



НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. Р. Е. Алексеева

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ И МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЛОГИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ЦИФРОВОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ ЭНЕРГОРАЙОНОВ

Лоскутов Антон Алексеевич

к.т.н., доцент, старший научный сотрудник лаборатории
«Автономные гибридные электроэнергетические комплексы»,
доцент кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника»

Школа молодых ученых «Системные исследования энергетических технологий», 2025

Отечественный практический опыт на промпредприятиях и объектах нефтегазовой отрасли:

- необходимость быстрого отключения близких к шинам ОРГ КЗ с целью предотвращения нарушений устойчивости генераторов станции. Для этого предложено применение в прилегающей сети быстродействующих защит: неселективных токовых отсечек, дифференциальных защит, максимальных токовых защит с каналами связи – логических защит линий (ЛЗЛ);
- преимущественное обеспечение условий для сохранения работы ОРГ на местную нагрузку;
- оснащение ГУ стандартизированным набором защит, определяемым заводом-изготовителем → несогласованность с защитами прилегающей сети → избыточные отключения ГУ / отказы защит;
- ориентация существующих стандартов, требований к РЗА, производителей устройств РЗА на электрические сети (ПАО «Россети») без учета особенностей СЭС ПП.

Зарубежный практический опыт:

- ориентация РЗА на быстрое отключение ГУ ОРГ при внешних возмущениях и авариях → провоцирование дефицита мощности, снижение;
- формальный перенос, упрощение распространенных решений в питающих и системообразующих сетях → возникновение потенциальных и фактических проблем.

Не выработан комплексный подход к развитию РЗА в условиях увеличения масштабов внедрения объектов РГ, ВИЭ, элементов силовой электроники, в системах электроснабжения промышленных предприятий и потребителей

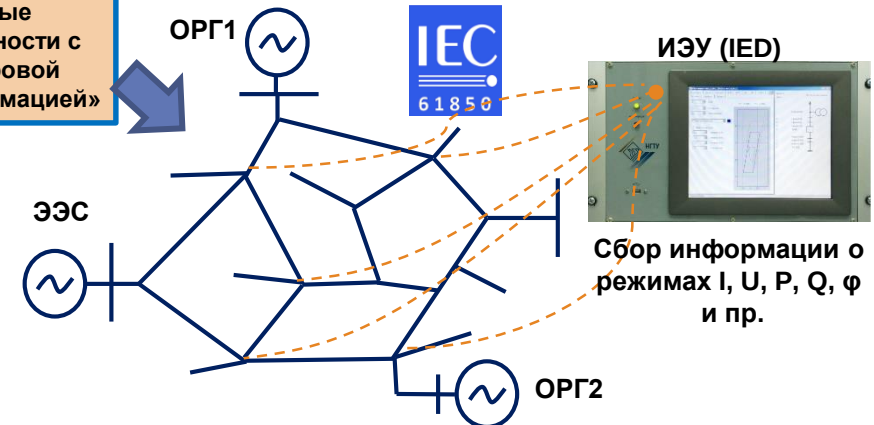
Необходимость совершенствования методов распознавания режимов для РЗА

- Обеспечение требуемой эффективности функционирования РЗ электрических сетей, прилегающих к точке присоединения ОРГ.
- Построение эффективной РЗА, устанавливаемой в узле присоединения ОРГ к электрической сети;
- Улучшение: **быстродействия, чувствительности (распознаваемости режима) и селективности.**

Около 80% РЗА являются электромеханическими
Логика работы микропроцессорных РЗА не изменена до сих пор



Новые возможности с «цифровой трансформацией»



РАЗДЕЛ 1.

Анализ проблем при распознавании режимов функционирования систем электроснабжения промышленных потребителей, в том числе с объектами распределенной генерации.

РАЗДЕЛ 2.

Принципы формирования логической части цифровых устройств многопараметрической защиты с использованием информации от пусковых органов.

РАЗДЕЛ 3.

Принципы формирования логической части цифровых устройств многопараметрической защиты с использованием информации от измерительных органов.

РАЗДЕЛ 4.

Применение последовательной процедуры Вальда в автоматике систем электроснабжения промышленных потребителей с объектами распределенной генерации.

РАЗДЕЛ 5.

Разработка новых способов определения места повреждения на воздушных линиях электропередачи в системах электроснабжения промышленных потребителей.

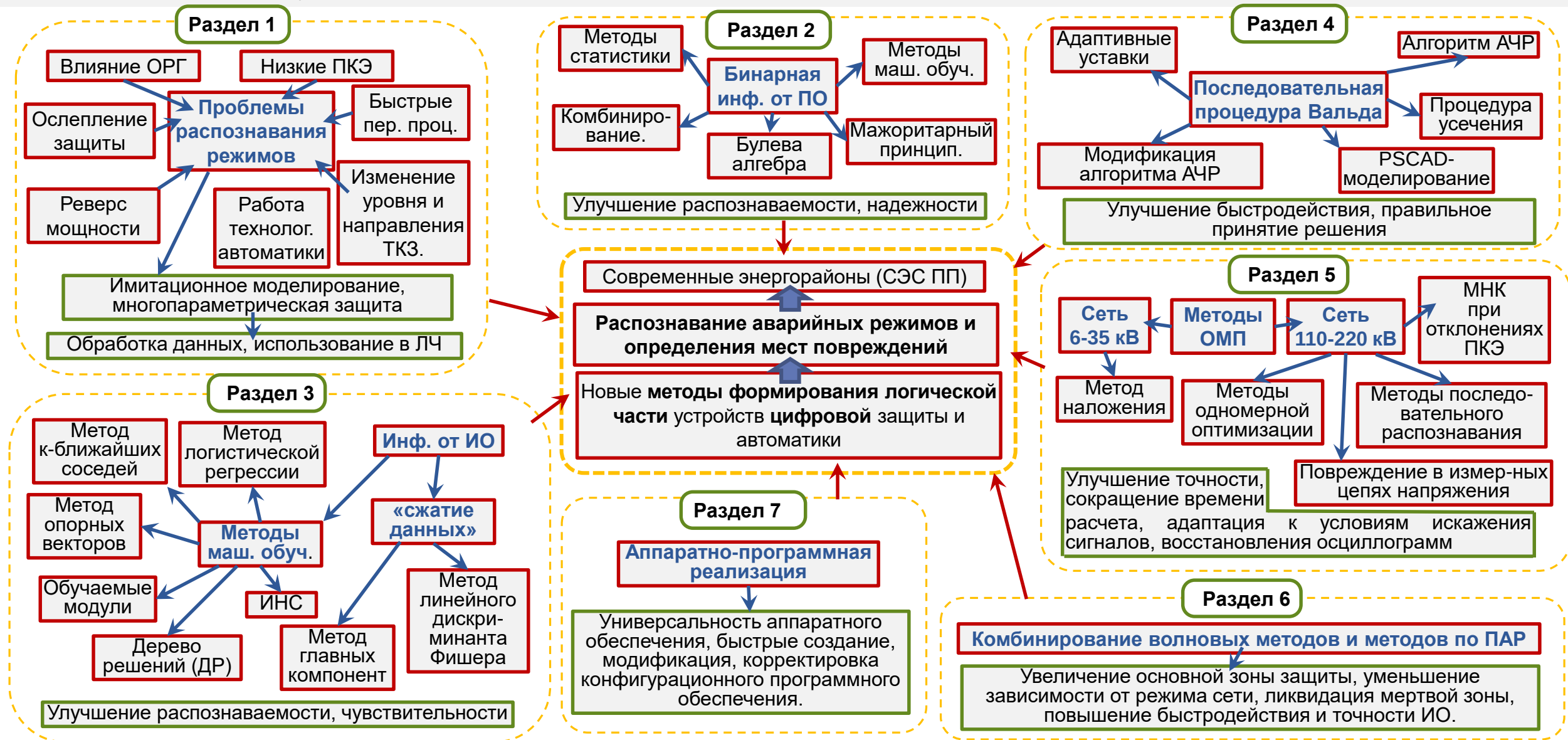
РАЗДЕЛ 6.

Варианты комбинирования волновых методов и методов по параметрам аварийного режима для улучшения распознавания поврежденных участков ЛЭП в системе электроснабжения промышленных потребителей.

РАЗДЕЛ 7.

Аппаратно-программная реализация киберзащищенных многопараметрических устройств цифровой защиты с применением компонентов промышленной автоматизации.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ: Разработка и исследование новых методов формирования логической части устройств защиты и автоматики СЭС ПП для повышения чувствительности и быстродействия защиты, надежности распознавания аварийных режимов.



Аспекты при анализе режимов работы СЭС ПП с ОРГ:

- Контроль и регулирование напряжения и частоты;
- Дисбаланс мощности (**параллельный/островной** режимы);
- Показатели качества электроэнергии (ПКЭ);
- Изменения в топологии сети;
- Экономические аспекты;
- Быстрые переходные процессы;
- Устойчивость работы энергорайона;
- Технологическое присоединение объекта РГ;
- Типы и области вероятных повреждений;
- Согласованность технологической автоматики



➤ Работа релейной защиты и автоматики.

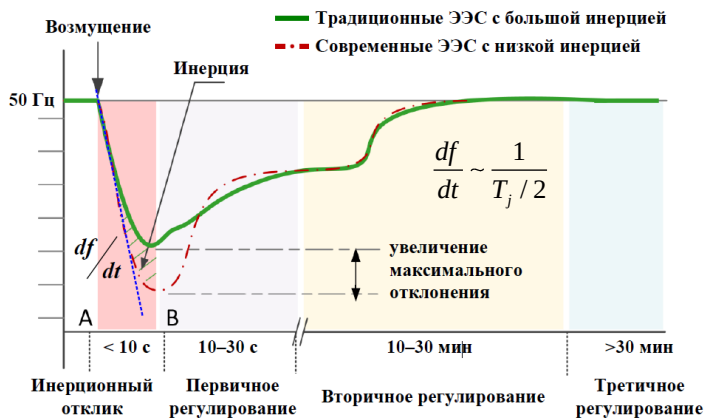


Рис. 3 – Увеличение скорости изменения частоты

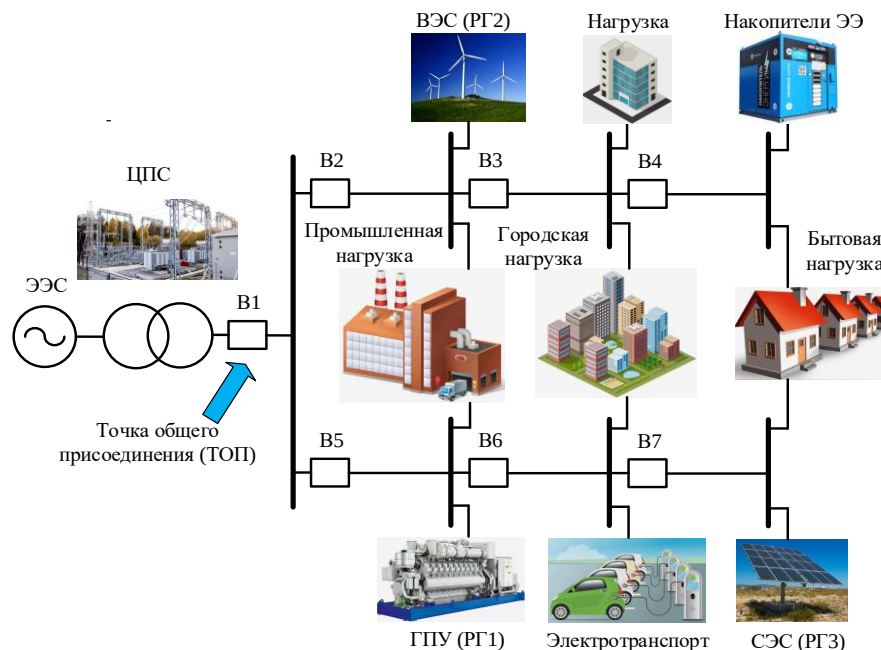


Рис. 1 - Структура энергорайона, подключенного к централизованной сети

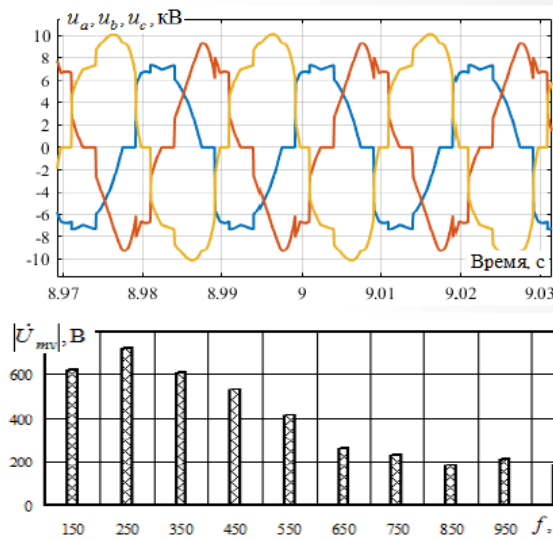


Рис. 2 – Осциллограмма напряжений в энергорайоне с инверторной установкой РГ и гармонический состав

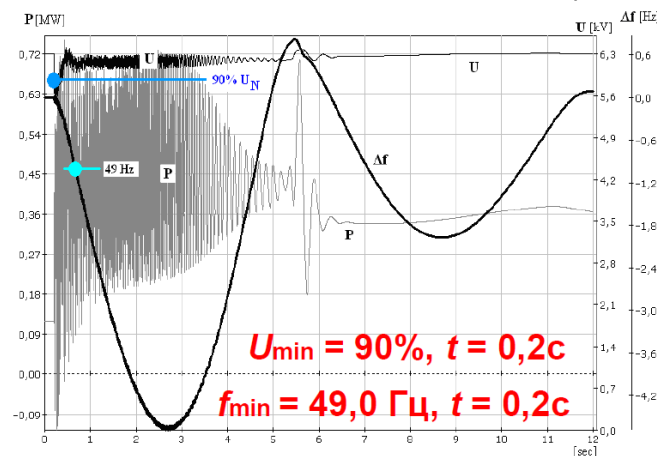


Рис. 4 – Переходный процесс при работе энергорайона в островном режиме и пуске СД 1,25 МВт

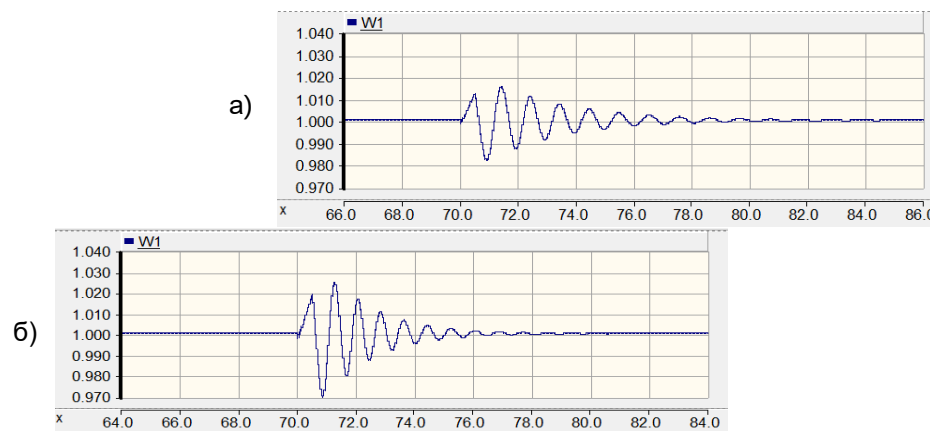


Рис. 5 – График скорости вращения ротора ГУ при:
а) $T_j = 8$ с; б) $T_j = 5$ с

Проблемы РЗА СЭС ПП с ОРГ:

- Влияние типов ГУ на ток повреждения;
 - Различия в уровнях КЗ;
 - Реверсивный поток мощности;
 - Ложное срабатывание;
 - Ослепление защиты;
 - Нежелательное отключение (переход в изолированный режим)
 - Несинхронное АПВ
- **Необходимость в методах распознавания режимов**

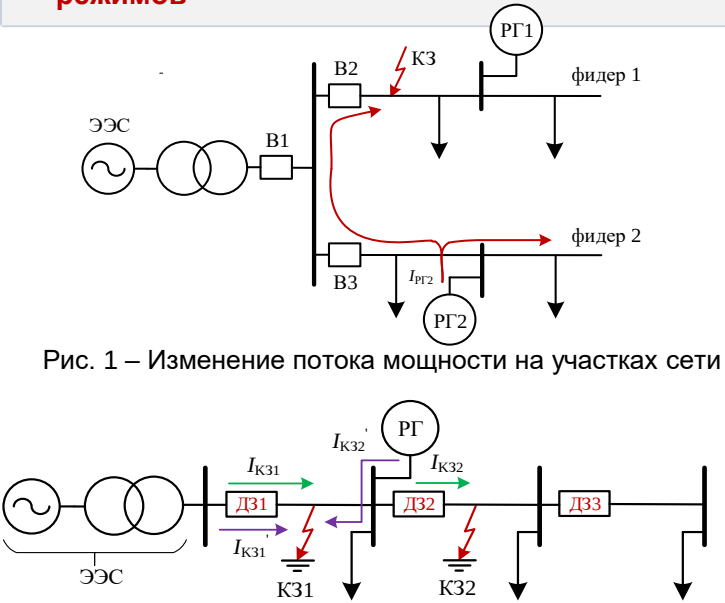


Рис. 1 – Изменение потока мощности на участках сети

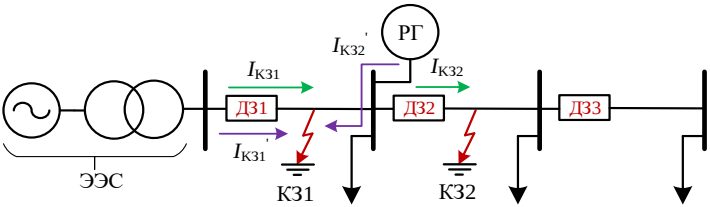


Рис. 2 – Ослепление дистанционной защиты

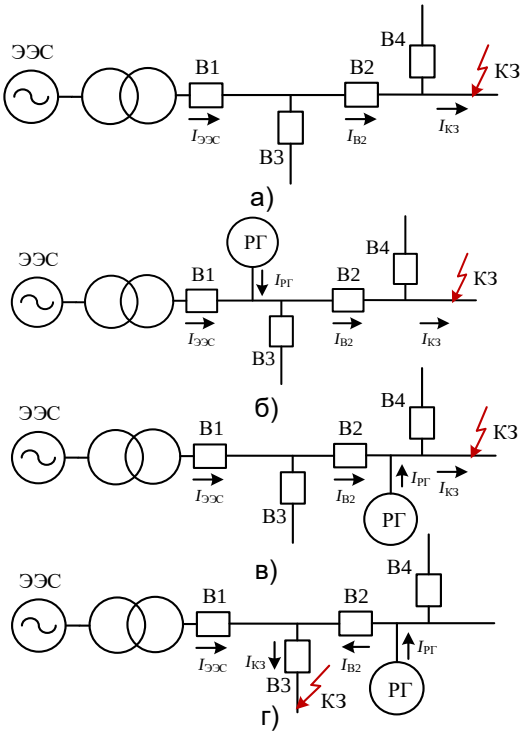


Рис. 3 – Изменение величин токов КЗ в зависимости от наличия и расположения ОРГ

Табл. 1 - Влияние различных типов ГУ на ток КЗ

Тип агрегата ГУ объекта РГ	Вклад в ток КЗ, возникающий на шине генератора
Инверторный генератор	Ток КЗ: 1-2 I _{ном} инвертора; Продолжительность: 0,5-10 циклов КЗ
Синхронный генератор с отдельным источником возбуждения	Ток КЗ: 5-10 I _{ном} генератора для сверхпереходных и переходных циклов КЗ; 2-4 I _{ном} генератора для установившегося КЗ
Асинхронный генератор с самовозбуждением	Ток КЗ: 5-10 I _{ном} генератора в течении 3-5 циклов КЗ; незначительный после 5-10 циклов КЗ

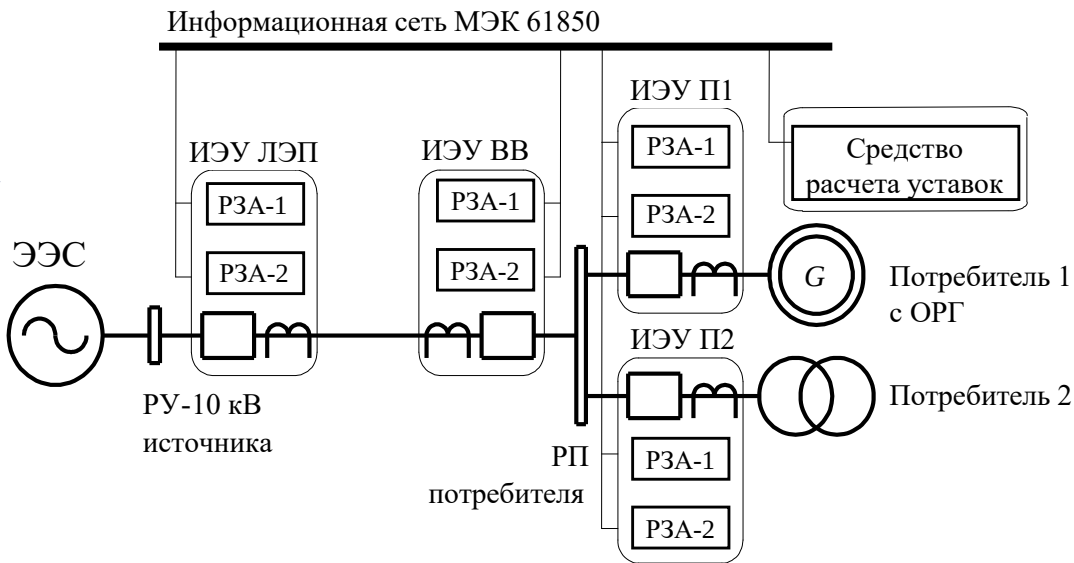


Рис. 4 – Предлагаемая структура системы РЗА

РЗА-1 **Уровень 1** – быстродействующие защиты абсолютной селективности для каждого участка сети (зоны защиты), **не имеющие** резервной зоны защиты.

Дифференциально-логическая защита с использованием сети связи по МЭК 61850.

Защита построена на распределенных ИЭУ всех присоединений электросети. Но все ИЭУ, реализующие дифференциально-логическую РЗ, активно взаимодействуют друг с другом во всех зонах защиты, адаптируясь под топологию сети, ее режимы, при отказах элементов.

РЗА-2 **Уровень 2** – ступенчатые защиты относительной селективности для каждого участка сети (зоны защиты), **имеющие** резервные зоны защиты.

Многопараметрическая защита, основанная на статистических принципах и синтезированной логической частью.

Защита отличается комбинацией ПО и ИО, позволяющей достигать большей распознаваемости режима и чувствительности РЗ за счет использования множества измерений и динамической адаптацией к режимам сети (при наличии информационной сети по МЭК 61850).

