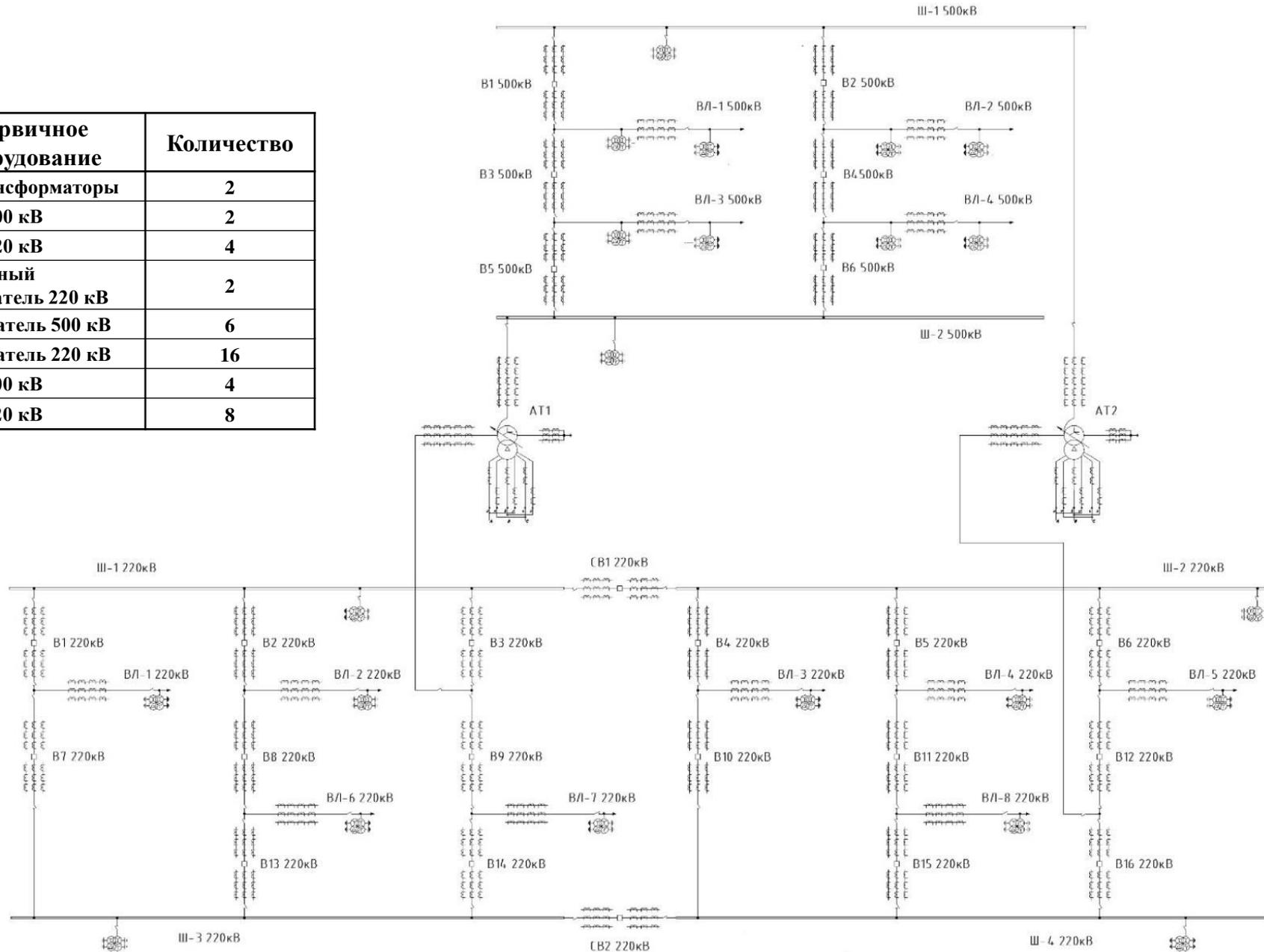
Октябрь 2017

# Гибкая функциональная структура РЗА ЦПС

1. Свободное распределение функций РЗА по МП терминалам.
2. Оперативная реконфигурация функциональной структуры при отказах отдельных элементов (перераспределение функций РЗА)
3. Сокращение количества и типов применяемых МП терминалов
4. Повышение надежности - новые подходы к обеспечению резервирования РЗА (отказ устройства не приводит к потере функций)
5. Создание универсальных аппаратных платформ РЗА
6. Новая архитектура комплекса РЗА для ЦПС с высокой технико-экономической эффективностью

# Схема подстанции

| Первичное оборудование        | Количество |
|-------------------------------|------------|
| Автотрансформаторы            | 2          |
| Шины 500 кВ                   | 2          |
| Шины 220 кВ                   | 4          |
| Секционный выключатель 220 кВ | 2          |
| Выключатель 500 кВ            | 6          |
| Выключатель 220 кВ            | 16         |
| Линия 500 кВ                  | 4          |
| Линия 220 кВ                  | 8          |



## Результаты разработки комплекса РЗА подстанции 500/220/10 кВ

На основании норм технологического проектирования подстанций переменного тока с высшим напряжением 35-750 кВ ПАО «ФСК ЕЭС» был сформирован перечень функций РЗА, необходимых для защиты первичного оборудования рассматриваемой подстанции, насчитывающий **168** позиций.

При проектировании структуры РЗА подстанции традиционными методами для реализации указанных функций потребуется минимум **74** терминала релейной защиты.

| Первичное оборудование             | Кол-во терминалов |
|------------------------------------|-------------------|
| Автотрансформаторы (x2)            | 20                |
| Шины 500 кВ (x2)                   | 4                 |
| Шины 220 кВ (x4)                   | 8                 |
| Секционный выключатель 220 кВ (x2) | 10                |
| Выключатель 500 кВ (x6)            | 12                |
| Выключатель 220 кВ (x16)           | 32                |
| Линия 500 кВ (x4)                  | 16                |
| Линия 220 кВ (x8)                  | 16                |
| <b>Итого</b>                       | <b>118</b>        |

Однако при анализе схем ИТС аналогичных существующих объектов выяснилось, что для осуществления релейной защиты первичного оборудования на реальной подстанции будет задействовано более **118** терминалов (без учета большей части противоаварийной автоматики, ОМП и регистраторов аварийных событий).