Перспективные варианты организации РЗА 2-го уровня:

➤ Многопараметрическая защита (автоматика)

- использования более чем одного информационного параметра

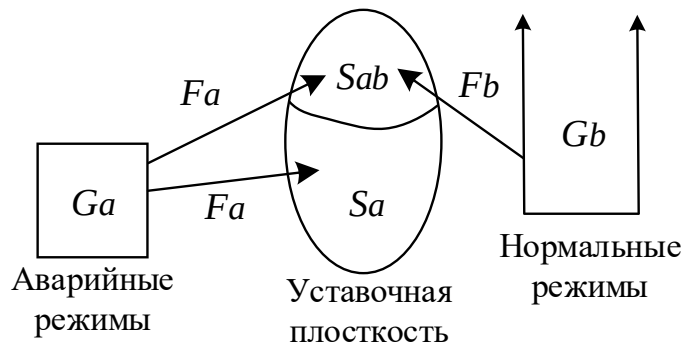


Рис. 1 – Варианты распознавания режимов в одномерном уставочном пространстве

y – наблюдаемый параметр, a и b – аварийный и нормальный режимы, G_a и G_b – заданные объектные области определения параметров находящийся в различных режимах (y_a и y_b), F_a и F_b – функции преобразования параметров y_a и y_b в уставочную область, S_a – уставочная область аварийных режимов и S_{ab} – уставочная область аварийных и нормальных режимов (область не распознавания).

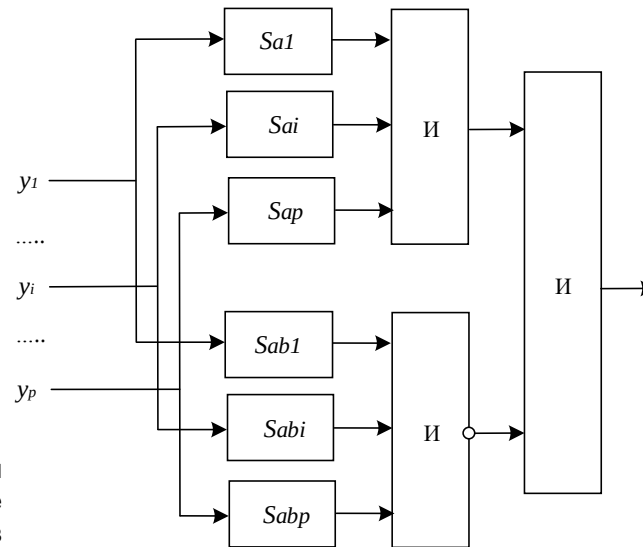


Рис. 2 – Структура защиты на многопараметрическом принципе

➤ Информационный подход

- многократное моделирование;
- статистическая обработка результатов моделирования;
- теория принятия решений;
- методы машинного обучения, ИНС и пр.

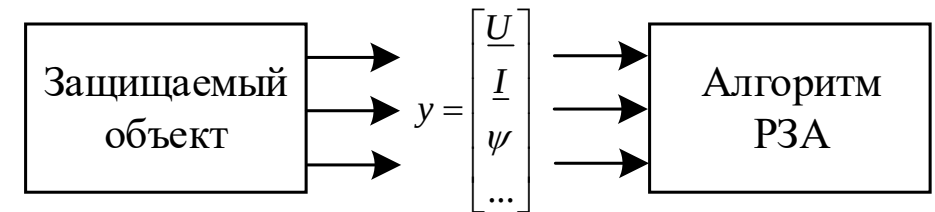


Рис. 3 – Принцип использование набора информационных параметров для РЗА

x - вектор объектных параметров,
 y - вектор информационных параметров (признаков).

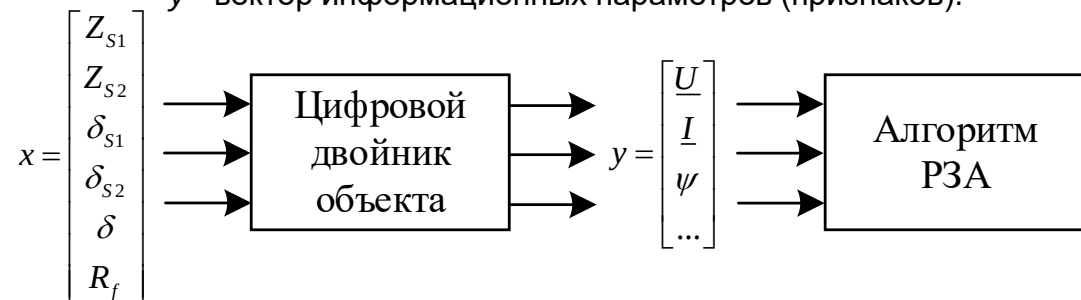
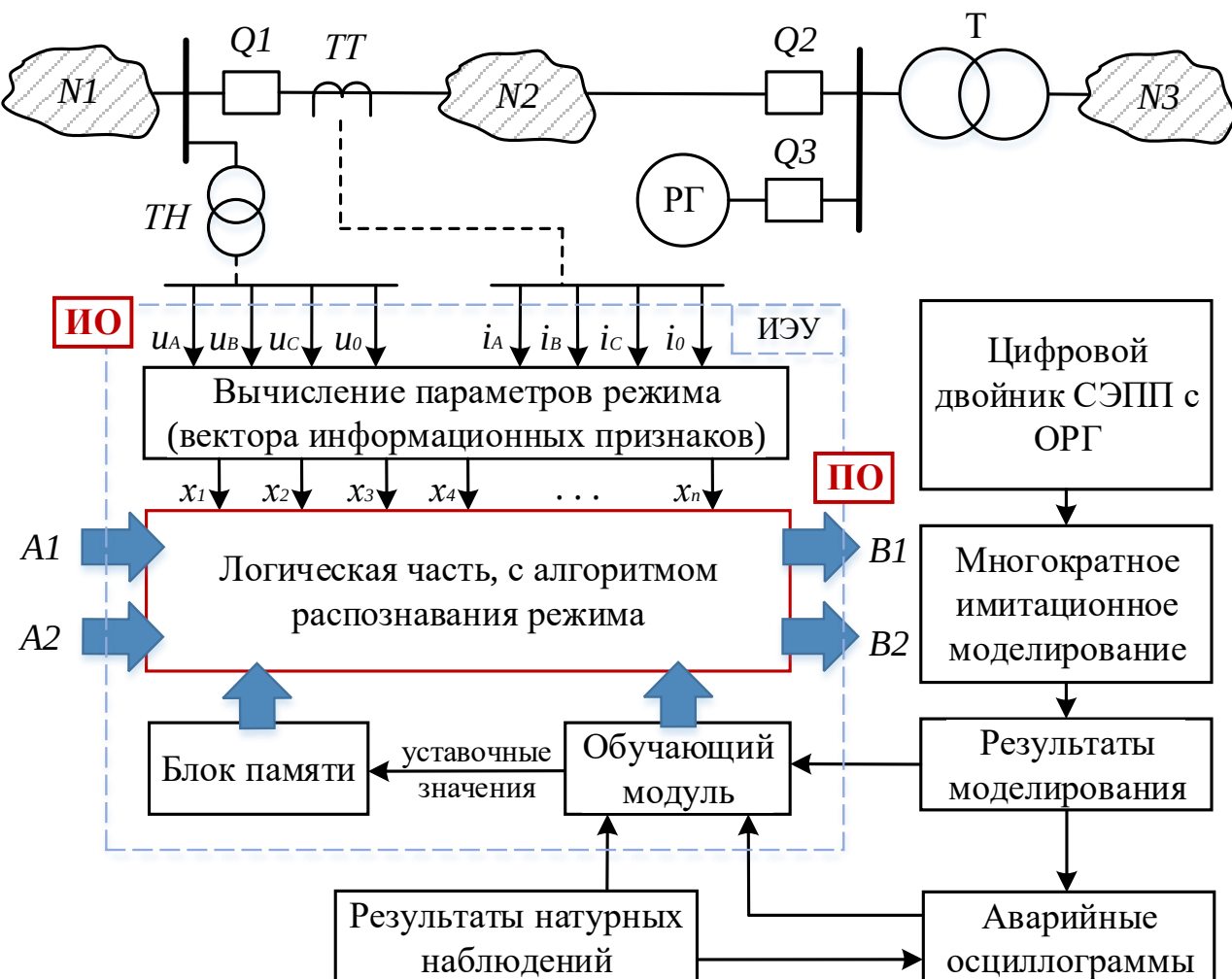


Рис. 4 – Принцип использования имитационного моделирования для алгоритма РЗА



ИО – измерительные органы – виртуальная часть ИЭУ обеспечивающая непрерывное измерение и контроль наблюдаемого параметра $P=\{p(t)\}$ (например, величины тока, напряжения, сопротивления);

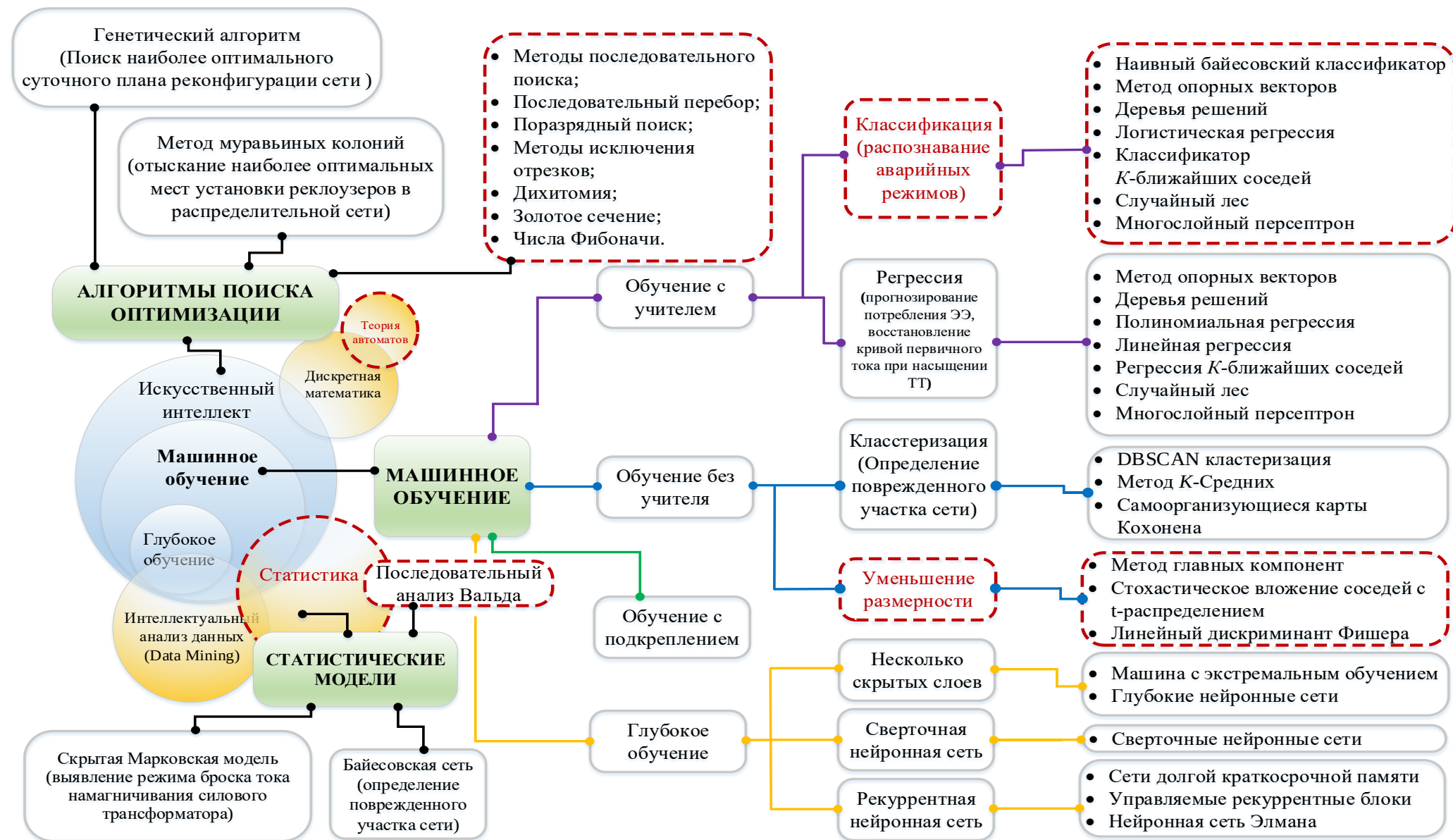
ПО – пусковые органы – виртуальная часть ИЭУ формирующая бинарный сигнал («0» или «1») в результате сравнения измеренного значения параметра с уставкой и формирования признака срабатывания.

Входная информация:

- аналоговые сигналы или отцифрованные сигналы: токи i_a, i_b, i_c, i_0 , напряжения u_a, u_b, u_c, u_0 и зависящие от них величины в месте установки защиты и в других местах энергорайона; непрерывные (аналоговые) величины, пропорциональные температуре объекта или окружающей среды, давлению и пр.;
- $A1$ – входная дискретная (бинарная) информация (0,1), в том числе сигналы от коммутационных аппаратов, других ИЭУ и от обслуживающего персонала;
- $A2$ – цифровая информация от других ИЭУ, характеризующая как текущие значения переменного тока, так и логические сигналы, получаемые посредством цифровых коммуникационных интерфейсов (например, МЭК 61850);
- результаты имитационного моделирования в виде выборок действующих/амплитудных/комплексных значений наблюдаемых информационных признаков во всевозможных режимах работы;
- результаты натурных наблюдений в виде вектора значений;
- осциллограммы токов, напряжений, сопротивлений при аварийных событиях, полученные в результате модельных экспериментов и с реальных регистраторов на ПС, служащие для обучения ИЭУ и валидации результатов обучения ИЭУ распознаванию режимов.

Выходная информация из ИЭУ:

- $B1$ – выходная дискретная информация (логические сигналы к другим защитам и на отключение выключателей);
- $B2$ – цифровая информация к другим устройствам (характеризующая в общем случае как текущие значения переменного тока, так и логические сигналы), получаемая посредством цифровых коммуникационных интерфейсов (например МЭК 61850).



Методы формирования логической части устройств многопараметрической защиты и автоматики с использованием бинарной информации от пусковых органов

Метод статистической обработки данных о режимах

Теория вероятности

Байесовский критерий принятия решений

Методы машинного обучения

Искусственная нейронная сеть (ИНС)

Метод комбинирования

Дерево решений (ДР)

Мажоритарный метод, схемы голосования

1 из 2-х,
2 из 3-х

Оценка надежности Марковской моделью состояний

Метод теории автоматов

Булева алгебра

Увеличение распознаваемости сложных повреждений в СЭС ПП с ОРГ **от 10,5% до 67,5%** и, соответственно, чувствительности защиты элементов, оцениваемой по обоснованным статистическим критериям эффективности распознавания.

Повышение надежности логики, без снижения чувствительности (обеспечение компромисса) работы ИЭУ защиты (вероятность безотказной работы **до 99,96%**).

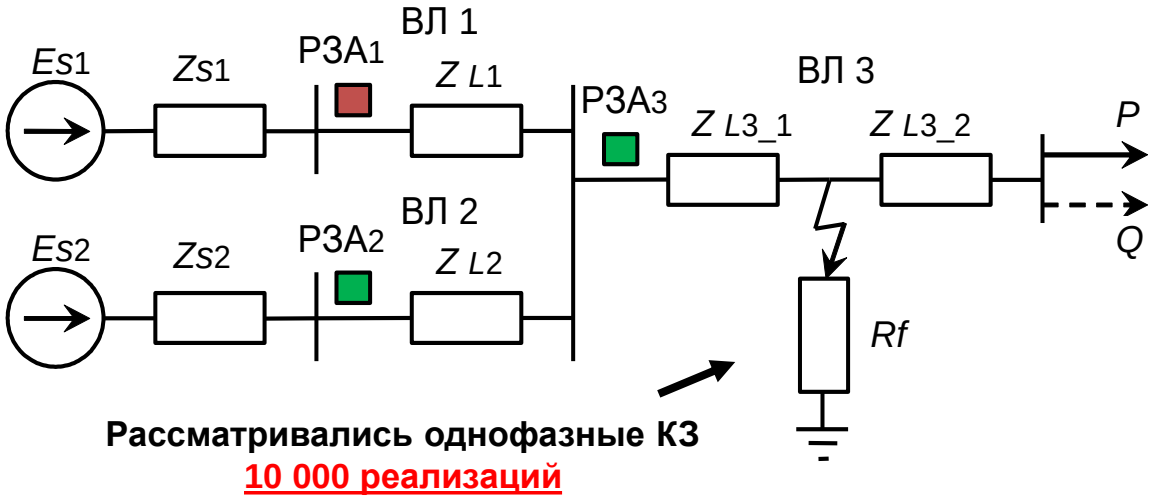


Рис. 1 - Схема замещения моделируемого участка сети 110/220кВ СЭС ПП

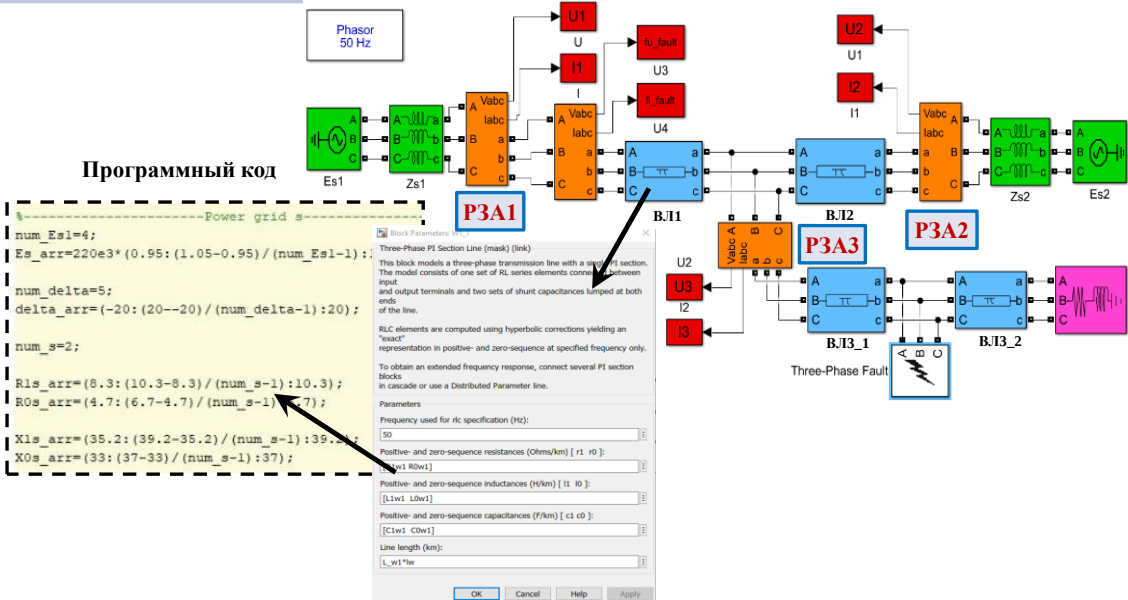


Рис. 2 - Имитационная модель участка сети 110/220кВ в Matlab/Simulink

Табл. 1 - Параметры элементов модели

Фиксированные		Интервальные		Интервальные	
Параметр	Значение	Параметр	Значение	Параметр	Значение
$U_{ном}, \text{кВ}$	220	$X_1^{s1}, \text{Ом/км}$	25.09 (± 1)	I_{line}	0.0001...0.9999
$L_1, \text{км}$	100	$X_0^{s1}, \text{Ом/км}$	1.31 (± 0.1)	$R_f, \text{Ом}$	0.1...40
$L_2, \text{км}$	100	$X_1^{s2}, \text{Ом/км}$	9.75 (± 1)	$\delta, ^\circ$	-30°... 30°
$L_3, \text{км}$	100	$X_0^{s2}, \text{Ом/км}$	0.87 (± 0.1)	k_1	0.95...1.05
$b_{1,2,3}^{1,2,3}, \text{См/км}$	$j0.65 \cdot 10^{-6}$	$R_{1,2,3}^{1,2,3}, \text{Ом/км}$	0.13 (± 0.01)	k_2	0.95...1.05
$b_{0,1,2,3}^{1,2,3}, \text{См/км}$	$j0.65 \cdot 10^{-6}$	$R_{0,1,2,3}^{1,2,3}, \text{Ом/км}$	0.27 (± 0.01)	$P, \text{МВт}$	300 (± 10)
$R_{1,2,3}^{s1,s2}, \text{Ом/км}$	0	$X_{1,2,3}^{1,2,3}, \text{Ом/км}$	0.332 (± 0.01)	$Q, \text{МВар}$	150 (± 10)
$R_{0,1,2,3}^{s1,s2}, \text{Ом/км}$	0	$X_0^{1,2,3}, \text{Ом/км}$	0.332 (± 0.01)		

$$k_1 = Es1 / U_{ном} \quad k_2 = Es2 / U_{ном} \quad \delta = \arg(Es1 / Es2)$$

Пусковые органы:
ПО1 - по модулю тока
ПО2 - по модулю напряжения
ПО3 - по фазе напряжения
ПО4 - по активной мощности
ПО5 - по реактивной мощности

Разработанные программы для ЭВМ



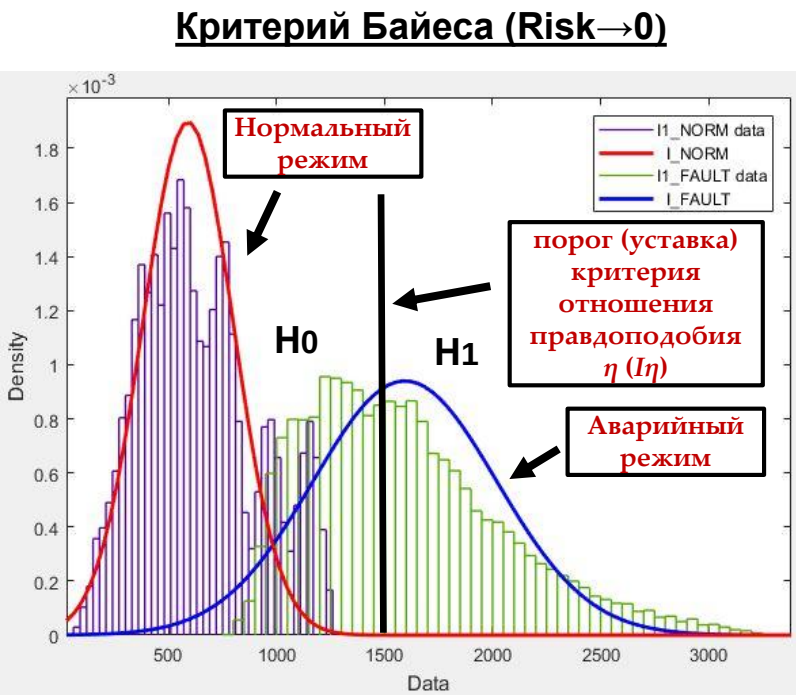


Рис. 1 - График условной плотности вероятности нормального распределения допустимых и аварийных режимов модуля тока

Отношение правдоподобия:

$$\lambda(P) = \frac{P_{H1}(p_i(t)|H_1)}{P_{H0}(p_i(t)|H_0)} \rightarrow \infty \quad \lambda(P) > \eta \rightarrow H_1$$
$$\lambda(P) \leq \eta \rightarrow H_0$$

$P_{H1}(p_i(t)|H_1)$ и $P_{H0}(p_i(t)|H_0)$ - функции плотности условной вероятности (правдоподобия) аварийного и нормального режимов при заданном векторе наблюдения