# **АНАЛИЗ УСЛОВИЙ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ СИНТЕЗА ОПТИМАЛЬНОЙ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ НА РАЗНЫХ СТАДИЯХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА РЗА**

## **Условия применения ОМ на стадии проектирования РЗА**

- 1) Отсутствуют ограничения по составу и количеству СПК**
- 2) Отсутствуют ограничения по времени выполнения ОМ**
- 3) Решение задачи оптимизации может выполняться на пользовательском компьютере проектировщика РЗА. Использование СПК не требуется**
- 4) Необходимая исходная информация о схеме защищаемой электрической сети вводится «вручную» проектировщиком**

## Целевая функция для стадии проектирования РЗА

$$y(x) = \sum_{i=1}^n (\Delta CPU_i(x) + \Delta LAN_i(x) + Cost_i(x) + RW_i(x))$$

$x$  – вектор адресов функций РЗА;

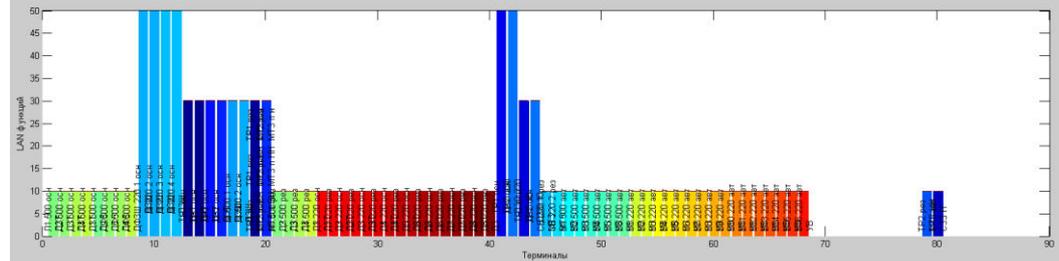
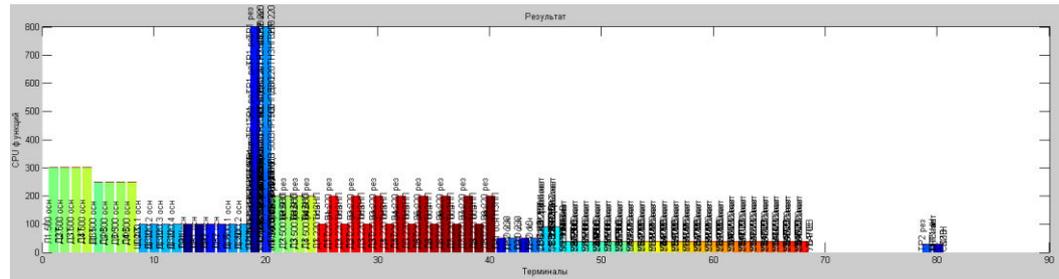
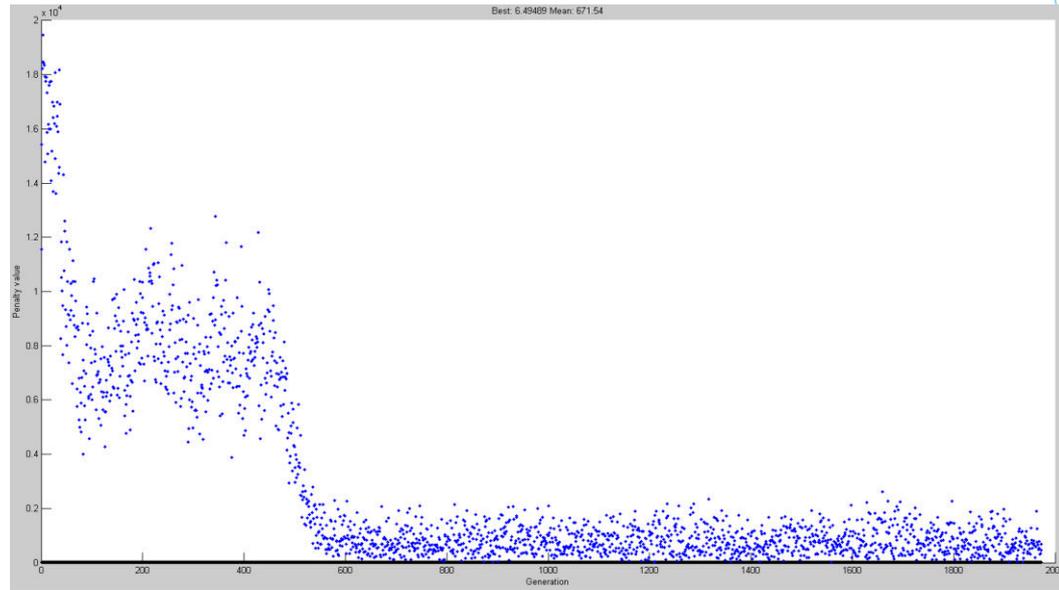
$\Delta CPU_i(x)$  – весовая функция загрузки (перегрузки) CPU  $i$ -го СПК;

$\Delta LAN_i(x)$  – весовая функция загрузки (перегрузки) коммуникационных интерфейсов  $i$ -го СПК;

$Cost_i(x)$  – весовая функция учета стоимости  $i$ -го СПК;

$RW_i(x)$  – весовая функция учета правил функционального резервирования.