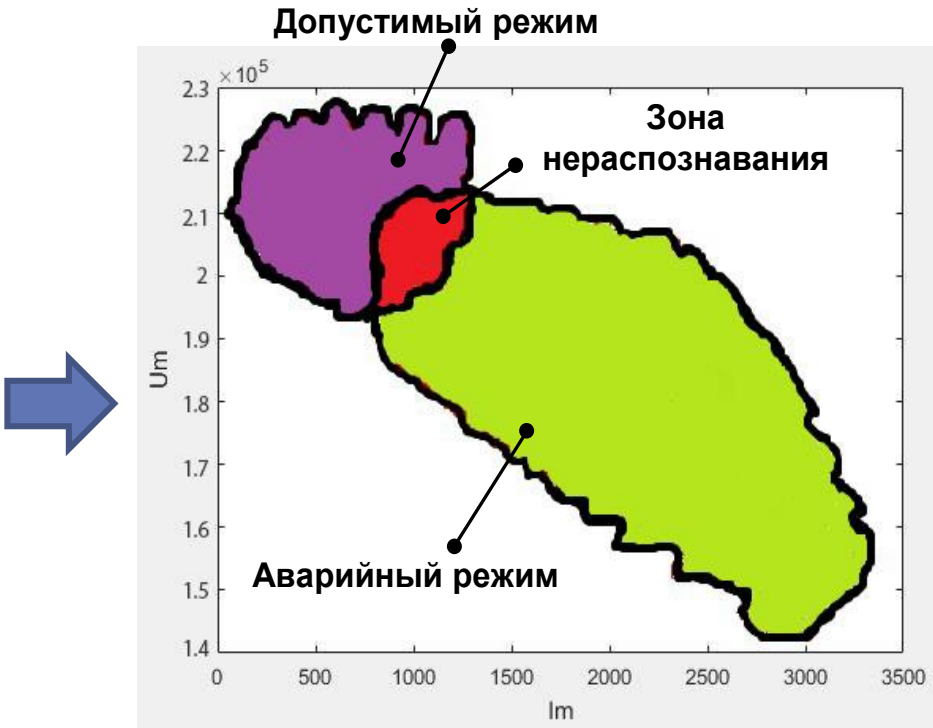


Рис. 2 - Области допустимых и аварийных режимов модуля тока и напряжения для моделированной сети

Определение уставочных значений при Байесовском критерии принятия решений:

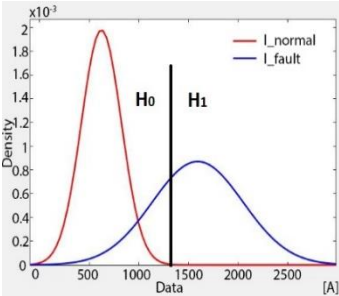


Рис. 3 - ПО1 - по модулю тока (I_m)

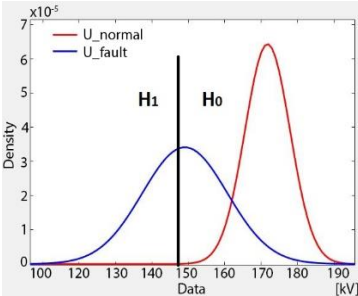


Рис. 4 - ПО2 - по модулю напряжения (U_m)

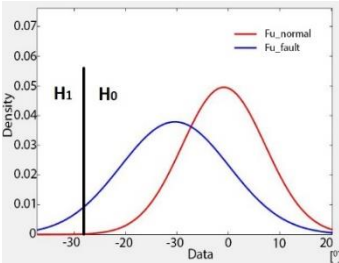


Рис. 5 - ПО3 - по фазе напряжения (φ)

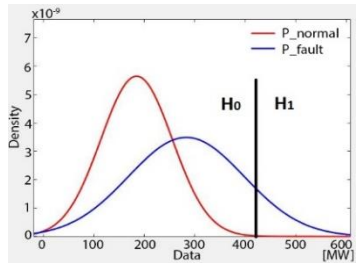


Рис. 6 - ПО4 - по активной мощности (Q)

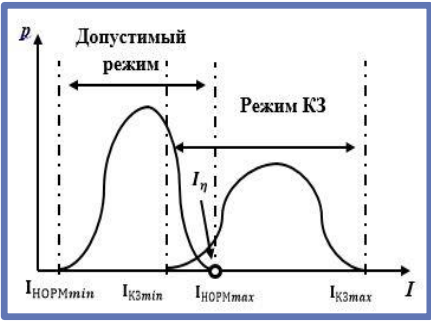


Рис. 7 - ПО5 - по реактивной мощности (P)

- H_0 – на вход ПО поступил сигнал, характерный для **нормального режима** (на выходе - логический 0);
- H_1 – на вход ПО поступил сигнал, характерный для **аварийного режима** (на выходе - логическая 1).



обеспечивает полную отстройку от всех допустимых режимов

Выбор параметров срабатывания позволяет оценить распознаваемость КЗ каждым пусковым органом (ПО1 - ПО5)

Пусковой орган	Параметр	p_1 (%)	q_1 (%)
ПО1 - по модулю тока	I_m	73,78	26,22
ПО2 - по модулю напряжения	U_m	43,16	56,84
ПО3 - по фазе напряжения	φ_u	6,28	93,72
ПО4 - по активной мощности	P	12,14	87,86
ПО5 - по реактивной мощности	Q	56,07	43,93

p_1 - вероятность срабатывания РЗА при КЗ;

$q_1 = 1 - p_1$ - вероятность не срабатывания при КЗ.

Вероятность срабатывания РЗА при гипотезе H_0 равна $p_0 = 0$.

Вероятность не срабатывания при гипотезе H_0 равна $q_0 = 1$.

Вектор А - сигнал, поступающий от всех ПО на вход логической части:

$A = A_{1p}, A_{2p}, \dots, A_{rp}$, где $i=1 \dots n$, n - количество наблюдаемых режимов (итераций), p - количество ПО.

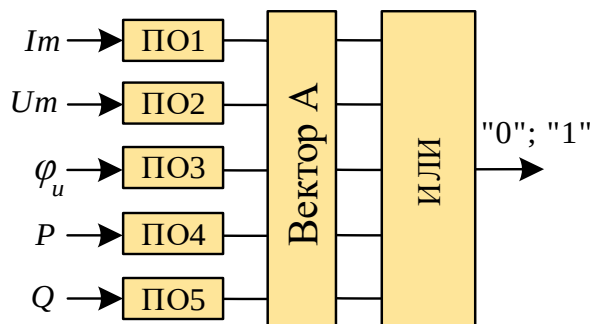


Рис. 1 - Объединение Вектора А логической операцией «ИЛИ»

Чувствительность устройства РЗА будет определяться наибольшей чувствительностью из набора ПО1 - ПО5.
Вероятность распознавания КЗ в резервной зоне
↑ на 5-8% по сравнению с самым чувствительным ПО.

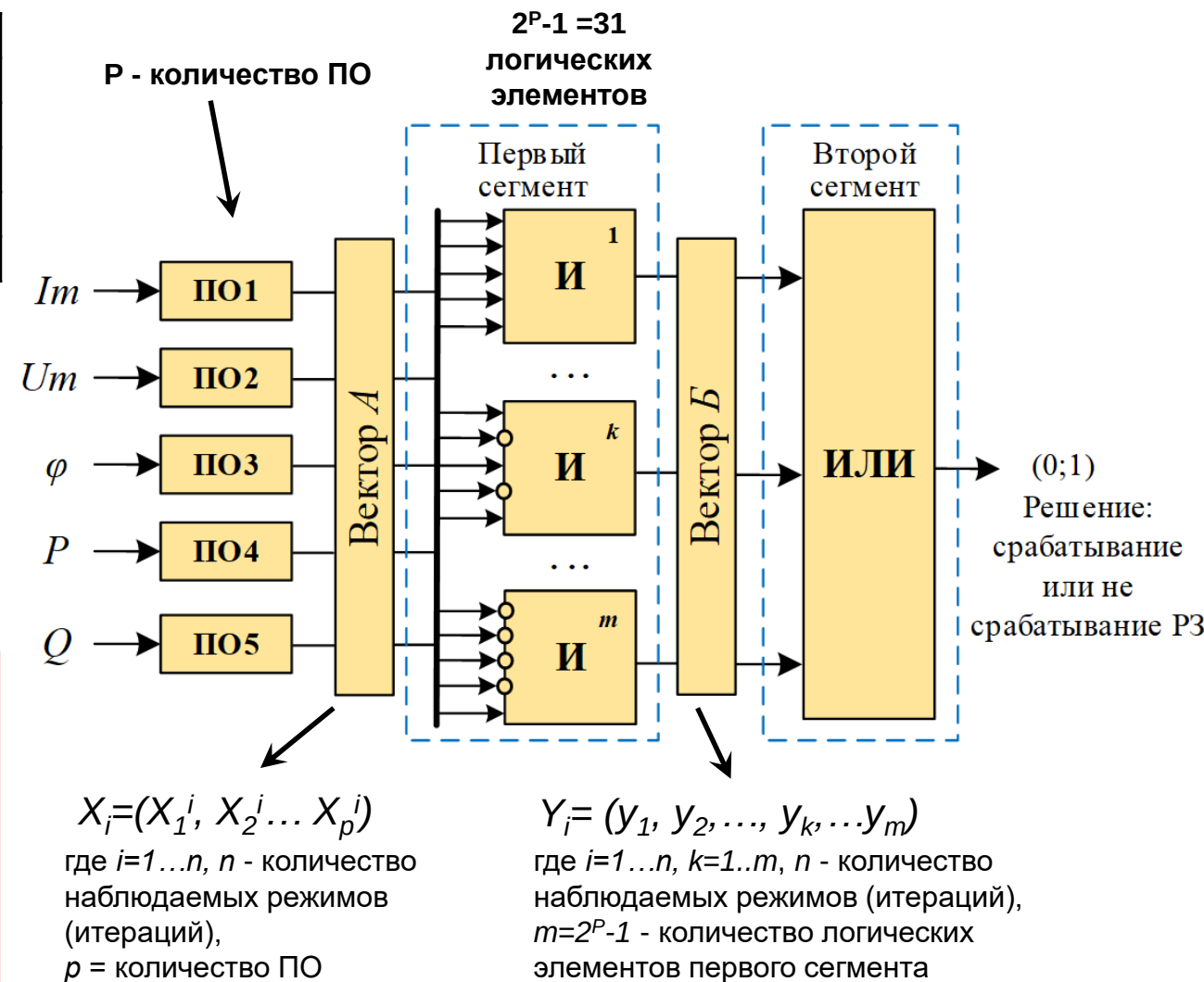


Рис. 2 - Структурная схема логической части объединения сигналов ПО

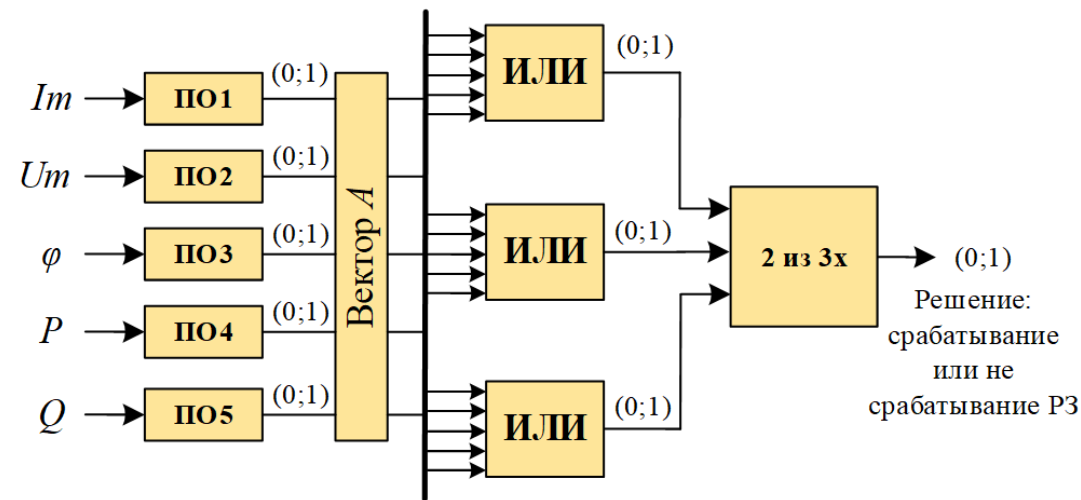


Рис. 1 - Структурная схема организации ЛЧ при объединении совокупности сигналов отдельных ПО принципом «2 из 3-х»

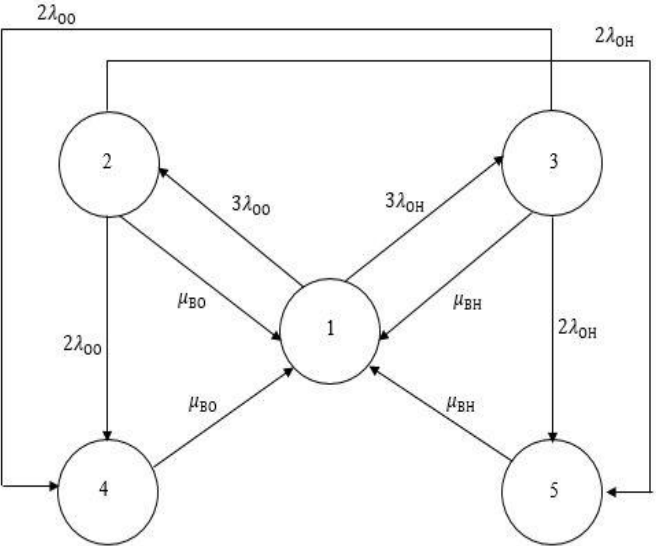


Рис. 2 - Марковская модель состояния предложенной схемы организации ЛЧ

Пять состояний:

- 1 - все три логических элемента работают безотказно;
- 2 - один из логических элементов отказал и отказ обнаружен;
- 3 - один из логических элементов отказал и отказ не обнаружен;
- 4 - два из логических элементов отказали и отказ обнаружен;
- 5 - два из логических элементов отказали и отказ не обнаружен

Табл. 1 - Значения интенсивности отказов и восстановления

Параметры	Значения
λ_{00}	0,018 (один раз в 25 лет)
λ_{0H}	0,026 (один раз в 35 лет)
μ_{BO}	1095 (8 часов в год)
μ_{BH}	4 (тест 6 месяцев)

λ_{00} - интенсивность отказов для обнаружения отказа логического элемента;
 λ_{0H} - интенсивность отказов для не обнаружения отказа логического элемента;
 μ_{BO} - интенсивность восстановления для обнаружения отказа логического элемента в год;
 μ_{BH} - интенсивность восстановления для не обнаружения отказа логического элемента в год.

Чтобы полученная система не была вырожденной, добавляется условие нормирования $\sum_{i=1}^n P_i$.



$$\begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.868 & 1096 & 5 & 1096 & 5 \\ 0.054 & -1095.088 & 0 & 0 & 0 \\ 0.078 & 0 & -4.06 & 0 & 0 \\ 0 & 0.036 & 0.02 & -1095 & 0 \\ 0 & 0.052 & 0.04 & 0 & -4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,981 \\ 4,837410^{-5} \\ 0,0187 \\ 6,169610^{-6} \\ 2,439610^{-4} \end{bmatrix}$$

Решение системы алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned} &-(3\lambda_{00} + 3\lambda_{0H})P_1 + \mu_{BO}P_2 + \mu_{BH}P_3 + \mu_{BO}P_4 + \mu_{BH}P_5 = 0; \\ &-(2\lambda_{00} + 2\lambda_{0H} + \mu_{BO})P_2 + 3\lambda_{00}P_1 = 0; \\ &-(2\lambda_{00} + 2\lambda_{0H} + \mu_{BH})P_3 + 3\lambda_{0H}P_1 = 0; \\ &-\mu_{BO}P_4 + 2\lambda_{00}P_2 + 2\lambda_{00}P_3 = 0; \\ &-\mu_{BH}P_5 + 2\lambda_{0H}P_2 + 2\lambda_{0H}P_3 = 0; \\ &P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 = 1. \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} &(1 - (3\lambda_{00} + 3\lambda_{0H}))P_1 + (1 + \mu_{BO})P_2 + (1 + \mu_{BH})P_3 + (1 + \mu_{BO})P_4 + (1 + \mu_{BH})P_5 = 1; \\ &-(2\lambda_{00} + 2\lambda_{0H} + \mu_{BO})P_2 + 3\lambda_{00}P_1 = 0; \\ &-(2\lambda_{00} + 2\lambda_{0H} + \mu_{BH})P_3 + 3\lambda_{0H}P_1 = 0; \\ &-\mu_{BO}P_4 + 2\lambda_{00}P_2 + 2\lambda_{00}P_3 = 0; \\ &-\mu_{BH}P_5 + 2\lambda_{0H}P_2 + 2\lambda_{0H}P_3 = 0. \end{aligned}$$

Вероятности каждого состояния:

Метод ИНС

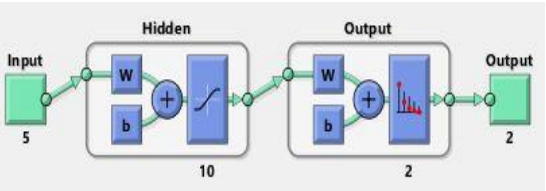


Рис. 1 - Модель используемой ИНС

Распознаваемость аварийных режимов увеличилась на **14,2%.**

Предсказанный класс	Фактический класс			
	1	2		
1	10000 50.0%	1566 7.8%	86.5%	13.5%
2	0 0.0%	8434 42.2%	100%	0.0%
	1	2	84.3%	92.2%
	0.0%	15.7%	7.8%	

Рис. 3 - Матрица путаницы ИНС

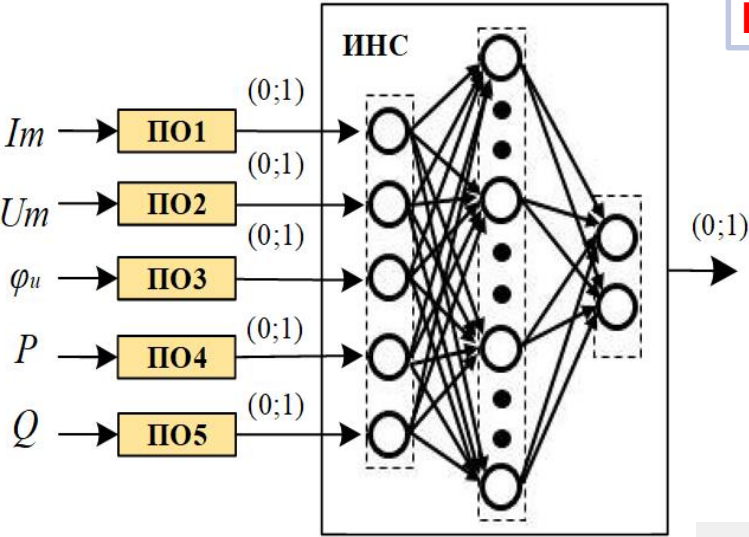


Рис. 2 - Схема объединения сигналов методом ИНС

Элемент матрицы:
(1,1) - допустимые распознанные ИНС режимы;
(2,2) – аварийные распознанные ИНС режимы;
(1,2) - режимы, которые считаются аварийными, но при обучении оказались нормальными (неправильное распознавание РЗ аварийных режимов);
(2,1) - режимы, которые считаются допустимым, но при обучении оказались аварийным (неправильное распознавание РЗ нормальных режимов).

Метод дерева решений

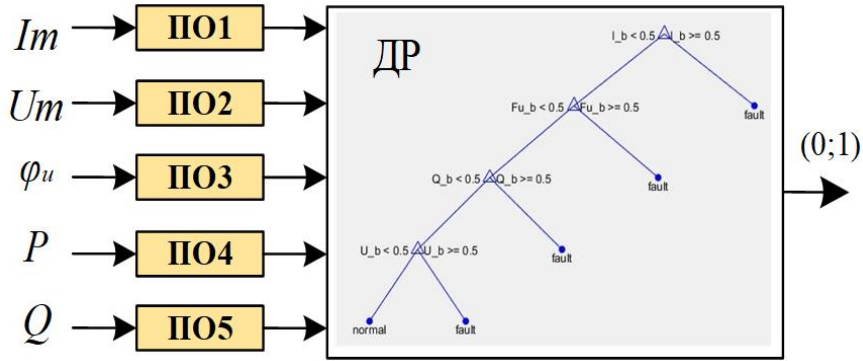


Рис. 4 - Схема объединения сигналов методом ДР

Матрица путаницы ДР

Фактический класс	Предсказанный класс	
	fault	normal
fault	8434	1566
normal	0	10000

Рис. 5 - Матрица путаницы ДР

Увеличение распознаваемости **более чем на 14%** по сравнению с использованием принципа «ИЛИ».

- Диагональные поля (fault, fault) и (normal, normal) представляют правильное распознавание аварийных и нормальных режимов.
- Поле (normal, fault), представляющее число режимов, при которых РЗА неправильно срабатывает, оказалось нулевым.
- Число нераспознаваемых аварийных режимов составило 1,06% (fault, normal).
- При объединении логических сигналов ПО методом ДР защита будет работать правильно, а распознаваемость аварийных режимов увеличивается до 84,34%.

Методы формирования логической части устройств многопараметрической защиты и автоматики с использованием информации от измерительных органов

Методы машинного обучения

Метод
к-ближайших
соседей

Метод
логистической
регрессии

Метод
опорных
векторов

Обучаемые
модули

Дерево
решений
(ДР)

Распознавание трудноразличимых КЗ на ЛЭП в СЭС ПП с ОРГ

Увеличение распознаваемости сложных повреждений в СЭС ПП с ОРГ **на 21,4% - 24%** и чувствительности защиты элементов по сравнению с дистанционным ИО.

Улучшение чувствительности (**более 5 раз**) и распознаваемости внутренних повреждений трансформатора по сравнению с традиционной ДЗТ. Распознавание повреждений с замкнутой частью обмотки **менее 0,1%**, на ранних этапах развития аварийной ситуации.