# Результаты работы ОМ на базе генетического алгоритма (пс 500/220/10 кв)



# Оценка эффективности применения ОМ при проектировании структуры РЗА на примере реального объекта

## Результаты оптимизации на примере автотрансформатора

| ПС 500/220/10 кВ                    |                    |           |                  |          |
|-------------------------------------|--------------------|-----------|------------------|----------|
| Наименование функции                | Традиционный метод |           | Применение ОМ ГА |          |
|                                     | Терминал           | Кол-во    | Терминал         | Кол-во   |
| РЗА АТ1 500/220/10 кВ               |                    |           |                  |          |
| 1-й комплект основных защит АТ1     | Siemens 7UT633     | 1         | СПК-1            | 1        |
| 2-й комплект основных защит АТ1     | Siemens 7UT633     | 1         | СПК-2            | 1        |
| ДЗО НН АТ1                          | Siemens 7UT613     | 1         | СПК-3            | 1        |
| ДЗО СН АТ1                          | Siemens 7UT633     | 1         | СПК-4            | 1        |
| МТЗ НН и УРОВ НН                    | Siemens 7SJ641     | 1         | СПК-5            | 1        |
| Комплект технологических защит АТ1  | Siemens 6MD664     | 1         |                  |          |
| АРКТ АТ1                            | Reinhausen Tapcon  | 1         |                  |          |
| КИВ стороны 500 кВ АТ1              | Siemens 7SJ621     | 1         |                  |          |
| Резервные защиты стороны 500 кВ АТ1 | Siemens 7SA522     | 1         |                  |          |
| Резервные защиты стороны 220 кВ АТ1 | Siemens 7SA522     | 1         |                  |          |
| <b>Итого</b>                        |                    | <b>10</b> |                  | <b>5</b> |

# Оценка эффективности применения ОМ при проектировании структуры РЗА на основе реального объекта

Сравнение количества задействованного оборудования РЗА на объекте

| Первичное оборудование             | Традиционный метод | Применение ОМ ГА |
|------------------------------------|--------------------|------------------|
|                                    | Кол-во терминалов  | Кол-во СПК       |
| Автотрансформаторы (x2)            | 20                 | 10               |
| Шины 500 кВ (x2)                   | 4                  | 2                |
| Шины 220 кВ (x4)                   | 8                  | 4                |
| Секционный выключатель 220 кВ (x2) | 10                 | 2                |
| Выключатель 500 кВ (x6)            | 12                 | 6                |
| Выключатель 220 кВ (x16)           | 32                 | 16               |
| Линия 500 кВ (x4)                  | 16                 | 12               |
| Линия 220 кВ (x8)                  | 16                 | 16               |
| <b>Итого</b>                       | <b>118</b>         | <b>68</b>        |

# **АНАЛИЗ УСЛОВИЙ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ СИНТЕЗА ОПТИМАЛЬНОЙ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ НА РАЗНЫХ СТАДИЯХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА РЗА**

## **Условия применения ОМ на стадии эксплуатации РЗА**

- 1) Состав СПК ограничен**
- 2) Имеются существенные ограничения по времени выполнения ОМ**
- 3) Решение задачи оптимизации должно выполняться распределенно**
- 4) Исходная информация о текущем состоянии электрической сети и технических средствах РЗА может собираться автоматически от находящихся в рабочем состоянии СПК**

## Весовая функция для стадии эксплуатации РЗА

$$W = \sum_{i=1}^n (CPU_i + LAN_i + RW_i)$$

$i$  – порядковый номер размещенных в СПК функций РЗА;

$n$  - порядковый номер, присвоенный функции РЗА, указанной в запросе;

$CPU_i$  – весовая функция загрузки CPU от  $i$ -ой функции РЗА;

$LAN_i$  – весовая функция загрузки коммуникационных интерфейсов от  $i$ -ой функции РЗА;

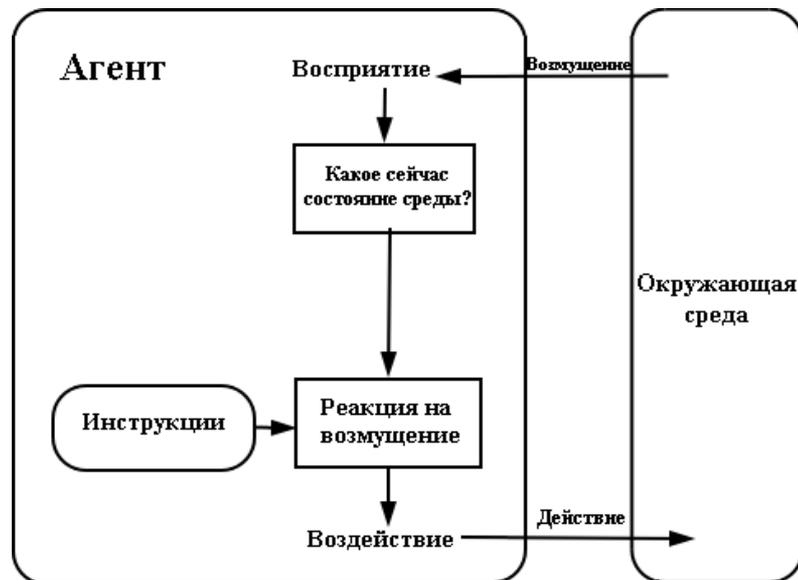
$RW_i$  – весовая функция учета правил функционального резервирования для  $i$ -ой функции РЗА.

# Мультиагентные системы

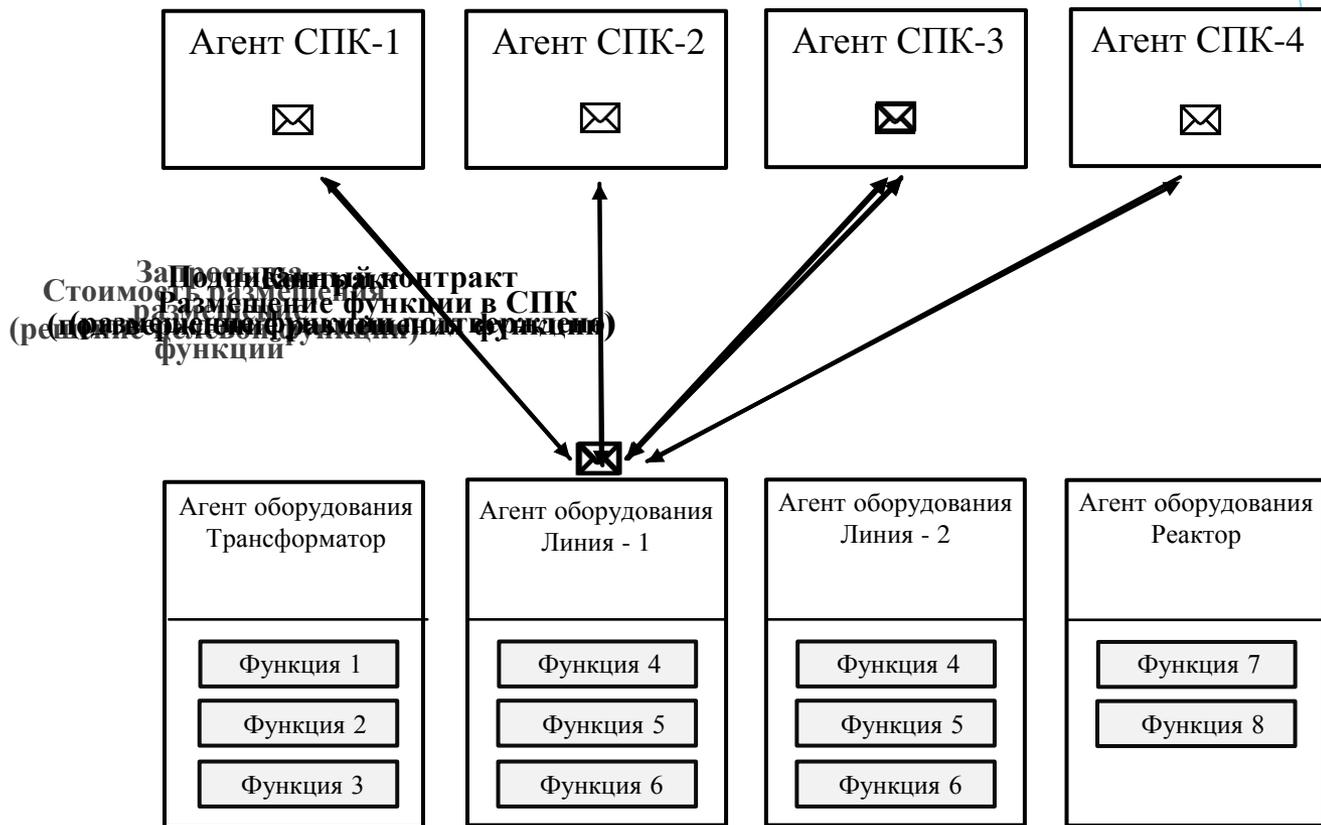
Основываясь на условиях применения ОМ для выполнения поставленной задачи было принято решение использовать **Мультиагентную систему** - систему, образованную несколькими взаимодействующими интеллектуальными агентами для распределенного решения задачи.

**Агент** - самостоятельная независимая программа, выполняющая задание (данное пользователем) в течение длительных промежутков времени.

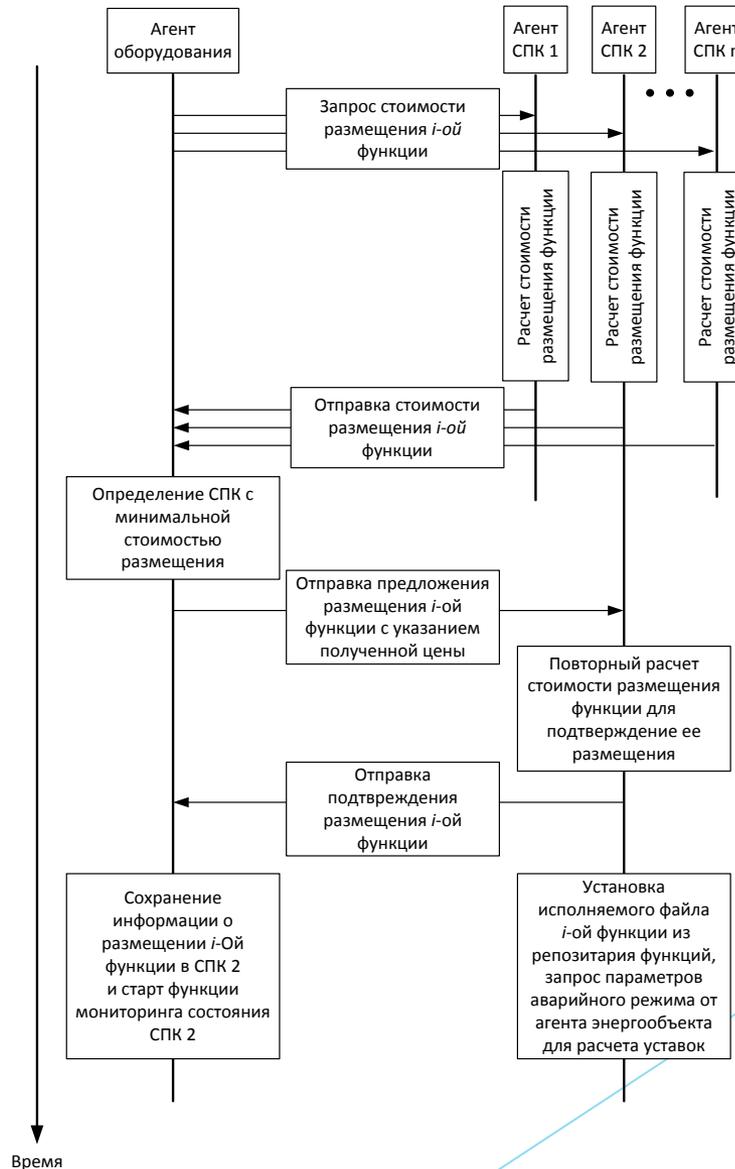
Мультиагентные системы могут быть использованы для решения таких проблем, которые сложно или невозможно решить с помощью одного агента или централизованной системы (не распределенной).