Искусственная
нейронная сеть
(ИНС)

Распознавание
витковых замыканий
трансформатора в
СЭС ПП с ОРГ

Методы
«сжатия данных»

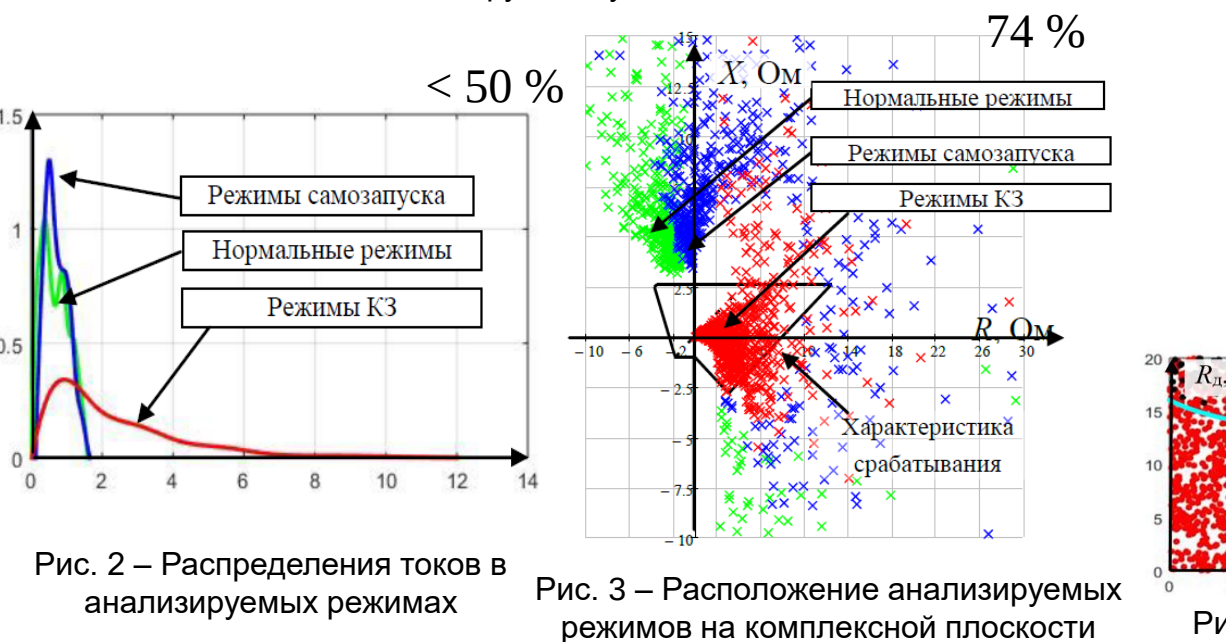
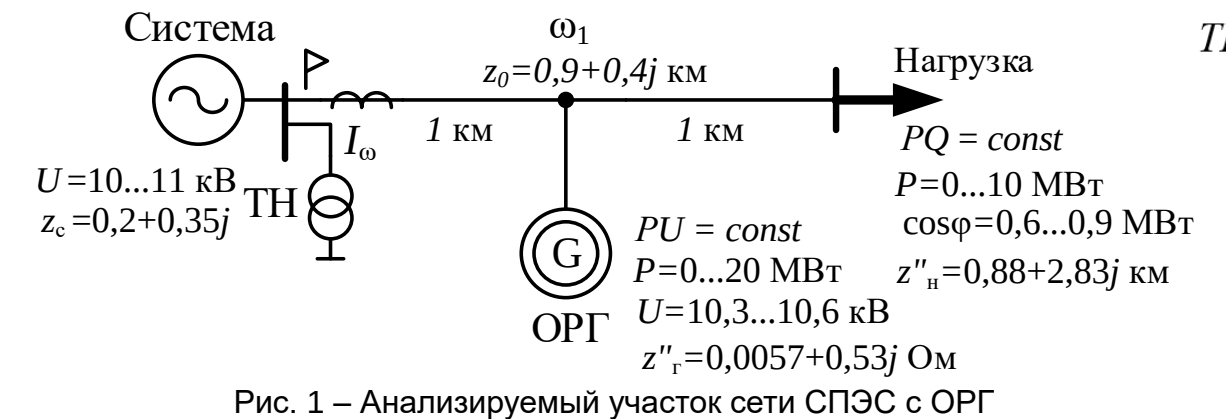
Формирование
обобщенного
признака

Метод
главных
компонент

Метод линейного
дискриминанта
Фишера

Защита дальнего резервирования по обобщенному признаку более эффективна в распознавании аварийных режимов (**более чем в 2,5 раза**), чем классические защиты, использующие один признак. Реализация ПО более простая.

Имитационное моделирование - источник данных для многопараметрических алгоритмов распознавания аварийных режимов с применением машинного обучения



Используемые критерии оценки эффективности алгоритма распознавания:

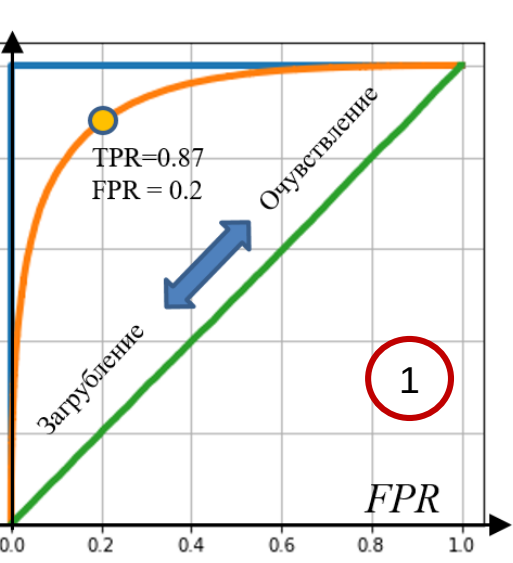


Рис. 4 – Примеры рабочих характеристик приемника для различных классификаторов (ROC-кривая)

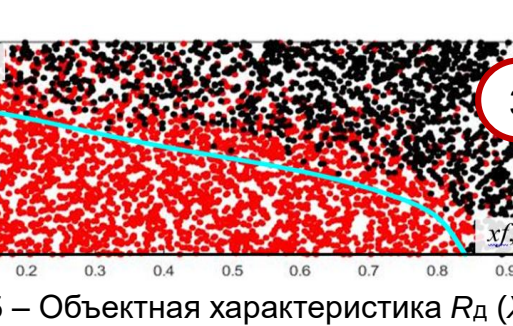


Табл. 1 – Матрица ошибок

		Распознанный класс	
		Авар. режим	Допуст. режим
Истинный класс	Авар. режим	$p(x_1 \Omega_1)$	$p(x_2 \Omega_1)$
	Допуст. режим	$p(x_1 \Omega_2)$	$p(x_2 \Omega_2)$

Правильное срабатывание (red arrow from top-left to bottom-right)
ошибка 2-го рода (red arrow from top-right to bottom-left)
ошибка 1-го рода (red arrow from bottom-left to top-right)
Правильное несрабатывание (red arrow from bottom-right to top-left)

Процент отключенных КЗ: $TPR = p(x_1 | \Omega_1) = \frac{TP}{P}$
Процент ложных срабатываний: $FPR = p(x_1 | \Omega_2) = \frac{FP}{N}$

Вероятность правильного срабатывания: $p(x_2 | \Omega_2) = \frac{TN}{N}$
Вероятность ложного срабатывания: $p(x_2 | \Omega_1) = \frac{FN}{P}$

P и N – кол-во элементов, относящихся α-режимам и β-режимам;
 TP и FP – кол-во срабатываний при α-режимах и β-режимах;
 FN и TN – кол-во несрабатываний при α-режимах и β-режимах.

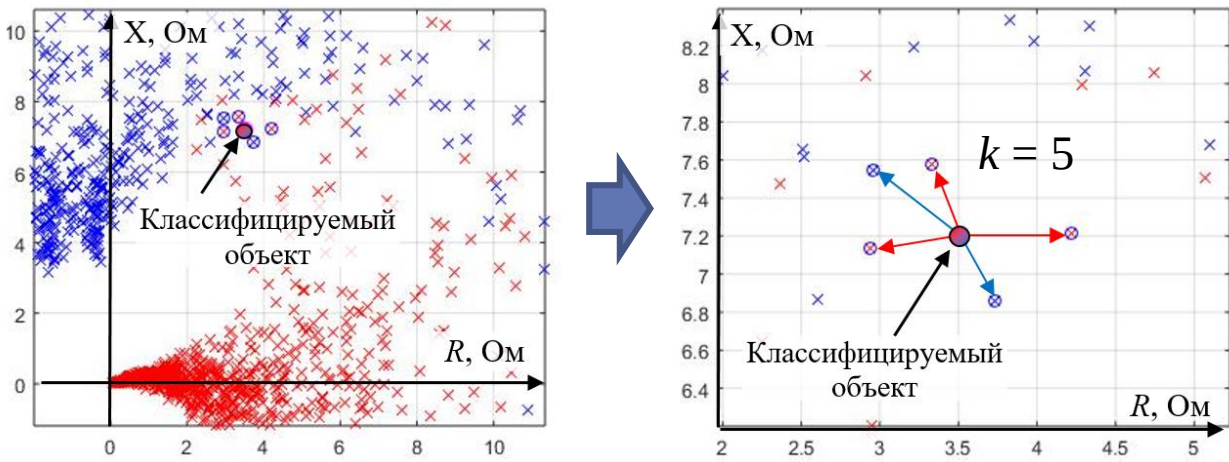


Рис. 1 – Классификация выборочного значения сопротивления в признаковом пространстве по методу K-ближайших соседей

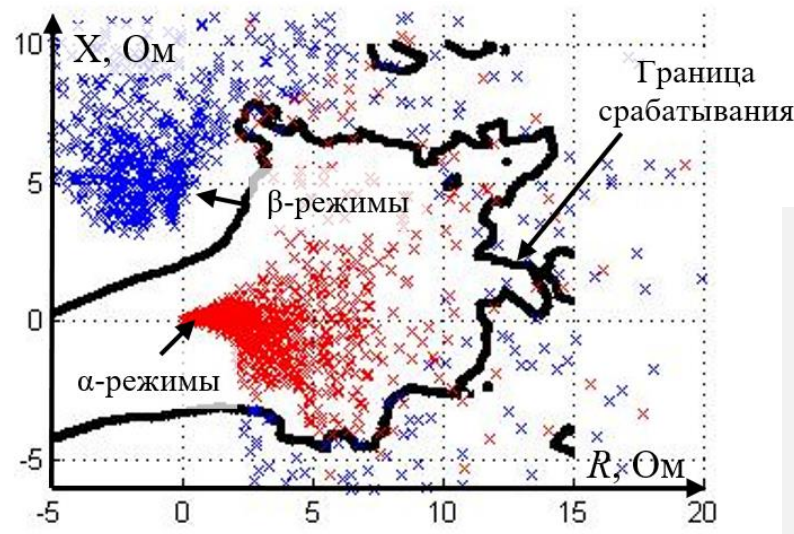


Рис. 2 – Область срабатывания защиты для метода K-ближайших соседей

α-режимы - короткие замыкания и прочие аварийные режимы, которые должны быть отключены релейной защитой

β-режимы - альтернативные режимы, т.е. те, от которых защита должна быть отстроена.

Решающее правило:
Объект относится к классу аварийных режимов (КЗ) только в том случае, если каждый из K его ближайших соседей также относится к данному режиму. В противном случае, объект относится к классу допустимых режимов.

Наиболее часто встречающиеся функции расстояния (метрики):

Евклидова метрика:
$$D(x,y)=\sqrt{\sum_{i=1}^m(x_i-y_i)^2}$$

Расстояние Чебышева:
$$D(x,y)=\max_{i=1...m}|x_i-y_i|$$

Манхэттенское расстояние:
$$D(x,y)=\sum_{i=1}^m|x_i-y_i|$$

где $x=[x_1, x_2...x_m]$, $y=[y_1, y_2...y_m]$ – векторы в m-мерном пространстве, расстояние между которыми требуется определить;
 $D(x,y)$ – значение расстояния между векторами.

Таблица 1 - Матрица ошибок, соответствующая методу K-ближайших соседей

Класс		Распознанный класс	
		α	β
Истинный класс	α	95,4 %	4,6%
	β	2,8%	97,2%

Метод логистической регрессии

$$\sum_{i=1}^N (\text{sigm}(\mathbf{B}_i \times \mathbf{Z}) - \mathbf{Y}_i)^2 \rightarrow \min_{\mathbf{Z}}$$

$$\text{sigm}(a) = \frac{1}{1 + e^{-a}}$$

$$p(\mathbf{x} \in \alpha) = \text{sigm}(\mathbf{x} \times \hat{\mathbf{Z}})$$

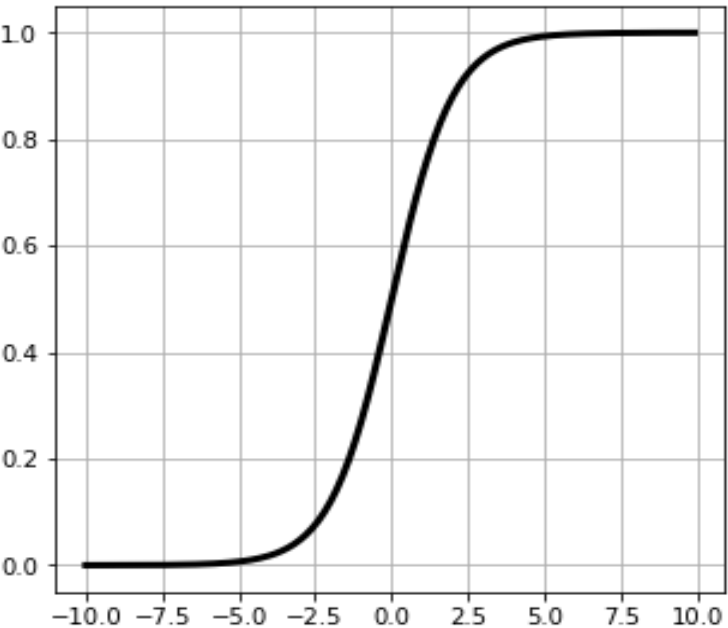


Рис. 1 – Вид функции sigm(x)

Метод опорных векторов

$$\min_{\mathbf{w}_H, b_H, \xi_1 \dots \xi_N} \frac{1}{2} \mathbf{w}_H^T \cdot \mathbf{w}_H + C \cdot \sum_{i=1}^N \xi_i,$$

$$\forall i \in 1 \dots N, y_i \cdot (\mathbf{w}^T \cdot \mathbf{x}_i + b) \geq 1 - \xi_i,$$

$$\forall i \in 1 \dots N, \xi_i \geq 0,$$

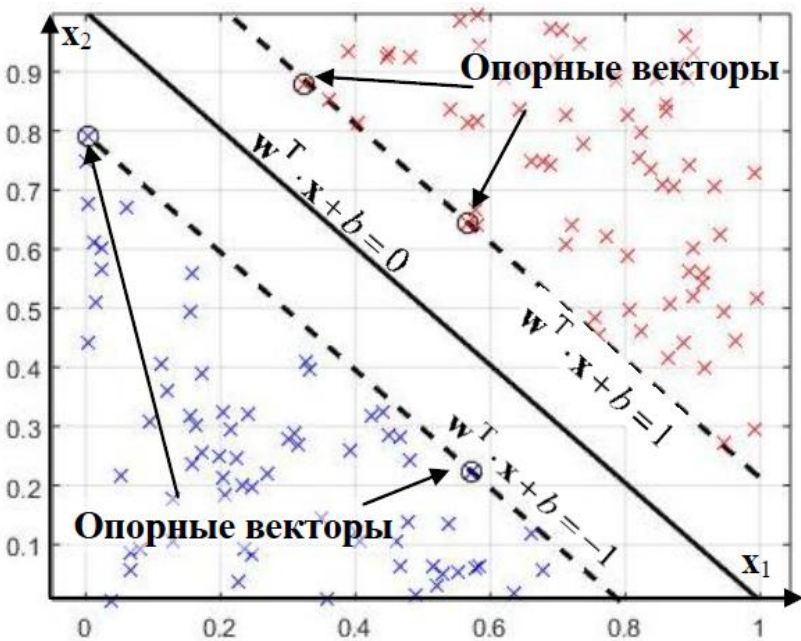


Рис. 2 – Принцип работы метода опорных векторов

Метод логистической регрессии

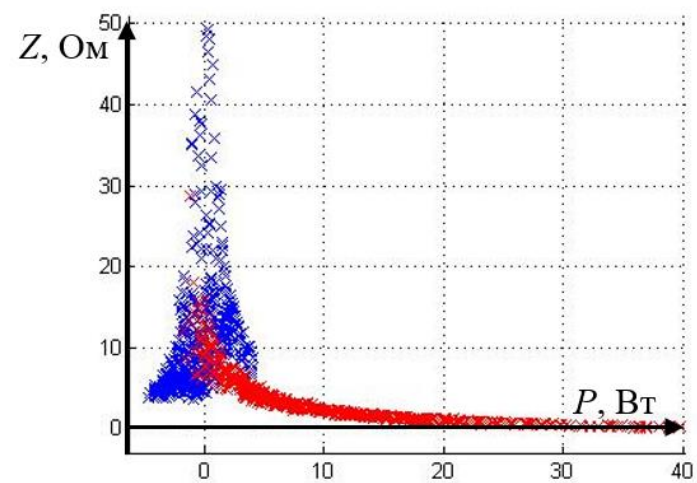


Рис. 1 – Расположение точек обучающей выборки в признаковом пространстве (P-Z)

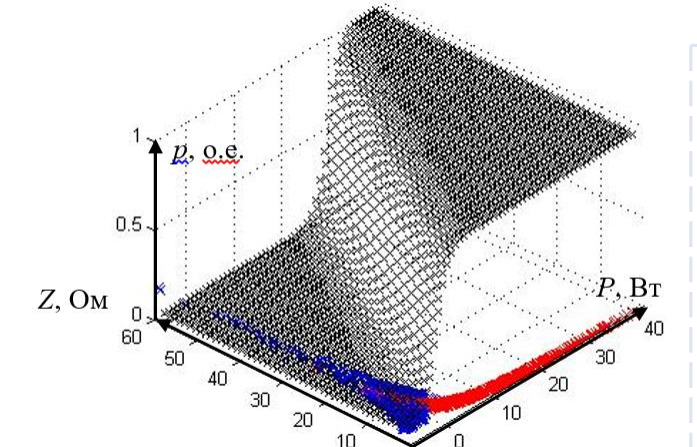


Рис. 2 – Поверхность, характеризующая вероятность принадлежности произвольного режима к классу α

$$p = \text{sigm}(0,877 \cdot P - 0,415 \cdot Z + 1,362) > p_{\text{уст}}$$

где $p_{\text{уст}}$ – выбранное значение уставки.

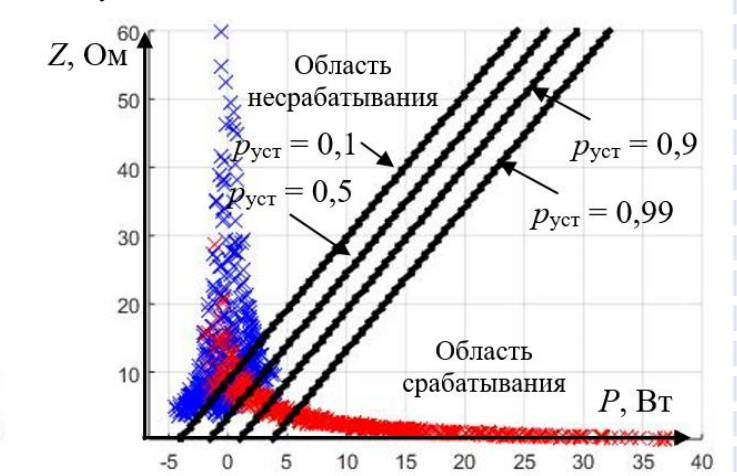


Рис. 3 – Семейство границ срабатывания, полученных при различных значениях уставки p

Метод опорных векторов

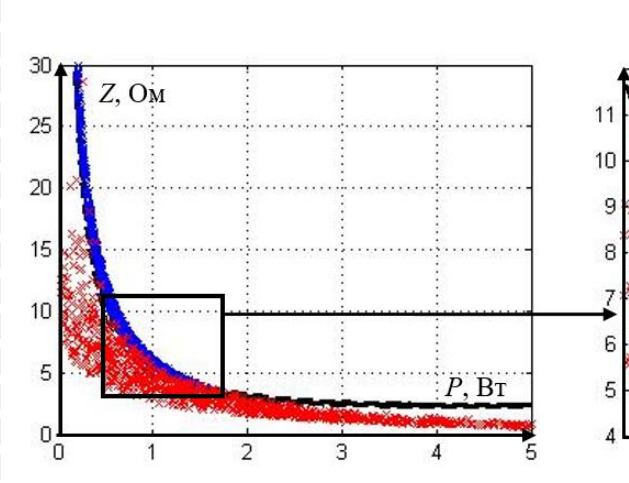


Рис. 4 – Расположение точек обучающей выборки в признаковом пространстве (P-Z)

Сравнение методов

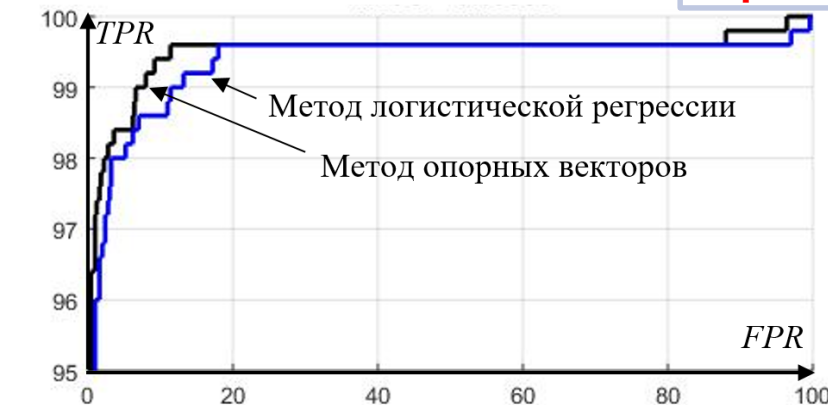


Рис. 5 – Сравнение ROC-характеристик для методов логистической регрессии и опорных векторов

Таблица 1 – Матрица ошибок, характерная для логистической регрессии (I-Q-Z)

Класс		Распознанный класс	
		Авар. режим	Доп. режим
Истинный класс	Авар. режим	98 %	2 %
	Доп. режим	0 %	100 %

Таблица 2 – Матрица ошибок, характерная для метода опорных векторов (X-R-P-Q)

Класс		Распознанный класс	
		Авар. режим	Доп. режим
Истинный класс	Авар. режим	100 %	0 %
	Доп. режим	0 %	100 %

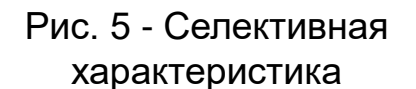
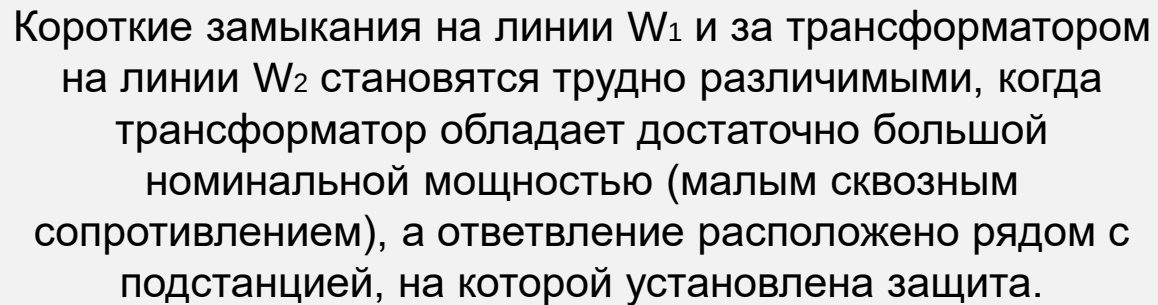


Таблица 1 - Матрица ошибок решающего дерева

Характеристики классов		Предсказанный класс	
		0	1
Истинный класс	0	97,995	2,005
	1	1,292	98,708

Вероятность правильного распознавания КЗ:

$$D = n_{п.с.} / (n_{п.с.} + n_{о.с.})$$

Вероятность ложного распознавания КЗ:

$$F = n_{л.с.} / (n_{л.с.} + n_{н.с.})$$

где $n_{п.с.}$, $n_{л.с.}$ – число правильных и ложных срабатываний;
 $n_{о.с.}$ - число отказов срабатывания;
 $n_{н.с.}$ – число правильных не срабатываний, в общем числе имитационных экспериментов