# Пример взаимодействия агентов



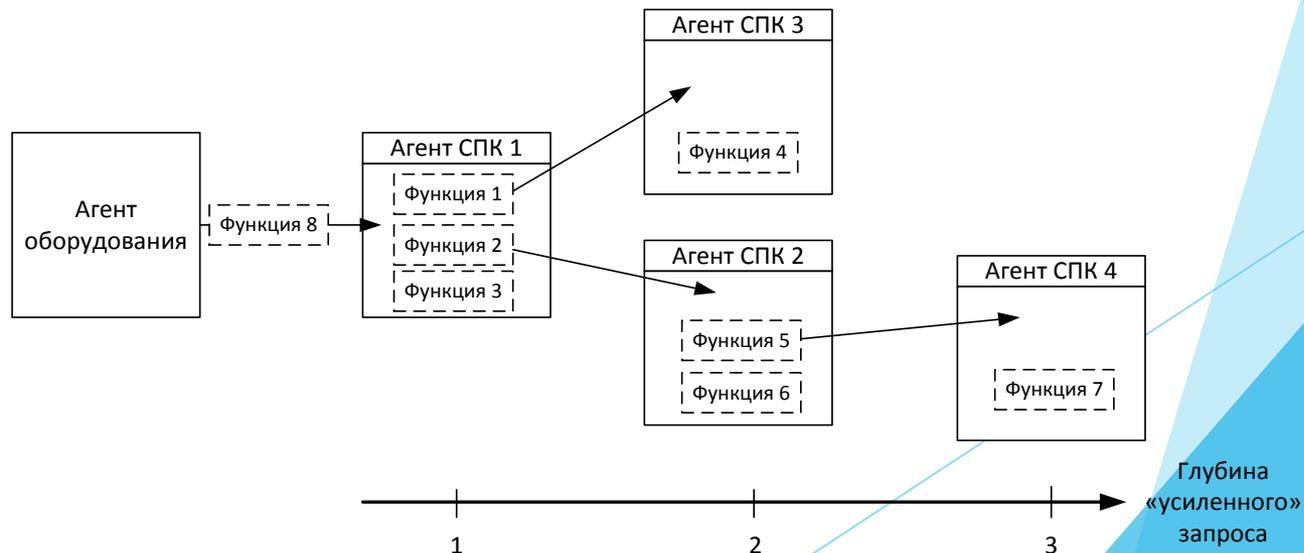
# Временная диаграмма работы ОМ на стадии эксплуатации РЗА



# Использование «усиленных» запросов

«Усиленные» запросы используются в случаях, когда агент оборудования получает только одни отказы без указания новых стоимостей размещения функции (свободных ресурсов по CPU и LAN в работоспособных СПК недостаточно для размещения нужной функции). В такой ситуации необходимо перераспределить уже размещенные в СПК функции, чтобы высвободить ресурсы по CPU и LAN на каком-либо СПК.

Глубина «усиленного» запроса, определяющая количество последовательных перемещений функций РЗА между СПК, является настраиваемым параметром.



# Оценка эффективности применения ОМ при проектировании структуры РЗА на основе реального объекта

## Результаты оптимизации на примере автотрансформатора

| ПС 500/220/10 кВ                    |                    |           |                  |          |                   |          |
|-------------------------------------|--------------------|-----------|------------------|----------|-------------------|----------|
| Наименование функции                | Традиционный метод |           | Применение ОМ ГА |          | Применение ОМ МАС |          |
|                                     | Терминал           | Кол-во    | Терминал         | Кол-во   | Терминал          | Кол-во   |
| РЗА АТ1 500/220/10 кВ               |                    |           |                  |          |                   |          |
| 1-й комплект основных защит АТ1     | Siemens 7UT633     | 1         | СПК-1            | 1        | СПК-1             | 1        |
| 2-й комплект основных защит АТ1     | Siemens 7UT633     | 1         | СПК-2            | 1        | СПК-2             | 1        |
| ДЗО НН                              | Siemens 7UT613     | 1         | СПК-3            | 1        | СПК-3             | 1        |
| ДЗО СН АТ1                          | Siemens 7UT633     | 1         | СПК-4            | 1        | СПК-4             | 1        |
| МТЗ НН и УРОВ НН                    | Siemens 7SJ641     | 1         | СПК-5            | 1        | СПК-5             | 1        |
| Комплект технологических защит АТ1  | Siemens 6MD664     | 1         |                  |          |                   |          |
| АРКТ АТ1                            | Reinhausen Tapcon  | 1         |                  |          |                   |          |
| КИВ стороны 500 кВ АТ1              | Siemens 7SJ621     | 1         |                  |          | СПК-6             | 1        |
| Резервные защиты стороны 500 кВ АТ1 | Siemens 7SA522     | 1         |                  |          |                   |          |
| Резервные защиты стороны 220 кВ АТ1 | Siemens 7SA522     | 1         |                  |          |                   |          |
| <b>Итого</b>                        |                    | <b>10</b> |                  | <b>5</b> |                   | <b>6</b> |

# Оценка эффективности применения ОМ при проектировании структуры РЗА на основе реального объекта

Сравнение количества задействованного оборудования РЗА на объекте

| Первичное оборудование             | Традиционный метод | Применение ОМ ГА | Применение ОМ МАС |
|------------------------------------|--------------------|------------------|-------------------|
|                                    | Кол-во терминалов  | Кол-во СПК       | Кол-во СПК        |
| Автотрансформаторы (x2)            | 20                 | 10               | 12                |
| Шины 500 кВ (x2)                   | 4                  | 2                | 2                 |
| Шины 220 кВ (x4)                   | 8                  | 4                | 4                 |
| Секционный выключатель 220 кВ (x2) | 10                 | 2                | 2                 |
| Выключатель 500 кВ (x6)            | 12                 | 6                | 6                 |
| Выключатель 220 кВ (x16)           | 32                 | 16               | 16                |
| Линия 500 кВ (x4)                  | 16                 | 12               | 12                |
| Линия 220 кВ (x8)                  | 16                 | 16               | 16                |
| <b>Итого</b>                       | <b>118</b>         | <b>68</b>        | <b>70</b>         |

# Оценка эффективности применения ОМ на основе МАС при эксплуатации реального объекта

Анализ времени восстановления работоспособной функциональной структуры РЗА при использовании рассмотренных методов