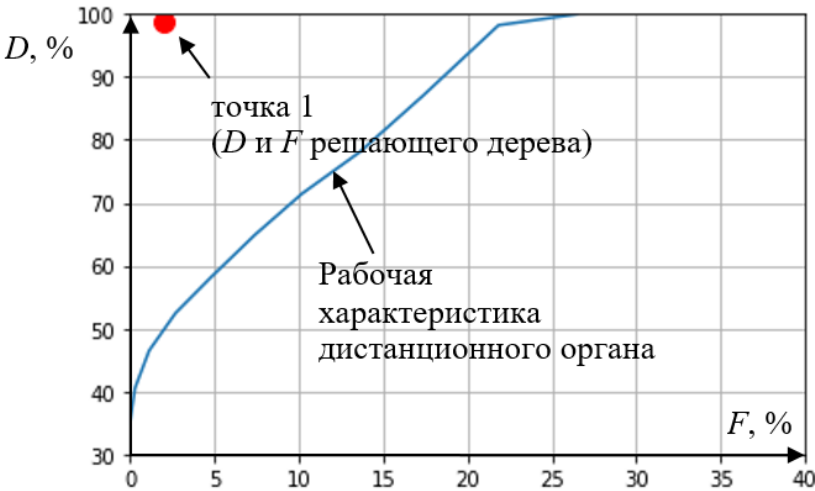


Рис. 1 - Соотношение характеристик эффективности функционирования алгоритма решающего дерева и дистанционного органа РЗА

Алгоритм решающего дерева в устройстве РЗА обеспечивает обнаружение 98,7% КЗ на ЛЭП W1, при этом вероятность ложного срабатывания устройства РЗА при КЗ за трансформатором составляет около 2% - **более чем на 24% эффективнее «Дистанционного ИО»**

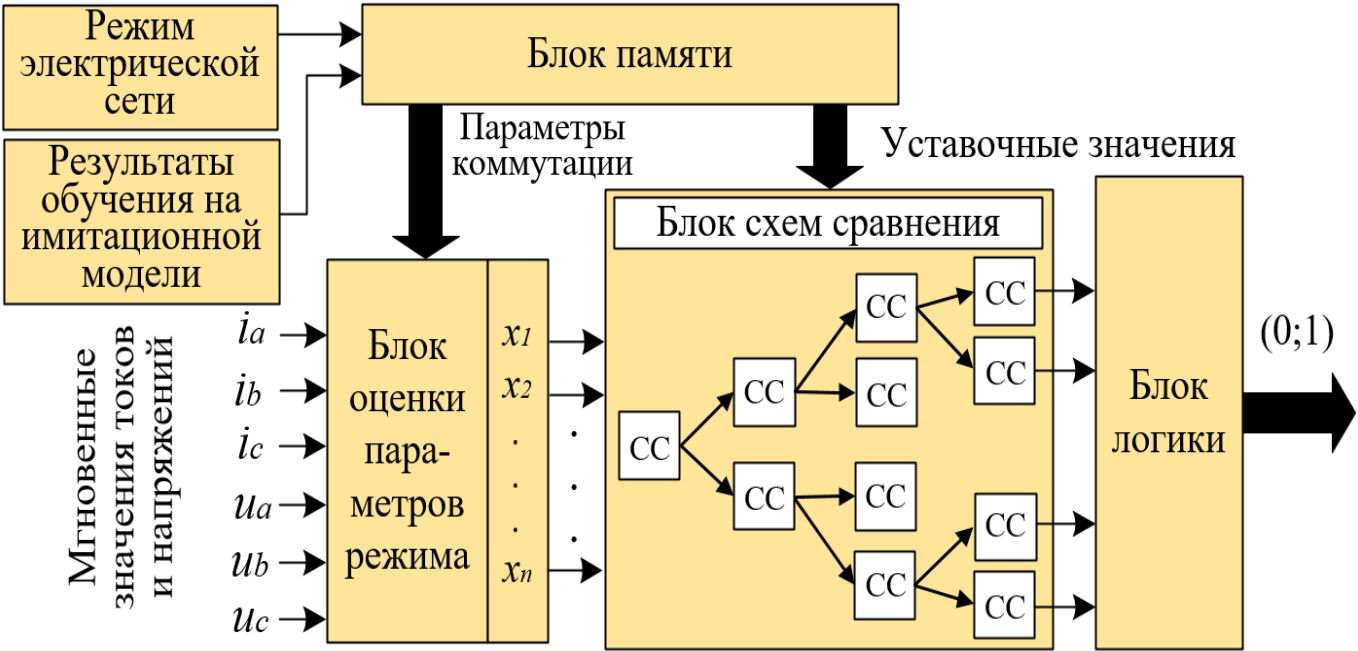
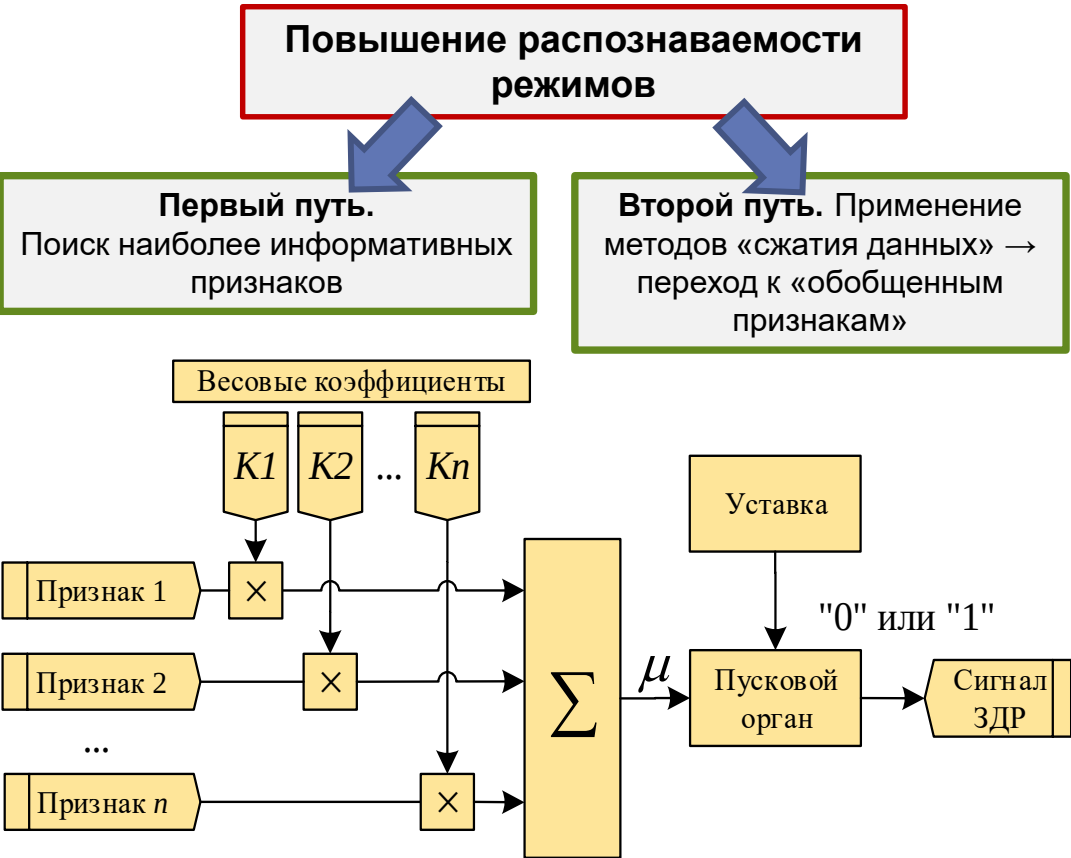


Рис. 2 - Структурная схема устройства РЗА, реализующего алгоритм решающего дерева



Обобщенный признак эффективнее признаков классических токовых защит

в 5-6 раз,

при этом пуск выполняется по уставке аналогичной традиционной токовой защите

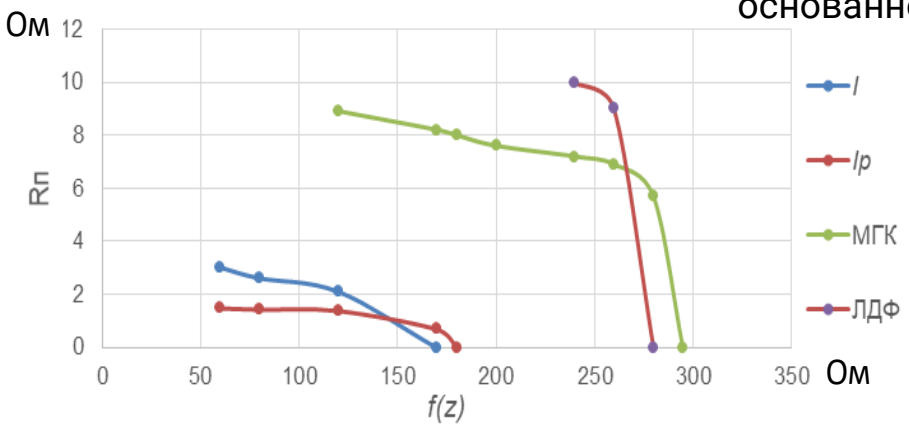


Рис. 3 – Сравнение объектных характеристик работы РЗА для одномерных признаков и обобщенных признаков (по МГК и ЛДФ)

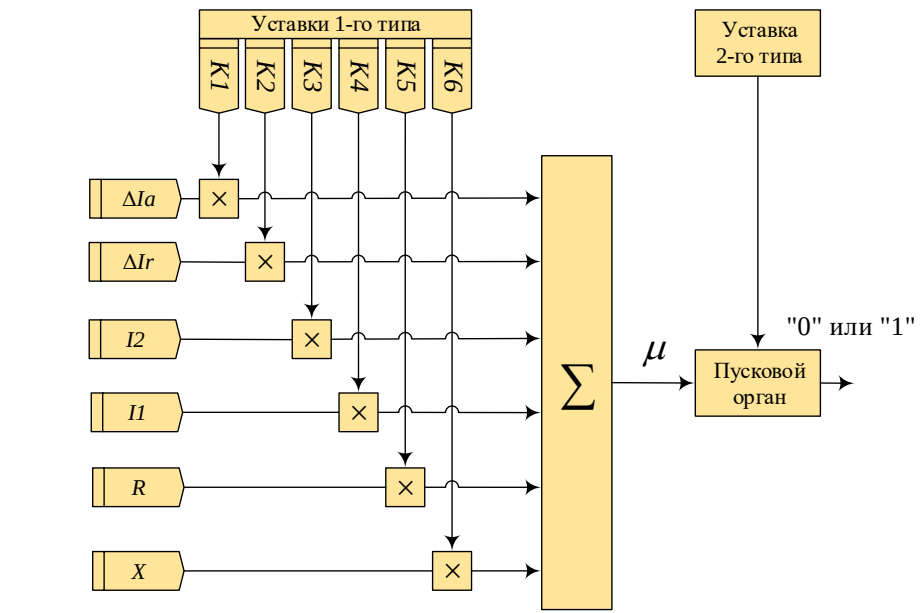


Рис. 1 – Логическая схема пускового органа основанного на методе ЛДФ

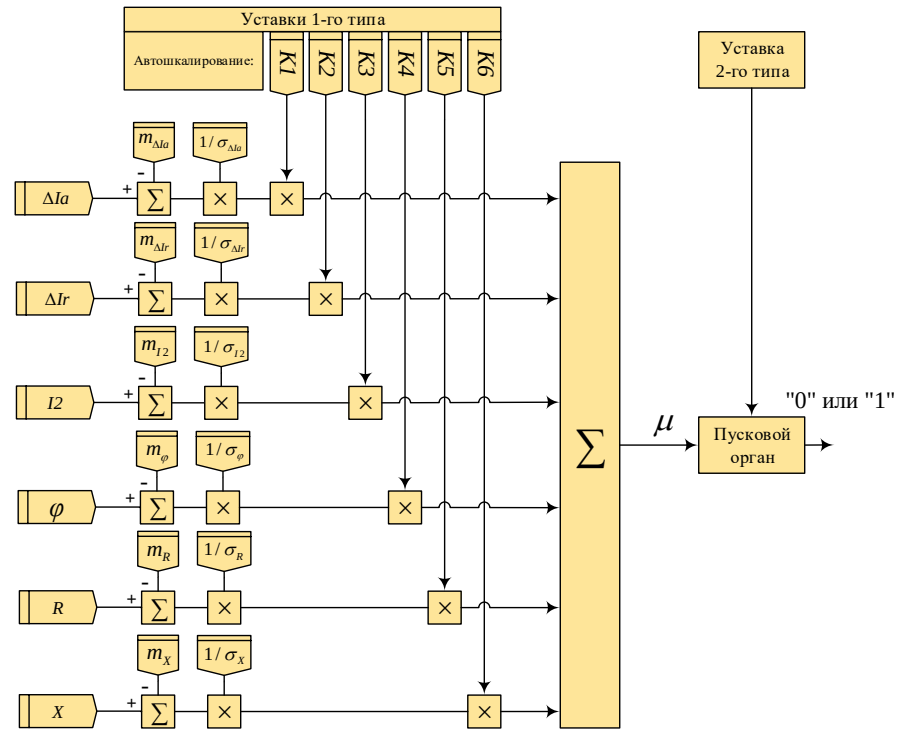


Рис. 2 – Логическая схема пускового органа основанного на методе МГК

ΔI_a – приращение активного тока, ΔI_r – приращение реактивного тока, I_2 – ток обратной последовательности, φ – значение фазы, I_1 – ток прямой последовательности, R – активное сопротивление, X – реактивное сопротивление, $K1-K6$ – весовые коэффициенты для каждого исходного признака, μ – обобщенный признак.

Вероятность правильного срабатывания релейной защиты силовых трансформаторов составляет **около 70 %**

Режимы для исследования

Нормальные режимы работы силового трансформатора

Витковые замыкания в обмотках силового трансформатора

Табл. 1 - Модельные диапазоны изменения параметров сети

Параметр		Обозн.	Диапазон изменения
Напряжение системы		E_s	$[0,95...1,05]$ о.е.
Модуль сопротивления прямой последовательности системы		Z_s	$[10...42]$ Ом
Угол сопротивления прямой последовательности системы		ΔZ_s	$[80...90]$ град.
Величина нагрузки	Активная мощность	P	$[10...40]$ кВт
	$\text{tg}\varphi$	$\text{tg}PQ$	$[0,2...0,4]$ о.е.
Для межвитковых замыканий:	Изменение числа замкнувшихся витков обмотки	L	$[0,02...1]$ %
	Напряжение замыкания	-	ВН, НН
	Фаза замыкания	-	А, В, С

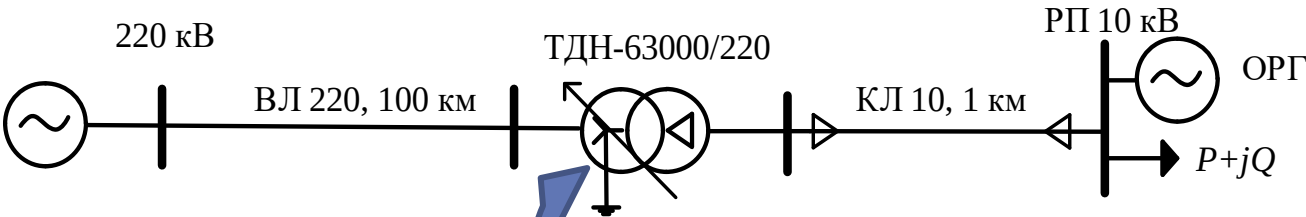


Рис.1 - Схема исследуемого участка электрической сети СЭС



Рис.2 - Последствия витковых замыканий:

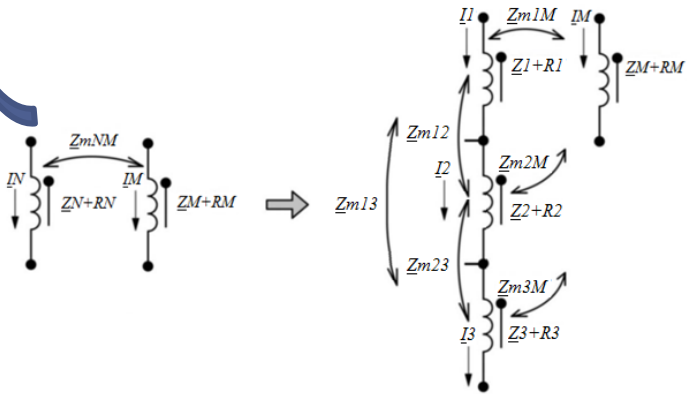
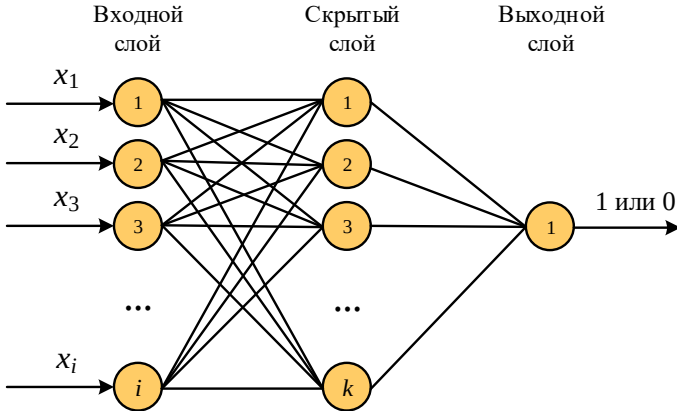
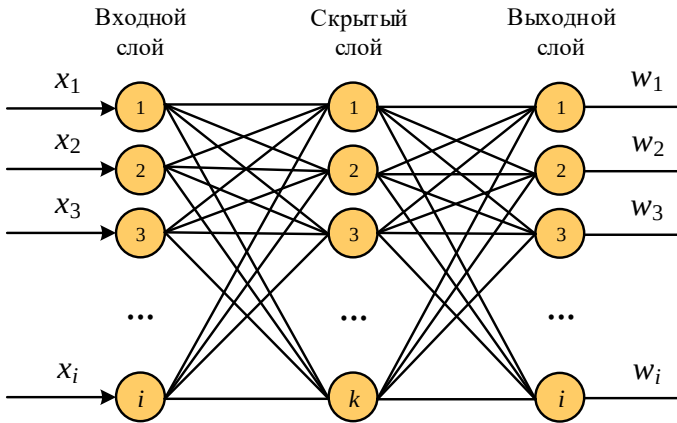


Рис.3 - Схема замещения расщепленной обмотки при возникновении внутреннего повреждения

ПЕРВЫЙ ВАРИАНТ- для принятия решения о возникновении виткового замыкания (как пусковой орган РЗ)



ВТОРОЙ ВАРИАНТ- для расчета коэффициентов многопараметрической защиты



x_i – информативный признак
 w_i – весовой коэффициент признака

Обучение нейронной сети. Вариант 1.

Нейронная сеть в качестве пускового органа защиты

Таблица 1 - Входные данные обучающей выборки

Режим	ВЗ	НР	НР	НР	НР	ВЗ	НР	...
Номер	1	2	3	4	5	6	7	...
la1	0,683	0,662	0,642	0,704	0,618	0,564	0,61	...
lb1	0,711	0,662	0,642	0,704	0,618	0,768	0,61	...
lc1	0,536	0,662	0,642	0,704	0,618	0,755	0,61	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...
la2	0,644	0,713	0,691	0,757	0,666	0,71	0,657	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...

Таблица 2 - Выходные данные обучающей выборки

Режим	ВЗ	НР	НР	НР	НР	ВЗ	НР	...
Номер	1	2	3	4	5	6	7	...
Значение	1	0	0	0	0	1	0	...

ВЗ – витковое замыкание, НР – нормальный режим

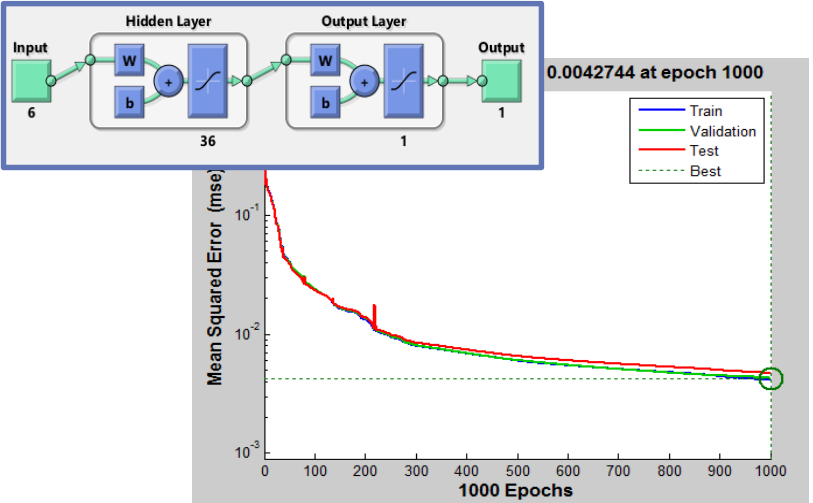


Рис. 2 - Изменение среднеквадратичной ошибки в процессе обучения ИНС

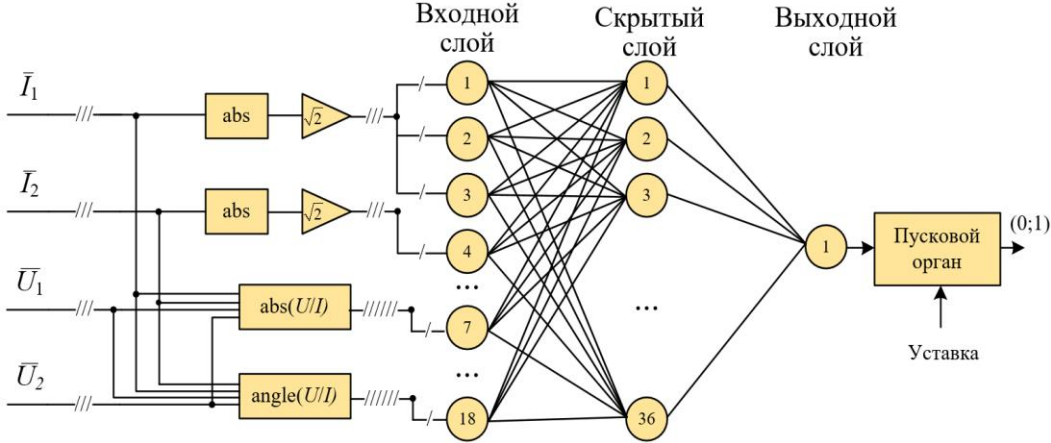


Рис. 3 - Структура алгоритма защиты



Рис. 4 - Результат тестирования ИНС



Рис. 1 - Алгоритм метода обратного распространения ошибки

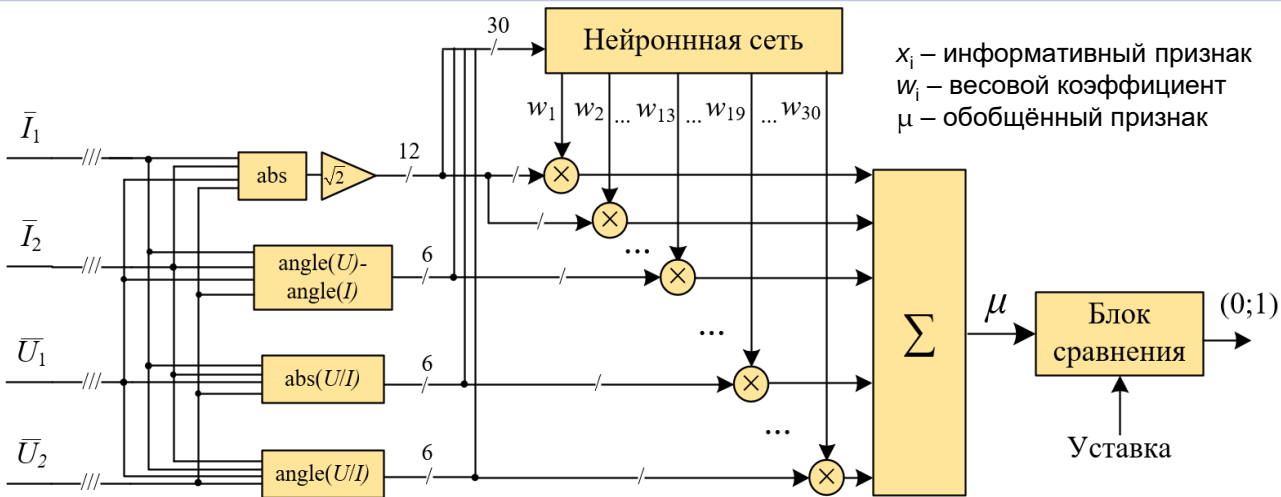


Рис. 1 - Структура защиты на основе обобщенного признака

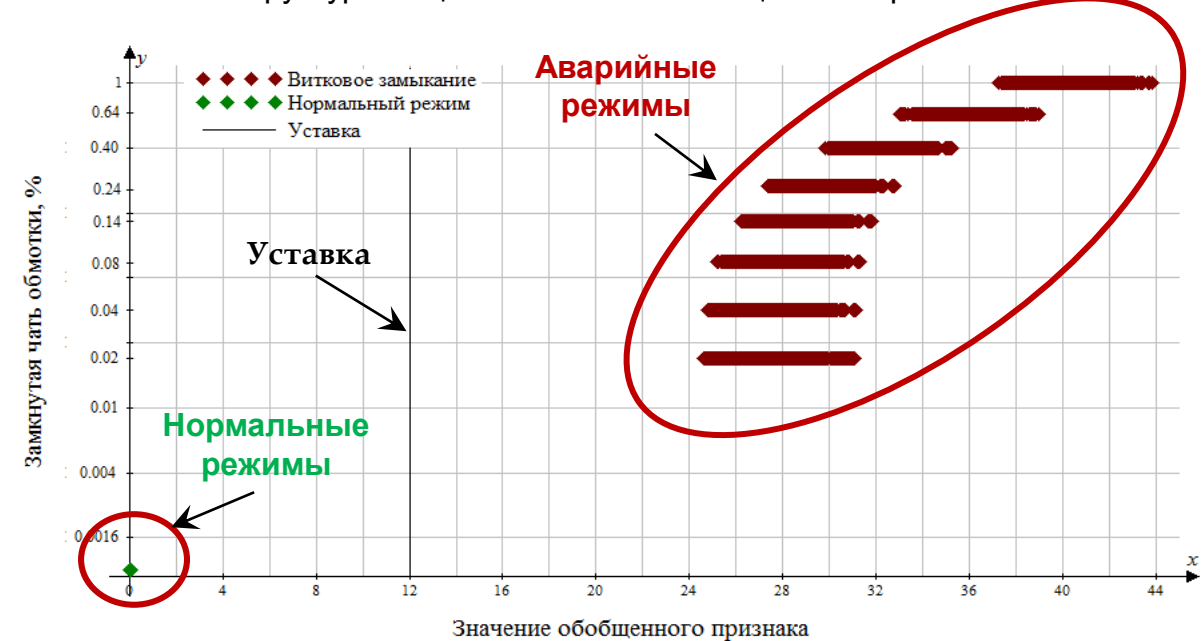


Рис. 2 - Результат тестирования ИНС

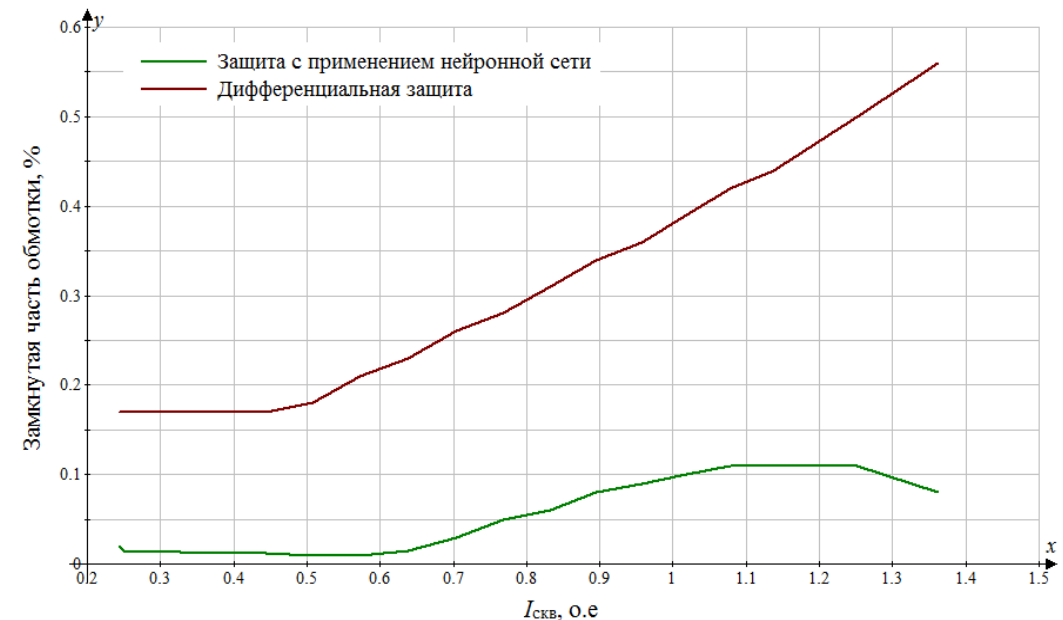


Рис. 3 - Зависимости, характеризующие чувствительность защит трансформатора от значения сквозного тока

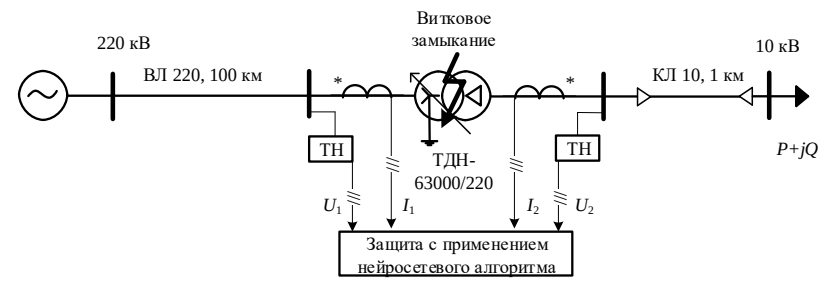


Рис. 4 - Схема защиты с использованием нейросетевого алгоритма

Защита с применением ИНС существенно (**более 5 раз**) превосходит по чувствительности традиционную ДЗТ при распознавании витковых замыканий. Техническое решение на основе ИНС способно распознать витковые замыкания с процентом замкнутой части обмотки **менее 0,1%** (1-3 витка), на ранних этапах развития аварийной ситуации.

Ограничение применения традиционных методов измерения (оценки) параметров режима и цифровой обработки сигналов в устройствах управления режимами (включая устройства АЧР), релейной защиты и противоаварийной автоматики (РЗ и ПА), телемеханики, синхронизированных векторных измерений и др.

Потенциальная точность оценивания частоты гармонического сигнала:

$$(1/\sigma_f^2) = q^2 \cdot \tau^2$$

где σ_f^2 – дисперсия оценки частоты; q – отношение сигнал/шум (сигнал/помеха); τ – эффективная длительность гармонического сигнала.

При реализации АЧР необходимо **обеспечить точную оценку частоты** в энергорайоне в коротких интервалах времени (**быстро**) при значительных **отклонениях ПКЭ** от нормируемых значений

Требуется разработка и внедрение **адаптивных средств автоматики управления режимами**.

Использование процедуры последовательного анализа Вальда.

Статистическая задача при распознавании режимов

Алгоритм АЧР

Алгоритм АЧР с процедурой усечения

Модификация алгоритма АЧР без процедуры усечения

Модификация алгоритма АЧР с адаптивными уставками

Апробирование алгоритмов на имитационной PSCAD-модели

- Обеспечения гарантированного высокого **быстродействия** устройств автоматики управления режимами;
- **Правильное принятие решений** в условиях неоднозначных измерений частоты и **наличия искажающих факторов** (плохие ПКЭ, сложные переходные процессы).

Возможны следующие шесть ситуаций совмещения случайных событий «решения»

$\hat{H} = \{H_0, H_1, H_n\}$ и «условия» $H = \{H_0, H_1\}$ для текущего измерения x_i :

- $\hat{H}_1H_1$ – правильное распознавание аварийного режима;
- $\hat{H}_0H_1$ – пропуск аварийного режима;
- $\hat{H}_nH_1$ – принятие решения «не знаю» в условиях аварийного режима;
- $\hat{H}_nH_0$ – принятие решения «не знаю» в условиях нормального режима;
- $\hat{H}_1H_0$ – ложное принятие решения об аварийном режиме;
- $\hat{H}_0H_0$ – правильное распознавание нормального режима.

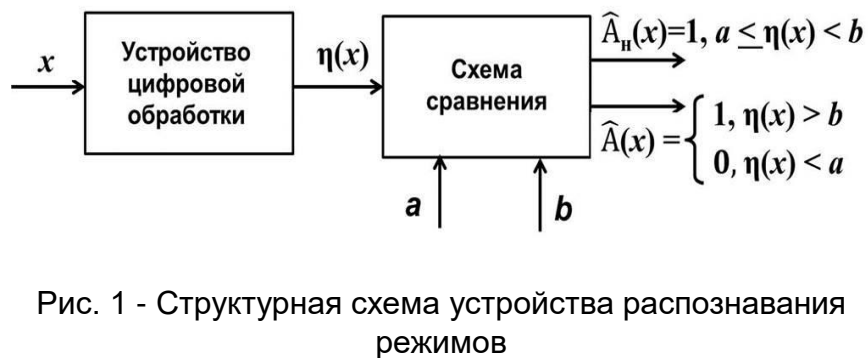


Рис. 1 - Структурная схема устройства распознавания режимов

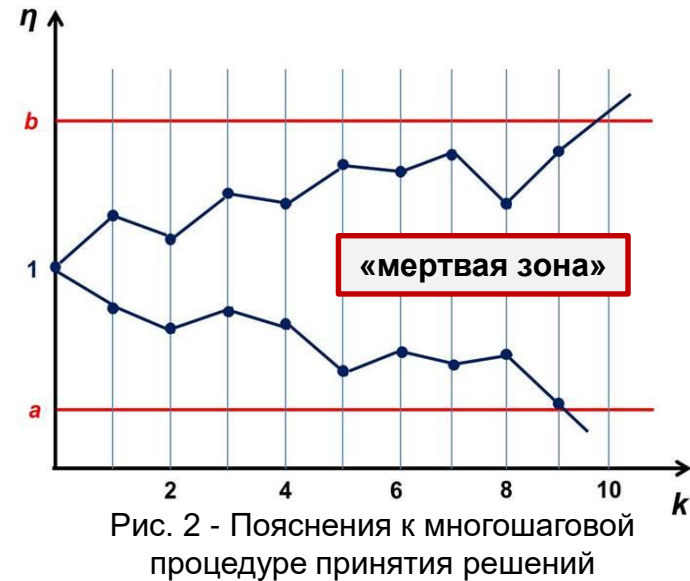


Рис. 2 - Пояснения к многошаговой процедуре принятия решений

Предварительное имитационное моделирование

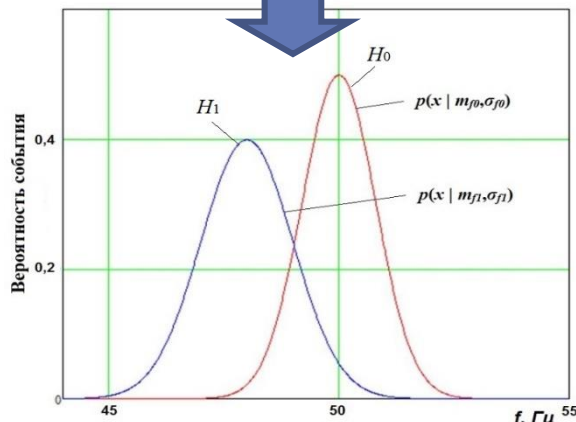


Рис. 3 - Статистические распределения частоты для норм. и авар. режимов

Для каждого измеренного значения частоты принимается одна из трёх гипотез:

- H_0 – частота соответствует нормальному режиму;
- H_1 – частота соответствует аварийному режиму;
- H_n – не удастся однозначно определить принадлежность частоты к аварийному или нормальному режиму.

При получении первого значения частоты вычисляется отношение правдоподобия:

$$\eta(x_1) = \frac{p(x_1 | m_{f1}, \sigma_{f1})}{p(x_1 | m_{f0}, \sigma_{f0})} = \frac{\exp[-(x_1 - m_{f1})^2 / 2\sigma_{f1}^2]}{\exp[-(x_1 - m_{f0})^2 / 2\sigma_{f0}^2]} = \exp\{1/2 [-(x_1 - m_{f1})^2 / \sigma_{f1}^2 + (x_1 - m_{f0})^2 / \sigma_{f0}^2]\}.$$

При k измерениях частоты отношение правдоподобия принимает вид:

$$\prod_{i=1}^k \eta(x_i) = \frac{[p(x_1 | m_{f1}, \sigma_{f1}) \dots p(x_k | m_{f1}, \sigma_{f1})]}{[p(x_1 | m_{f0}, \sigma_{f0}) \dots p(x_k | m_{f0}, \sigma_{f0})]} = \prod_{i=1}^k \exp\{1/2 [-(x_i - m_{f1})^2 / \sigma_{f1}^2 + (x_i - m_{f0})^2 / \sigma_{f0}^2]\}.$$

Распознавание режима осуществляется по отношению правдоподобия с принятием следующих гипотез:

$$H_1, \text{ если } \prod_{i=1}^k \eta(x_i) > b; H_0, \text{ если } \prod_{i=1}^k \eta(x_i) \leq a;$$

Уставочные значения:
 $a = \alpha / (1 - \beta); b = (1 - \alpha) / \beta,$
 α - ошибка первого рода;
 β - ошибка второго рода.

$$H_n, \text{ если } a \leq \prod_{i=1}^k \eta(x_i) < b.$$

Предлагается адаптивный выбор параметров срабатывания АЧР, предполагающий изменение постоянных уставок a, b в зависимость $a(k), b(k)$ по мере возрастания времени.

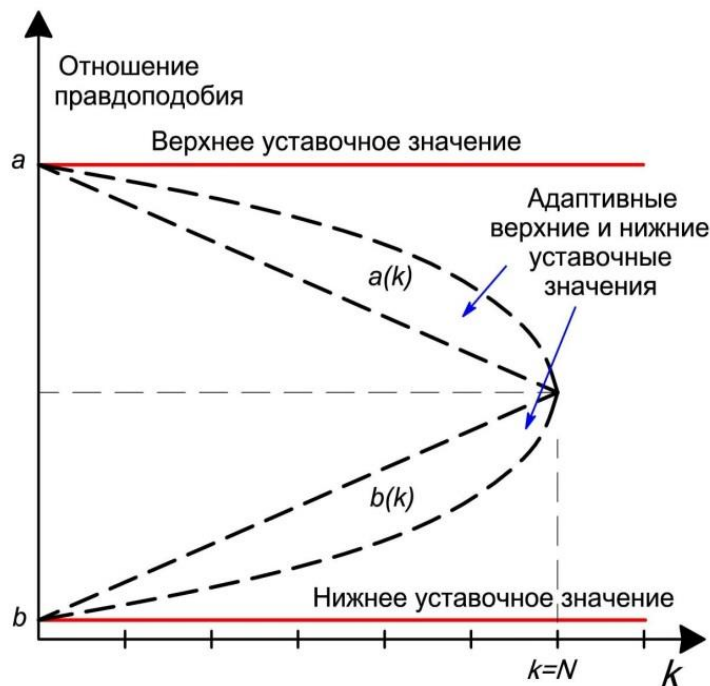


Рис. 1 – Представление изменяемых уставок модифицированной процедуры Вальда

Распознавание реализуется дискретно до тех пор, пока отношение правдоподобия находится между $a(k)$ и $b(k)$:

$$b(k) \leq \prod_{i=1}^k \eta(x_i) < a(k) \quad k=1,2,\dots$$

Предположим, что на вход устройства АЧР поступает выборка частоты, содержащая следующие значения: $x_1 = 49,1$ Гц; $x_2 = 49$ Гц; $x_3 = 48,8$ Гц; $x_4 = 49$ Гц; $x_5 = 48,9$ Гц; $x_6 = 48,8$ Гц.

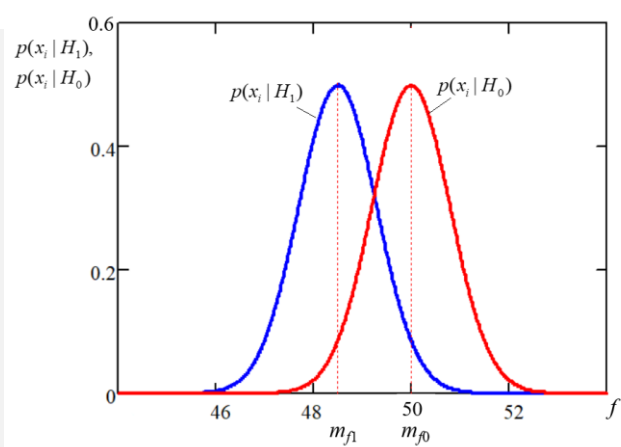


Рис. 1 - Плотности вероятностей распределения ошибок измерения частоты в нормальном и аварийном режимах

Табл. 1 - Расчет отношений правдоподобия для измеренных значений частоты

Номер шага	Измеренное значение частоты (Гц)	Отношение правдоподобия для измеренного значения частоты	Отношение правдоподобия на текущем шаге последовательного анализа
1	49,1	$\eta(49,1) = 1,568$	$\prod_{i=1}^1 \eta(x_i) = 1,568$
2	49	$\eta(49) = 2,117$	$\prod_{i=1}^2 \eta(x_i) = 1,568 \cdot 2,117 = 3,32$
3	48,8	$\eta(48,8) = 3,857$	$\prod_{i=1}^3 \eta(x_i) = 3,32 \cdot 3,857 = 12,807$
4	49	$\eta(49) = 2,117$	$\prod_{i=1}^4 \eta(x_i) = 12,807 \cdot 2,117 = 27,113$
5	48,9	$\eta(48,9) = 2,858$	$\prod_{i=1}^5 \eta(x_i) = 27,113 \cdot 2,858 = 77,478$
6	48,8	$\eta(48,8) = 3,857$	$\prod_{i=1}^6 \eta(x_i) = 77,478 \cdot 3,857 = 298,867$

Пример реализации:

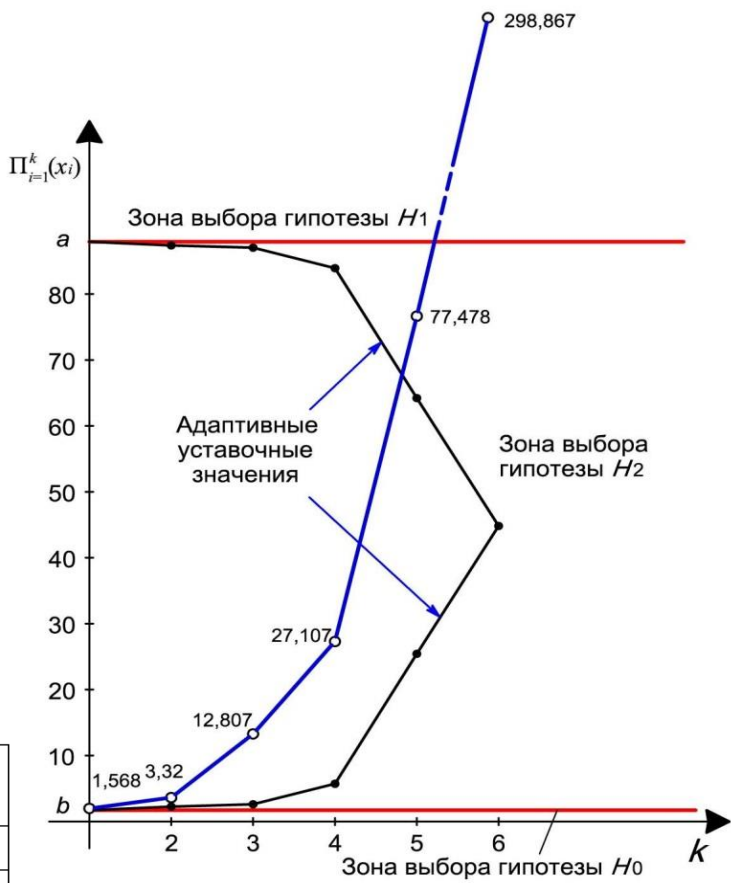


Рис. 2 - Процесс реализации последовательного анализа в устройстве АЧР с изменяемыми уставочными значениями

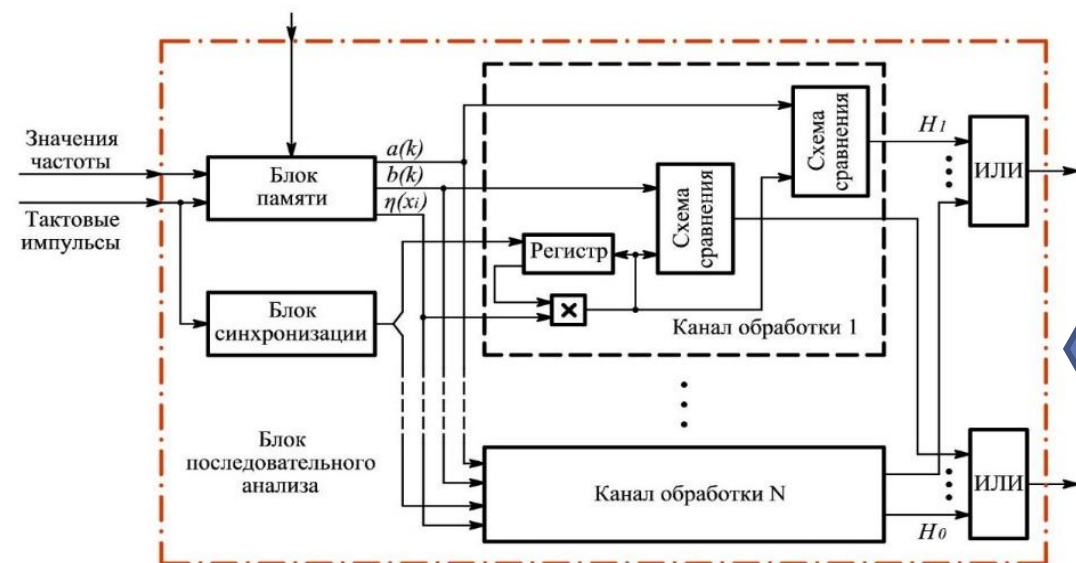


Рис. 1 – Структурная схема одной ступени АЧР

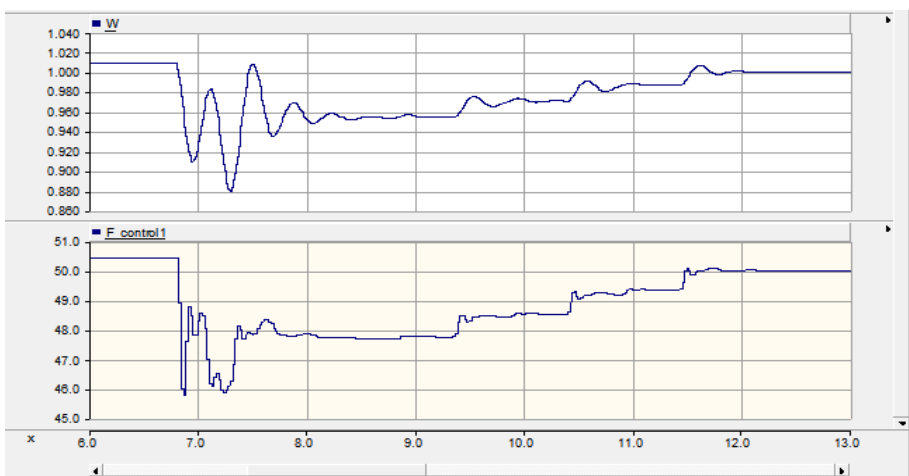


Рис. 2 – Изменение скорости СГ и частоты при работе алгоритма по Вальду

Устройство распознавания режимов имеет многоканальную структуру, соответствующую очередям АЧР и нормальному режиму. В каждом из каналов реализуется независимая процедура принятия решения по методу Вальда. Таким образом, при поступлении каждого отсчёта напряжения на вход многоканальной схемы устройства АЧР запускается несколько параллельных вычислений, причём каждый новый отсчёт уточняет предыдущее значение.