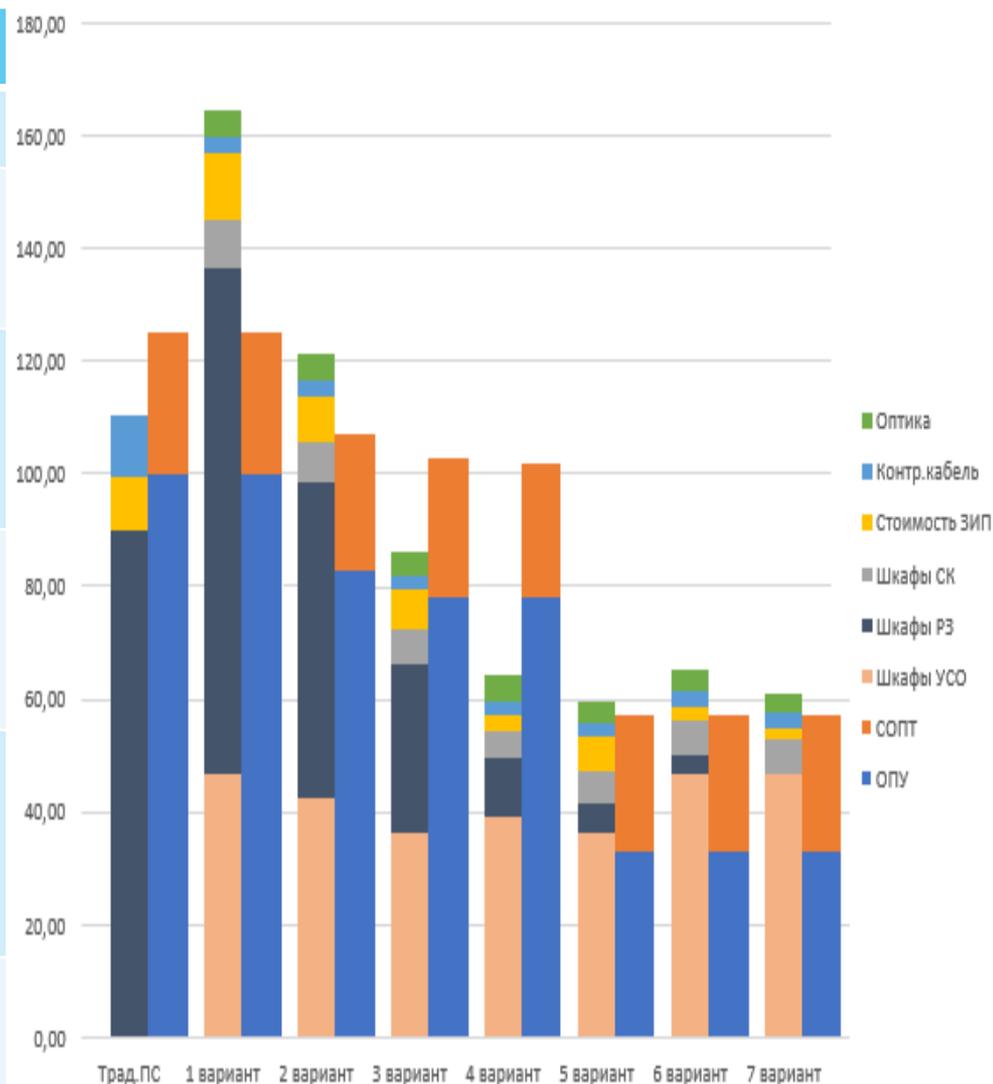
| Кол-во задействованных критериев резервирования | Традиционный метод   | Применение ОМ на базе ГА | Применение ОМ на базе МА |
|---|----------------------|--------------------------|--------------------------|
|   | t, секунды           | t, секунды               | t, секунды               |
| Задействованы все критерии                      | 86400 (24 ч.)        | 100                      | 0,02                     |
| Задействовано 2 критерия                        | 86400 (24 ч.)        | 150                      | 0,02                     |
| Задействован 1 критерий                         | 86400 (24 ч.)        | 400                      | 0,02                     |
| Ни один из критериев не задействован            | 86400 (24 ч.)        | 1200                     | 0,02                     |
| <b>В среднем</b>                                | <b>86400 (24 ч.)</b> | <b>462,5 с.</b>          | <b>0,02 с.</b>           |

## Разные варианты архитектуры РЗА на ПС (ЦПС)

|           |  |
|-----------|--|
| Трад. ПС  | - традиционная архитектура РЗА без применения «шины процесса».   |
| 1 вариант | - традиционная архитектура РЗА с применением «шины процесса».  |
| 2 вариант | - установка двух взаиморезервирующих МП терминалов РЗА для каждого защищаемого элемента с полным набором основных и резервных функций.   |
| 3 вариант | - установка одного МП терминала РЗА на каждый защищаемый элемент с полным набором основных и резервных защит и централизованной защиты для всей ЦПС на базе высокопроизводительного сервера.       |
| 4 вариант | - установка одного специализированного промышленного компьютера на каждый защищаемый элемент с полным набором основных и резервных функций с автоматическим перераспределением функций при отказе. |
| 5 вариант | - централизованная архитектура РЗА ЦПС   |
| 6 вариант | - установка интеллектуальных УСО с полным набором основных и резервных защит и централизованной защиты для всей ЦПС на базе высокопроизводительного сервера.                                       |
| 7 вариант | - установка интеллектуальных УСО с полным набором основных и резервных защит с автоматическим перераспределением функций при отказе.   |