Техническая реализация алгоритма последовательного анализа Вальда и его модификаций достаточно проста, не требует существенных программно-аппаратных затрат и перспективна к внедрению как в существующие, так и в перспективные устройства противоаварийного управления.

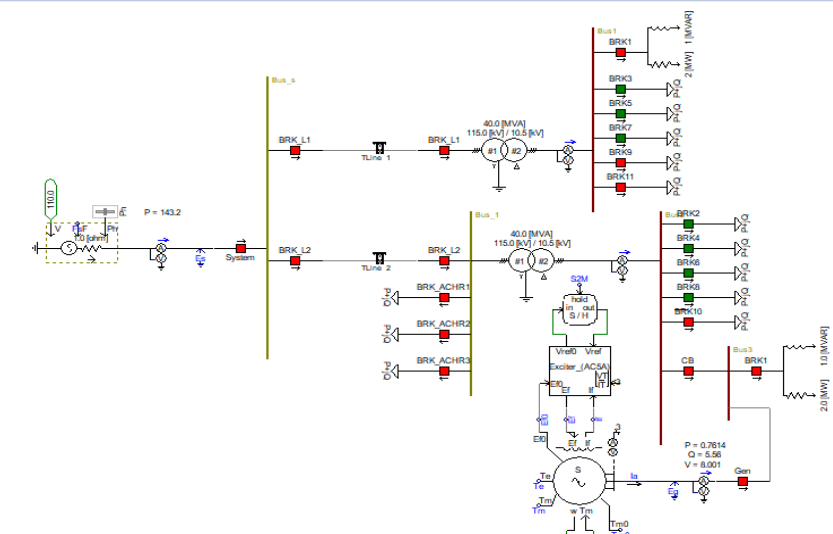


Рис. 3 – PSCAD-модель СЭС ПП с ОРГ

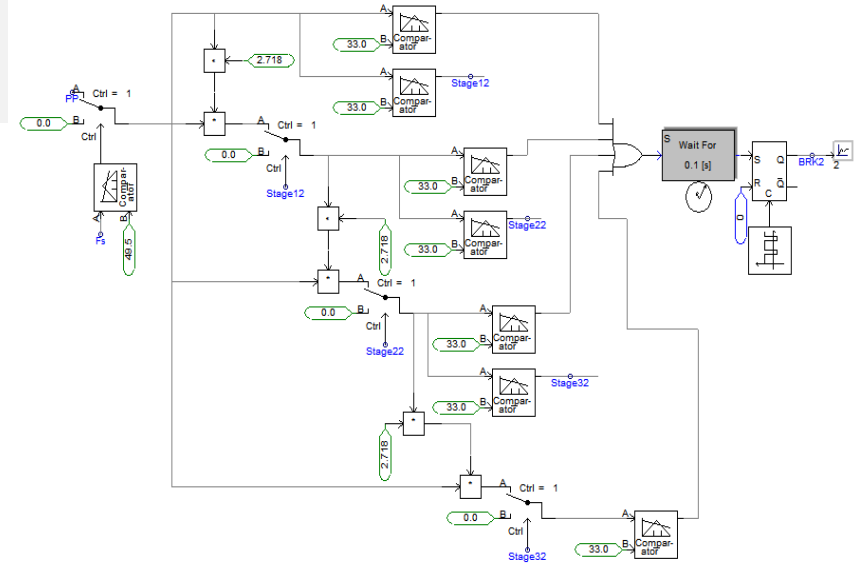
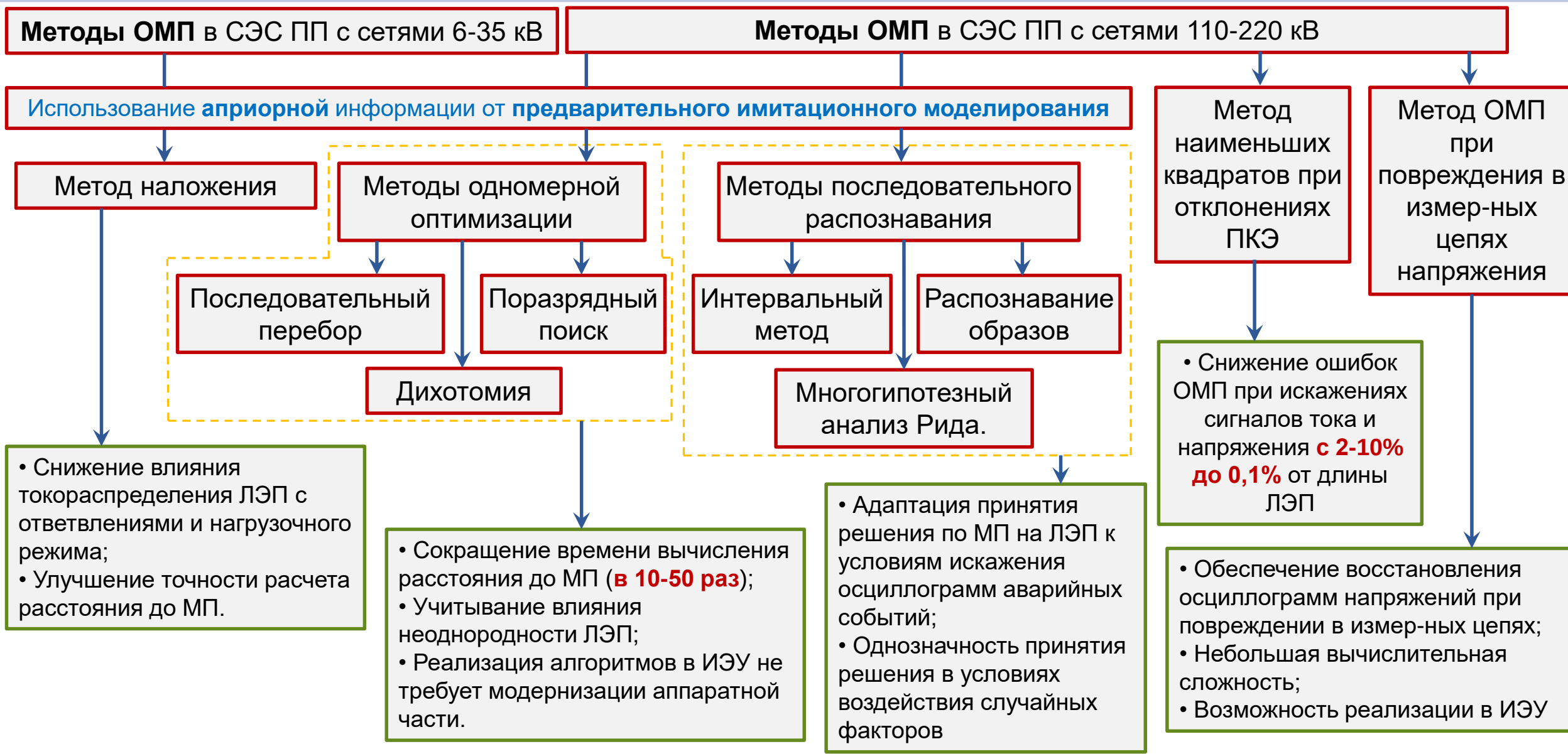


Рис. 4 – Реализация ЛЧ алгоритма АЧР для 1-й очереди



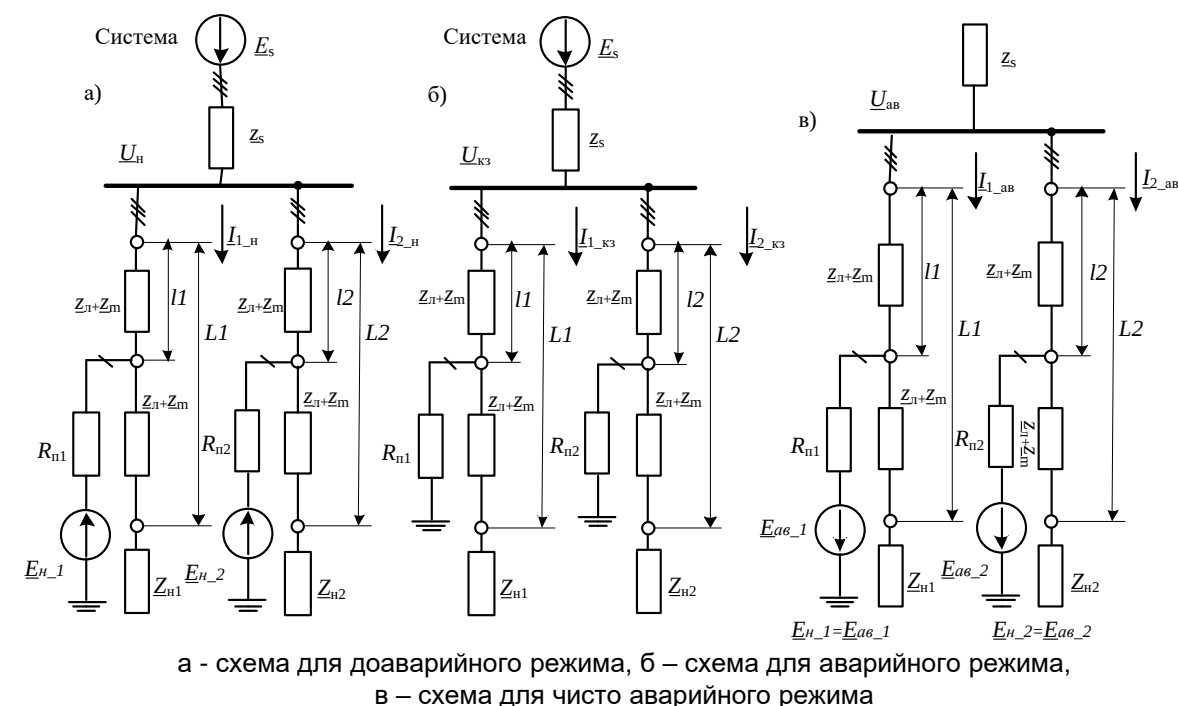


Рис. 1 - Пояснение к применению метода наложения

Расстояние до места повреждения:

$$l_x = \frac{\text{Im} \left(\frac{U_{\text{пов.1.ав}} + U_{\text{пов.1.н}}}{I_{x_{\text{пов.1.3.ав}}}} \right)}{\text{Im} \left(\left(\frac{I_{x_{\text{пов.2.3.ав}}}}{I_{x_{\text{пов.1.3.ав}}}} + \frac{I_{x_{\text{неп.3.ав}}}}{I_{x_{\text{пов.1.3.ав}}}} + \frac{I_{x_{\text{пов.2.3.н}}}}{I_{x_{\text{пов.1.3.ав}}}} + \frac{I_{x_{\text{неп.защ.н}}}}{I_{x_{\text{пов.1.3.ав}}}} \right) \cdot Z_{m-x} + \left(\frac{I_{x_{\text{пов.1.3.н}}}}{I_{x_{\text{пов.1.3.ав}}}} + 1 \right) \cdot Z_{л-x} \right)}$$

Z_{m-x} – удельное сопротивление взаимной индукций; $Z_{л-x}$ – удельное сопротивление линии;
 $I_{x-y.защ-z}$ – ток, протекающий в месте установки защиты; $I_{x-y.пов-z}$ – ток, протекающий в месте повреждения;
индекс «х» обозначает анализируемую линию; индекс «у» указывает фазу (1 – поврежденная фаза анализируемой линии, 2 – поврежденная фаза соседней линии, неп. – неповрежденная фаза); индекс «z» соответствует режиму (н – нормальный режим, кз – аварийный режим, ав – чисто аварийный режим).

Метод наложения эффективен для ЛЭП с ответвлениями: уравнивает кол-во ветвей в эл. сети до и после повреждения. Предусматривает составление схем: доаварийного, аварийного и число аварийного режимов

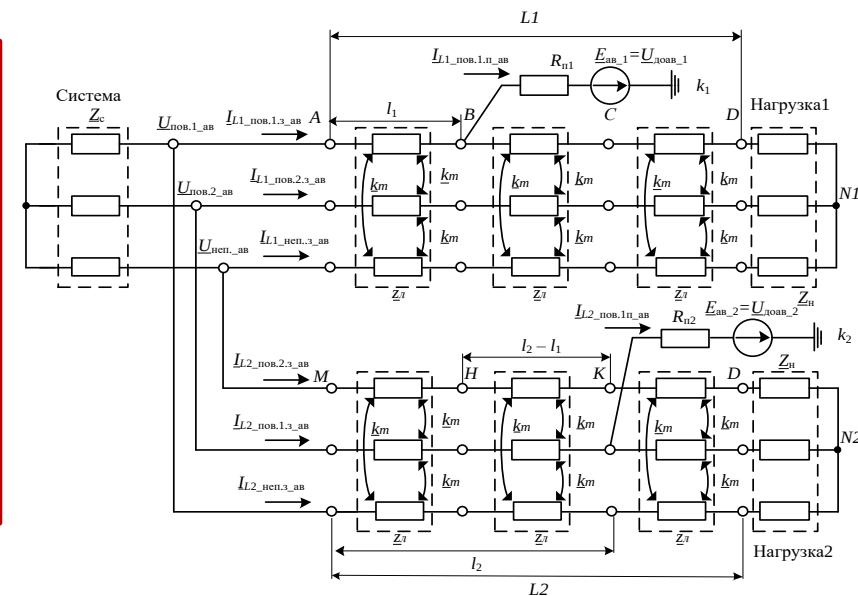


Рис. 2 - Схема замещения чисто аварийного режима в трехфазном исполнении

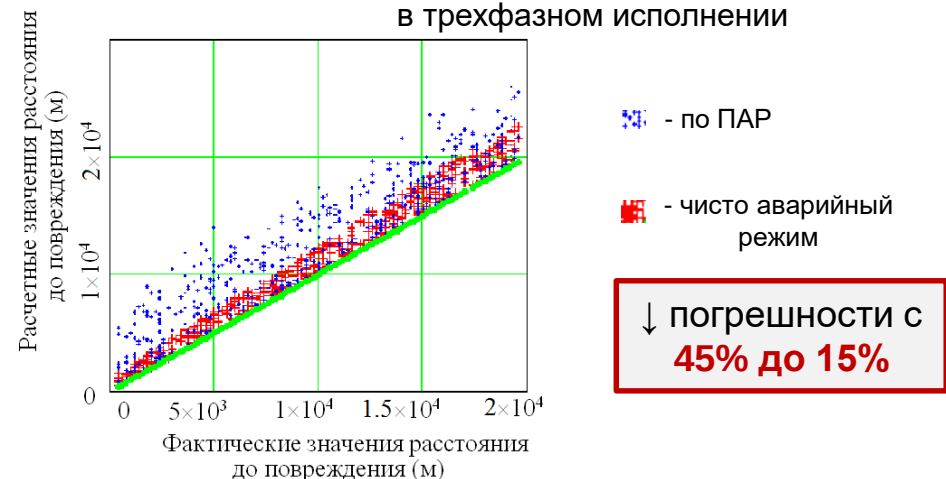


Рис. 3 – Зависимость расчетных расстояний до точек повреждения от фактических при двойных замыканиях на землю на ЛЭП

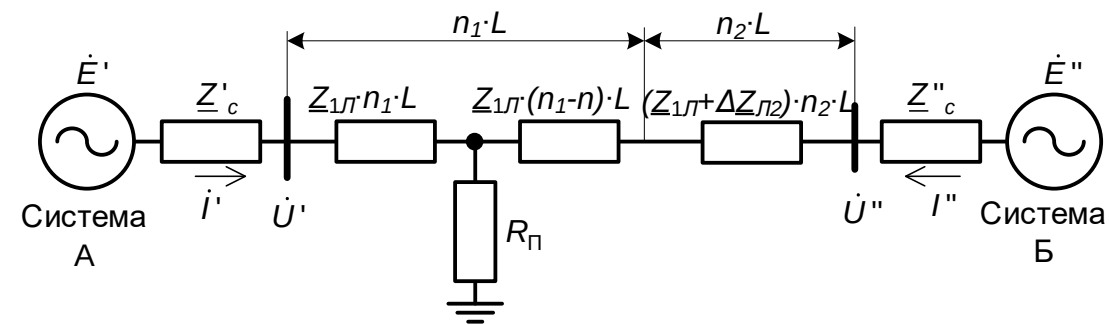


Рис. 1 - Схема замещения неоднородной одноцепной воздушной ЛЭП с двумя участками

Расчет погрешности при КЗ на N -ом участке на ВЛЭП, включающую N неоднородных участков:

$$\Delta n_N = [(Z_{1Л} - (Z_{1Л} + \Delta Z_{ЛN})) \cdot n_1 + \sum_{i=2}^{N-1} \{ (Z_{1Л} + \Delta Z_{Лi}) - (Z_{1Л} + \Delta Z_{ЛN}) \} \cdot n_i + ((Z_{1Л} + \Delta Z_{ЛN} - Z_{Л}) \cdot n)] / Z_{Л} =$$

$$= [\sum_{i=2}^{N-1} (\Delta Z_{Лi} - \Delta Z_{ЛN}) \cdot n_i - \Delta Z_{ЛN} \cdot n_1 + ((Z_{1Л} + \Delta Z_{ЛN}) - Z_{Л}) \cdot n] / Z_{Л}$$

Задача отыскания минимума функции: $f(x) \rightarrow \min; x \in [a, b]$ решается через $x_{\text{опт}}$:

$$f(x_{\text{опт}}) = \min_{[a, b]} f(x).$$

Применение критерия равенства напряжений, рассчитанных с двух сторон воздушной ЛЭП, позволяет сформировать требуемую *целевую функцию итерационного алгоритма* $f(x) = \Delta U$, обеспечивающую минимум **модуля разности напряжений ΔU в точке КЗ (U_k)**, рассчитанных с разных сторон ЛЭП:

$$\Delta U = |[\Gamma \cdot n \cdot Z_{Л} + U'] - [\Gamma'' (1 - n) \cdot Z_{Л} + U'']|.$$

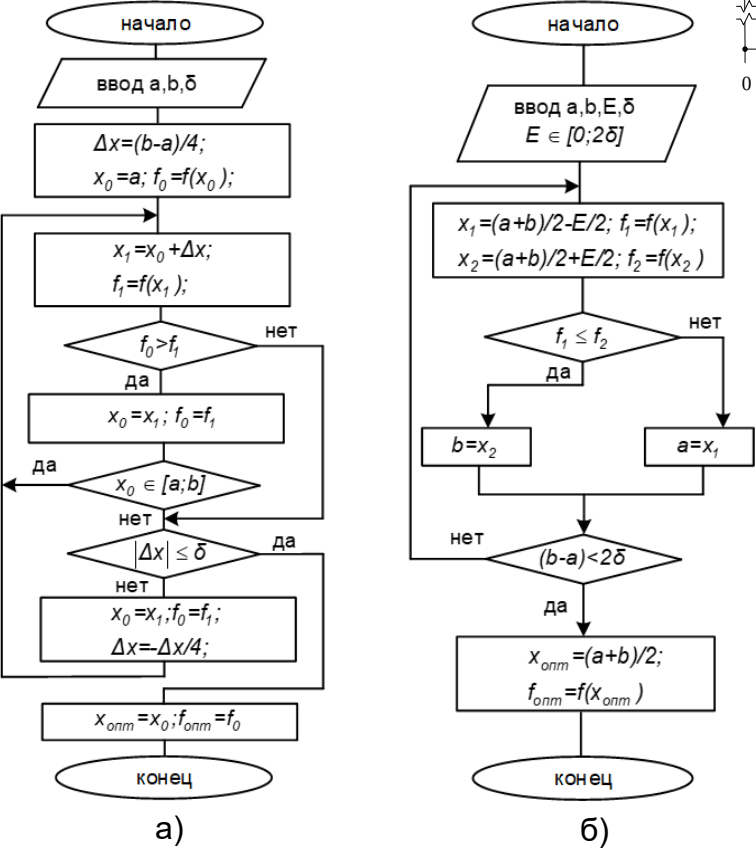


Рис. 2 – Блок-схемы алгоритмов ОМП ЛЭП на основе методов: а – поразрядного поиска; б – дихотомии.

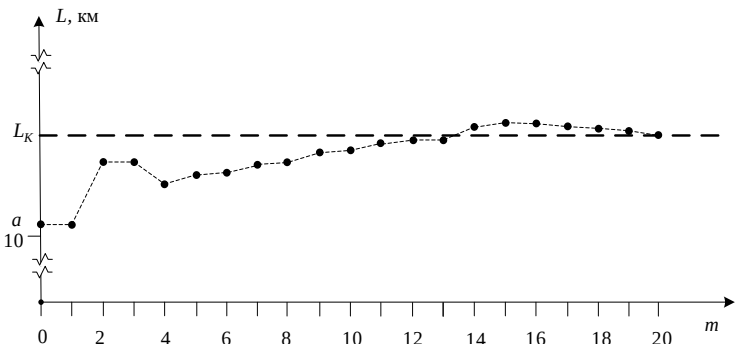


Рис. 3 – График реализации ОМП ЛЭП по ПАР на основе метода поразрядного поиска

- Выигрыш в быстродействии при реализации метода поразрядного поиска, по сравнению с методом последовательного перебора, составит $w = m2/m1 = 400/20=20$ раз.
- ↓ погрешности из-за учета неоднородности с **3,28%** до **0,25%** от длины воздушной ЛЭП
- Выигрыш в быстродействии при реализации метода дихотомии, по сравнению с методом последовательного перебора, составит $w = m2/m1 = 400/9 = 44,44$ раз.