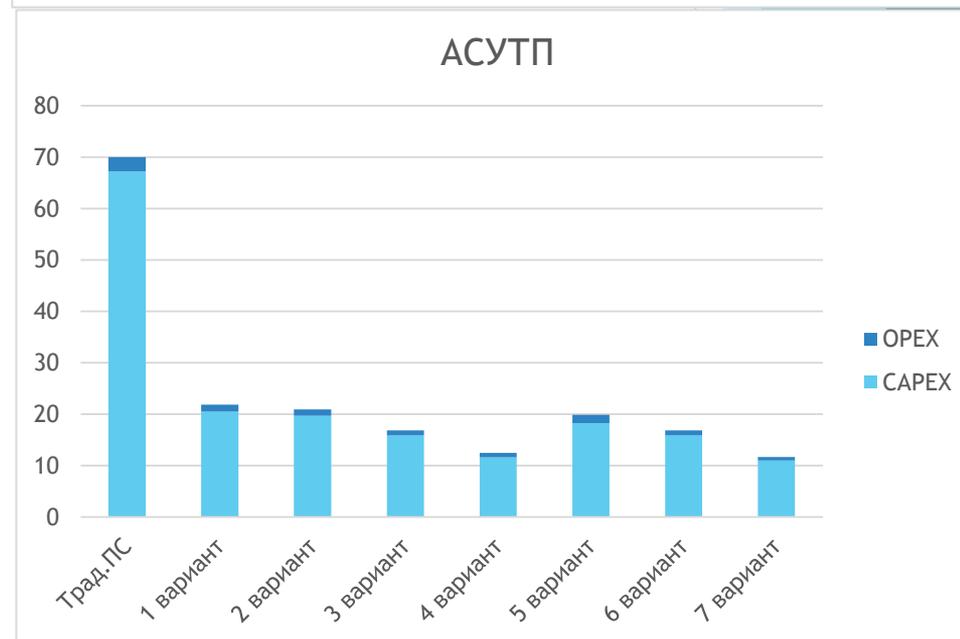
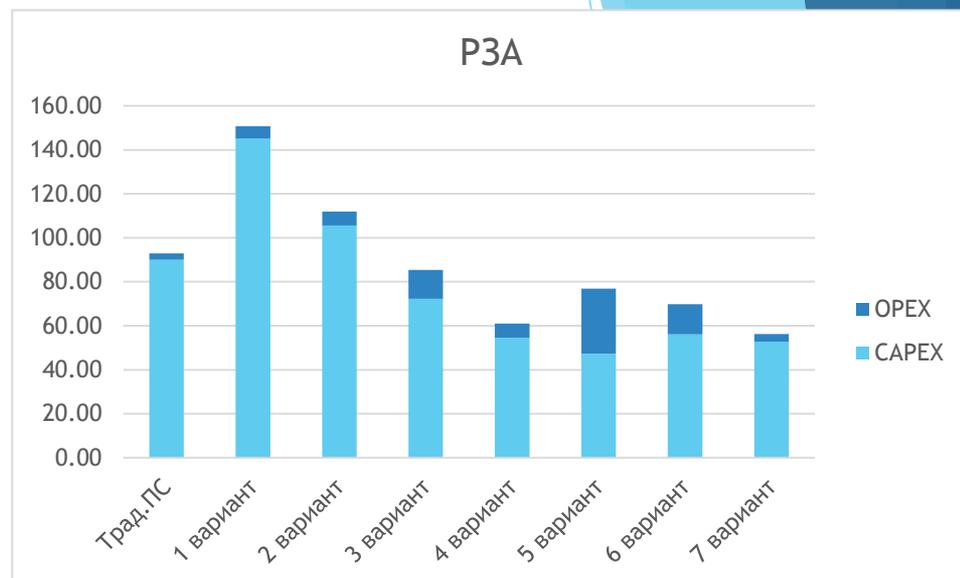
# Сравнение различных вариантов архитектур РЗА ЦПС (CAPEX)

|           |  |
|-----------|--|
| Трад. ПС  | - традиционная архитектура РЗА без применения «шины процесса».   |
| 1 вариант | - традиционная архитектура РЗА с применением «шины процесса».  |
| 2 вариант | - установка двух взаиморезервирующих МП терминалов РЗА для каждого защищаемого элемента с полным набором основных и резервных функций.   |
| 3 вариант | - установка одного МП терминала РЗА на каждый защищаемый элемент с полным набором основных и резервных защит и централизованной защиты для всей ЦПС на базе высокопроизводительного сервера.       |
| 4 вариант | - установка одного специализированного промышленного компьютера на каждый защищаемый элемент с полным набором основных и резервных функций с автоматическим перераспределением функций при отказе. |
| 5 вариант | - централизованная архитектура РЗА ЦПС   |
| 6 вариант | - установка интеллектуальных УСО с полным набором основных и резервных защит и централизованной защиты для всей ЦПС на базе высокопроизводительного сервера.                                       |
| 7 вариант | - установка интеллектуальных УСО с полным набором основных и резервных защит с автоматическим перераспределением функций при отказе.   |

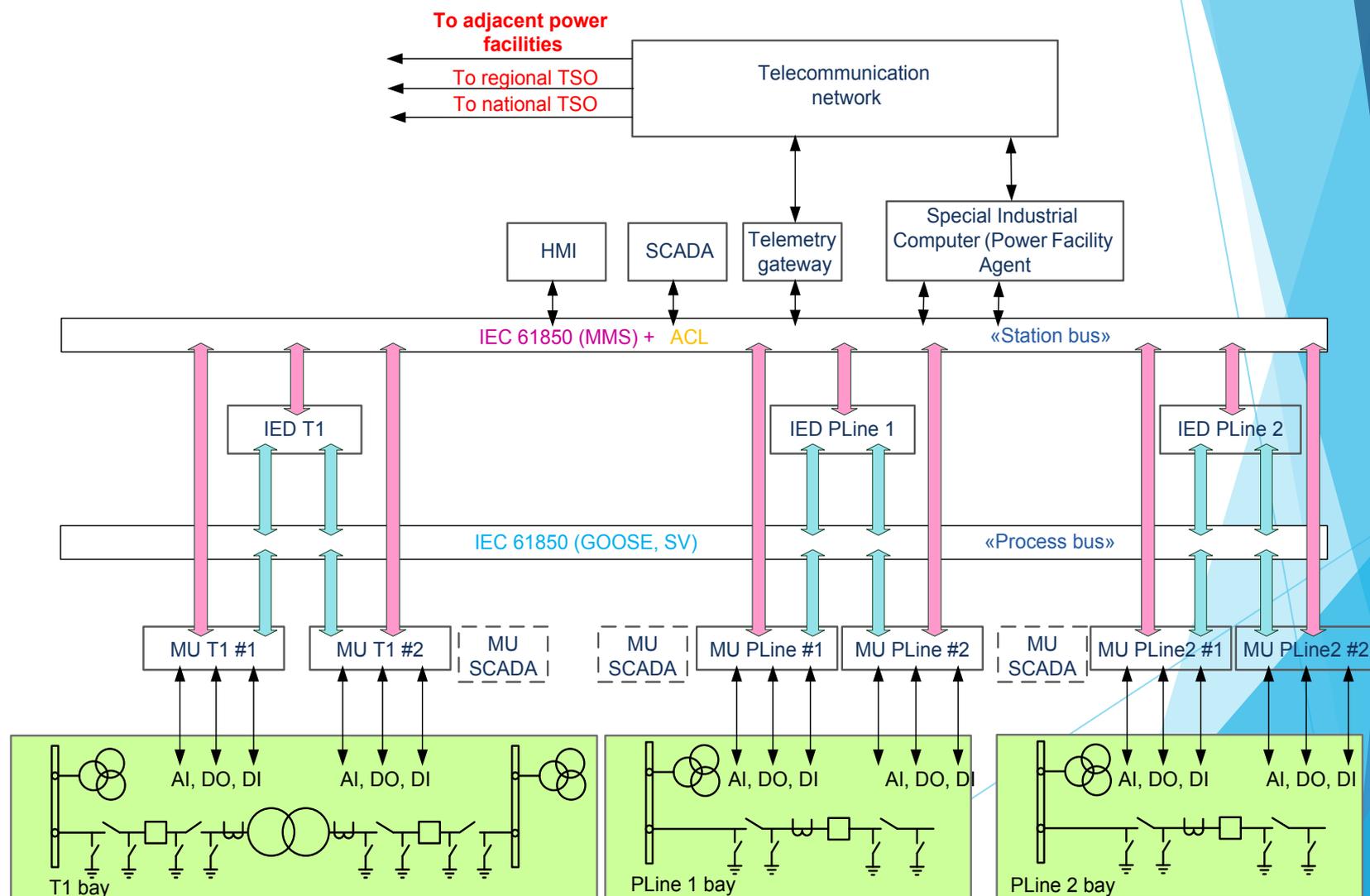


# Сравнение различных вариантов архитектур РЗА ЦПС (OPEX)

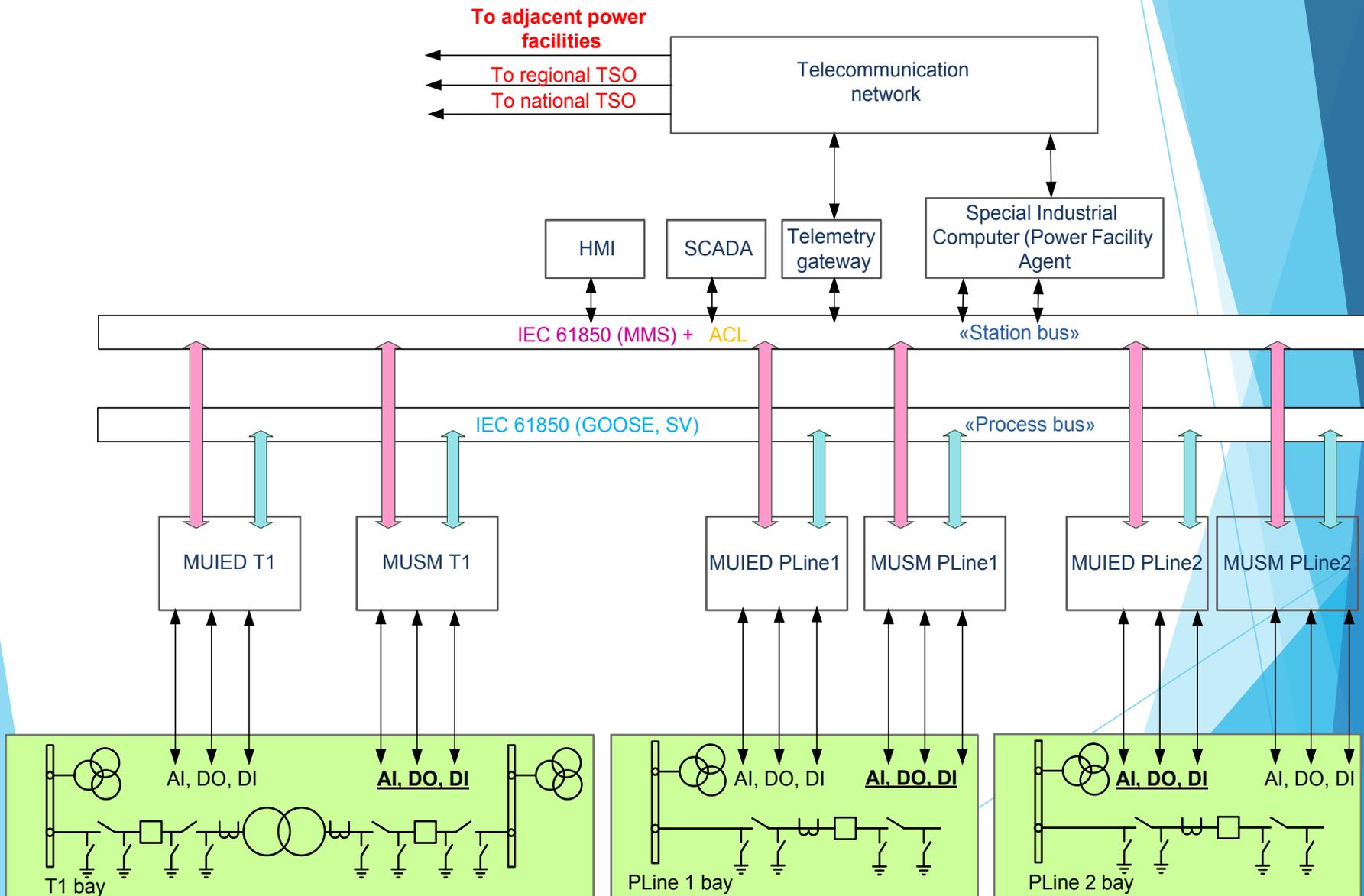
|           |  |
|-----------|--|
| Трад. ПС  | - традиционная архитектура РЗА без применения «шины процесса».   |
| 1 вариант | - традиционная архитектура РЗА с применением «шины процесса».  |
| 2 вариант | - установка двух взаиморезервирующих МП терминалов РЗА для каждого защищаемого элемента с полным набором основных и резервных функций.   |
| 3 вариант | - установка одного МП терминала РЗА на каждый защищаемый элемент с полным набором основных и резервных защит и централизованной защиты для всей ЦПС на базе высокопроизводительного сервера.       |
| 4 вариант | - установка одного специализированного промышленного компьютера на каждый защищаемый элемент с полным набором основных и резервных функций с автоматическим перераспределением функций при отказе. |
| 5 вариант | - централизованная архитектура РЗА ЦПС   |
| 6 вариант | - установка интеллектуальных УСО с полным набором основных и резервных защит и централизованной защиты для всей ЦПС на базе высокопроизводительного сервера.                                       |
| 7 вариант | - установка интеллектуальных УСО с полным набором основных и резервных защит с автоматическим перераспределением функций при отказе.   |



# Установка одного устройства РЗА на каждый защищаемый элемент



# Выполнение функций РЗА в УСО РЗА и УСО АСУТП



***Спасибо за внимание!***