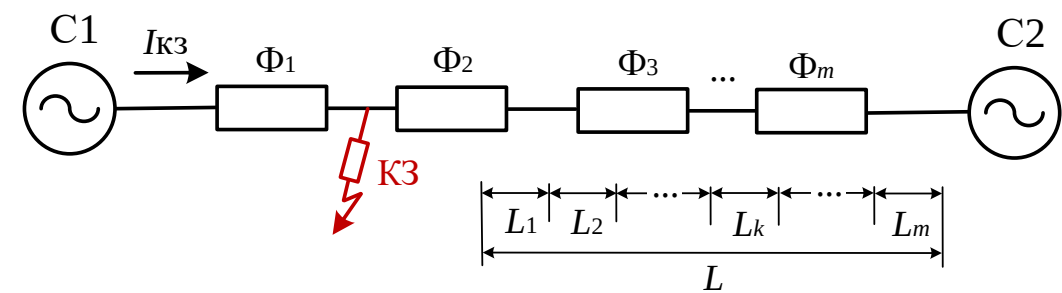


Рис. 1 – Фрагмент участка СЭС ПП с разделением ЛЭП на интервалы $\Delta L_k = L_k - L_{k-1}$

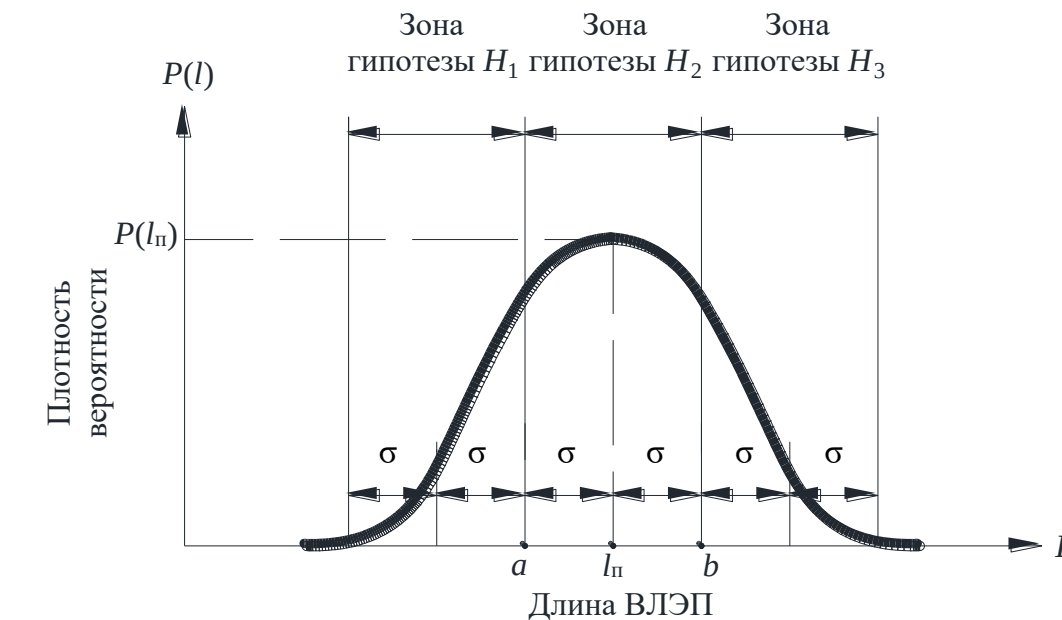


Рис. 2 – Пример распределения места повреждения вдоль ЛЭП с учетом влияния различных случайных факторов

При выборе поврежденного участка в пределах зоны обхода воздушной ЛЭП проводится k экспериментов с выборочными данными на каждом шаге процедуры. По результатам каждого из экспериментов принимается одно из $(M+1)$ решений:

- закончить эксперимент принятием гипотезы H_1 (поврежден участок номер 1);
- закончить эксперимент принятием гипотезы H_2 (поврежден участок номер 2);
-
- закончить эксперимент принятием гипотезы H_M (поврежден участок номер M);
- продолжить эксперимент поведением дополнительных наблюдений.

Гипотезы относительно места повреждения воздушной ЛЭП:
 H_1 – при расчетном месте повреждения $ln < a$; H_2 – при расчетном месте повреждения $a < ln < b$; H_3 – при расчетном месте повреждения $ln > b$. Пусть Δ - некоторая положительная величина, тогда весовые функции, характеризующие зоны предпочтения и безразличия, определяются следующим образом:

$$w_1(l_n) = \begin{cases} 0, & \text{при } l_n < a + \Delta, \\ 1, & \text{при } l_n \geq a + \Delta, \end{cases} \quad w_2(l_n) = \begin{cases} 0, & \text{при } a - \Delta < l_n < b + \Delta, \\ 1, & \text{при других } l_n, \end{cases} \quad w_3(l_n) = \begin{cases} 0, & \text{при } l_n > b - \Delta, \\ 1, & \text{при других } l_n, \end{cases}$$

весовые функции $w_1(x), \dots, w_M(x)$, определяющие риск $R(x)$, имеют простую форму и могут принимать лишь два значения 0 или 1. Поэтому выражение для риска:

$$R(\underline{X}) = \sum_{m=1}^M P_m(\underline{X}),$$

где суммирование производится только по значениям m , при которых $w_m(x)=1$.

Неправильное решение принимается только тогда, когда принимается гипотеза H_M , для которой $w_i(x)=1$ при $i \neq m$, а риск $R(x)$ при этом будет равен вероятности неправильного решения.

Пусть $x_1, x_2 \dots$ есть последовательность переменных, а $p_m(x_1, x_2 \dots | H_i) = p_m(\mathbf{x}|H_i)$ – совместная плотность вероятности $x_1, x_2 \dots$ при условии, что верна гипотеза H_i . Алгоритм принятия решения Рида основывается на формировании на каждом шаге m обобщенного отношения правдоподобия:

$$\lambda_m(\mathbf{x}|H_i) = \frac{p_m(\mathbf{x}|H_i)}{\sqrt[M]{\prod_{k=1}^M p_m(\mathbf{x}|H_k)}}, \quad i = 1, \dots, M.$$

Последовательное исключение гипотез по условию:

$$\lambda_m(\mathbf{x}|H_i) < \lambda^{\text{пор}}_m(\mathbf{x}|H_i).$$

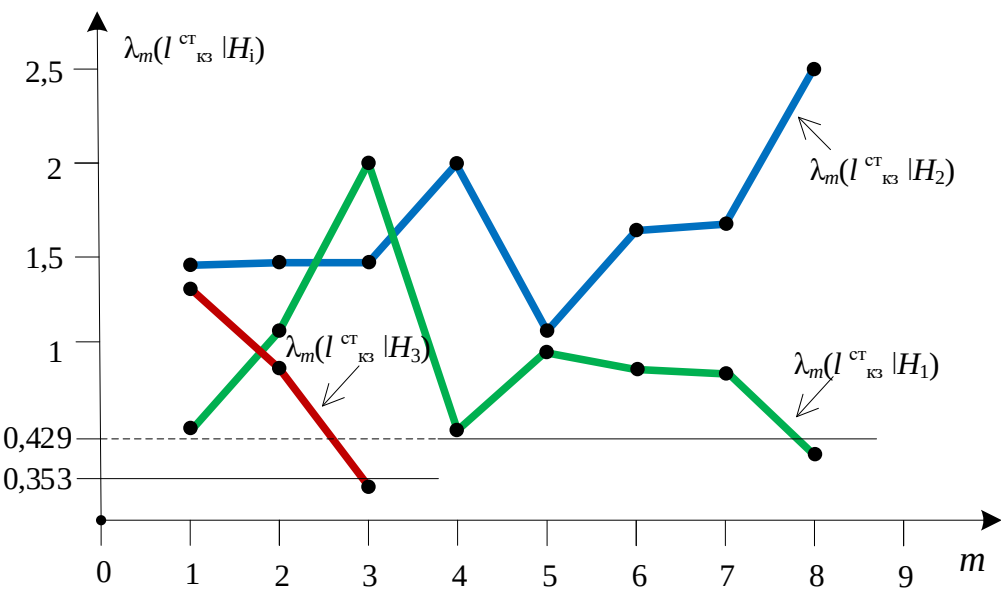


Рис. 2 – Пояснения к процессу принятия решения при последовательном анализе Рида

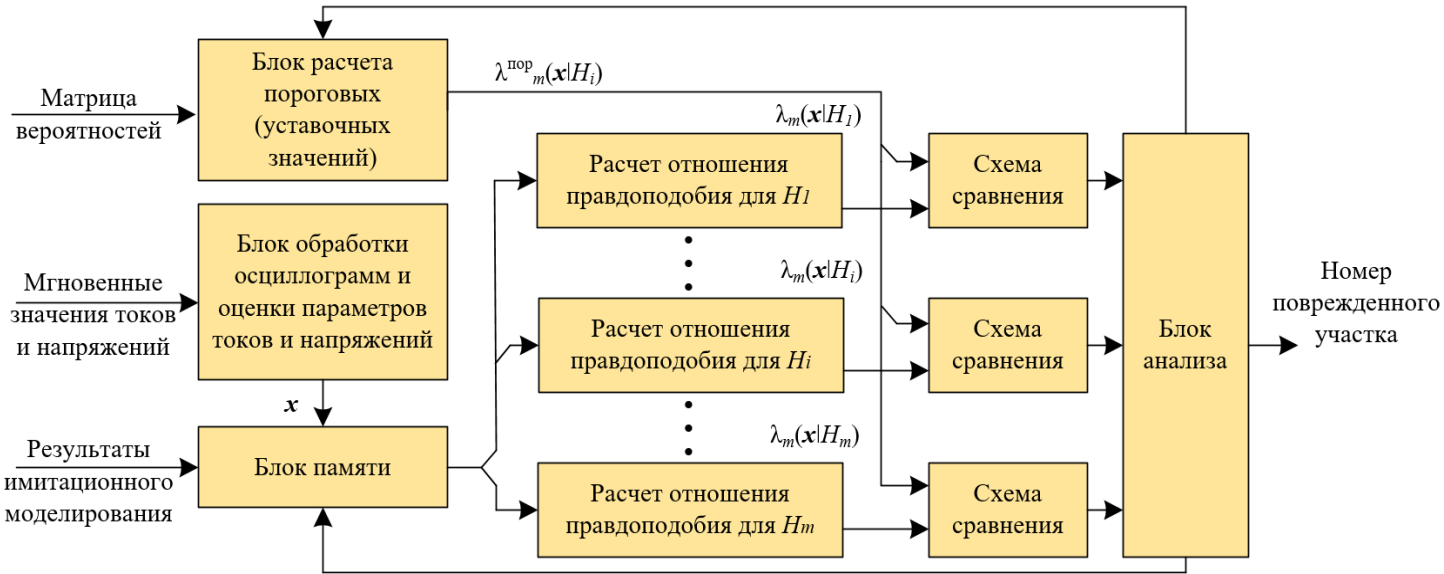


Рис. 1 – Структурная схема устройства, реализующего процедуру последовательного анализа при ОМП на ЛЭП

Пороговые значения:

$$\lambda^{\text{пор}}_m(l_{\text{кз}} | H_1) = \lambda^{\text{пор}}_m(l_{\text{кз}} | H_2) = \lambda^{\text{пор}}_m(l_{\text{кз}} | H_3) = 0,353;$$

После исключения гипотезы H_3 :

$$\lambda^{\text{пор}}_m(l^{\text{ст}}_{\text{кз}} | H_1) = \lambda^{\text{пор}}_m(l^{\text{ст}}_{\text{кз}} | H_2) = 0,3/0,7 = 0,429.$$

Результат:

1. Выбор поврежденного участка в интервале $M[l_{\text{кз}}] + \sigma/2 = 25,185 + 0,835 \text{ (км)}$;
2. Адаптация процесса принятия решения о поврежденном участке ЛЭП к особенностям искажения осциллограмм аварийных событий и условиям оценки их параметров.

Раздел 6

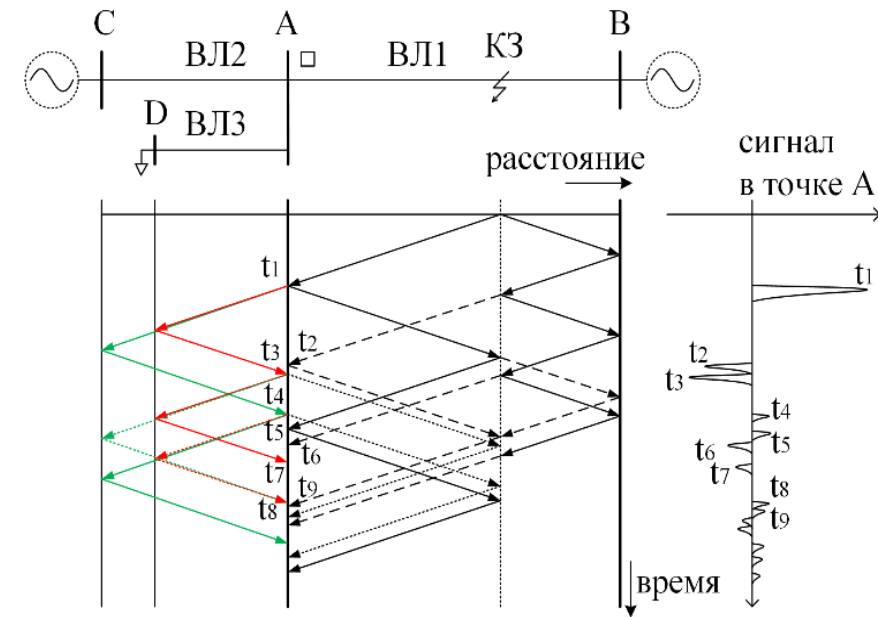


Рис. 1 - Лестничная диаграмма распространения волн по участку сети и характер сигнала в точке замера

Расстояние до МП:

$$L_{МП} = \frac{(t_5 - t_1) \cdot v}{2}$$

$L_{МП}$ – расстояние до места повреждения;
 v – групповая скорость распространения волн по линии.

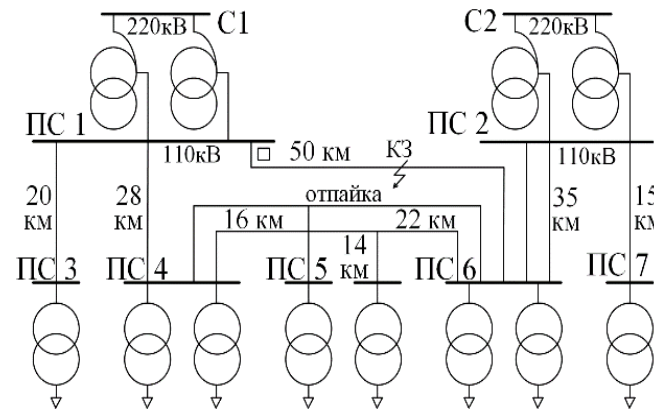


Рис. 2 - Анализируемый участок СЭС ПП 110/10 кВ

Кросскорреляционная функция для двух дискретных сигналов:

$$R_{S_1 S_2}(n) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=1}^N ([-S_2(k)] \cdot [S_1(k+n)])$$

где: N – длительность записи первого импульса сигнала S_2 ; n – текущий отчет.

Отраженная волна: Падающая волна:

$$S_1(t) = u(t) - z_C \cdot i(t) \quad S_2(t) = u(t) + z_C \cdot i(t)$$

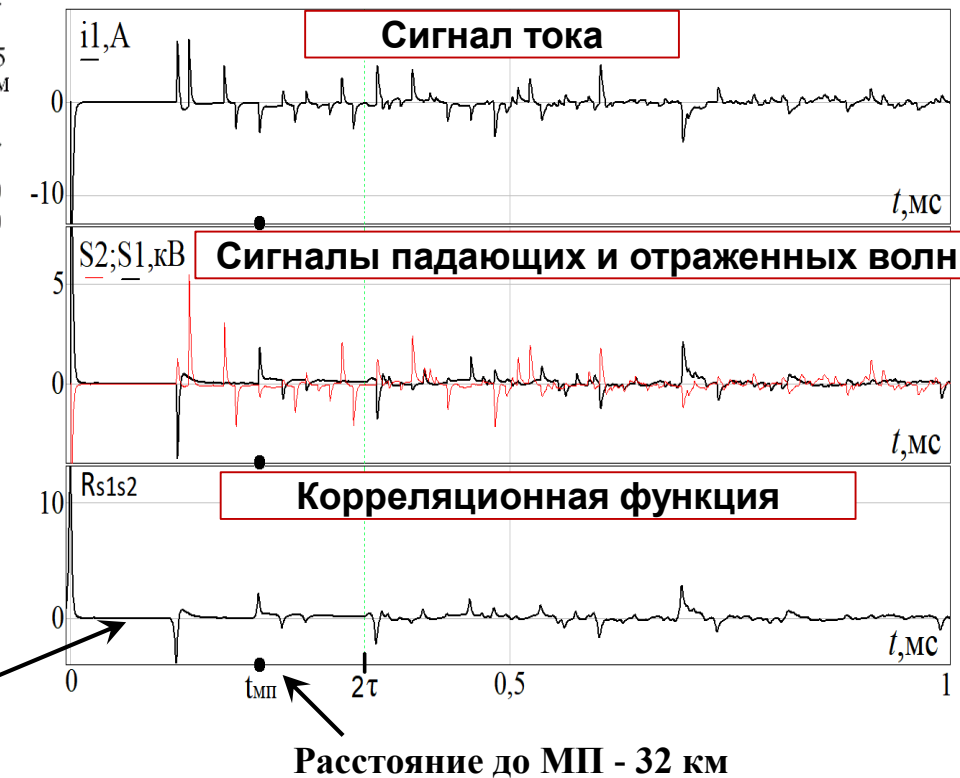


Рис. 3 – Графики отражающие время прихода нужной волны

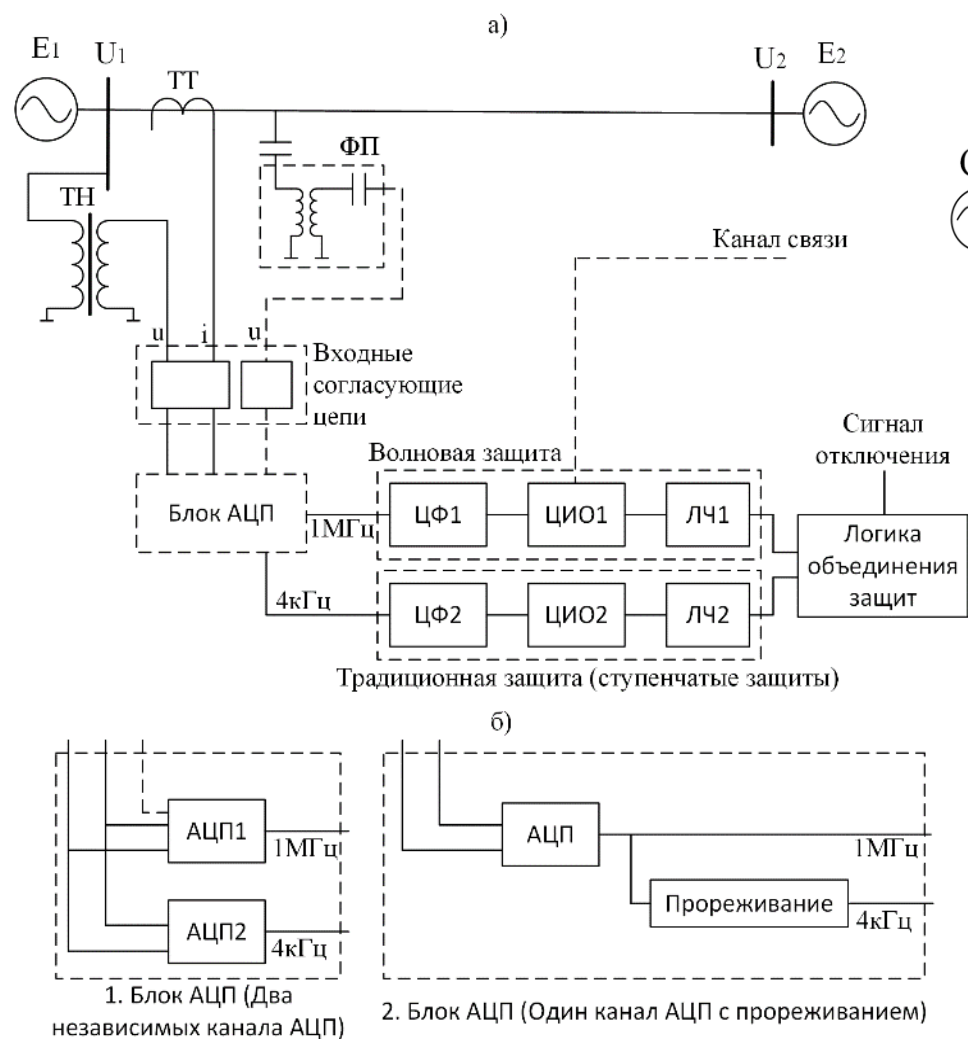


Рис. 1 – Структурная схема комбинированной защиты (а), а также способы исполнения аналого-цифрового преобразования (б)

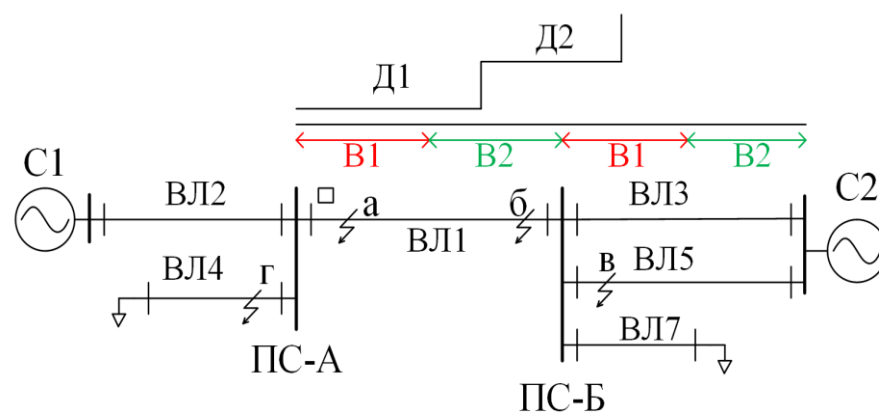


Рис. 3 – Зоны комбинированной защиты на примере ДЗ

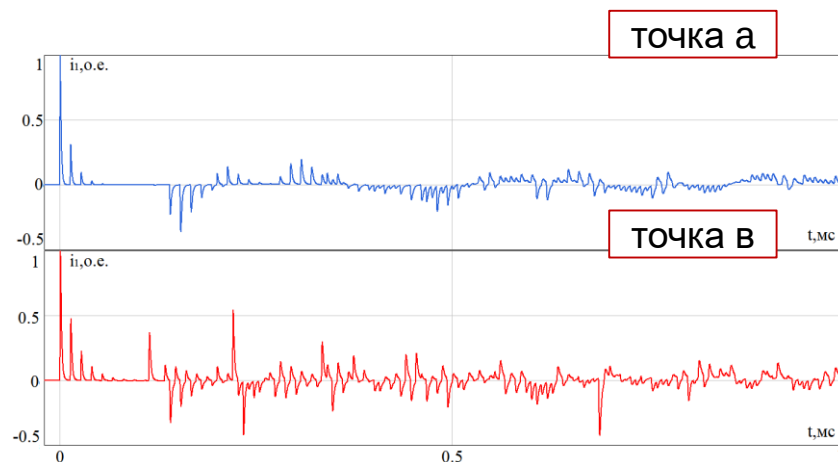


Рис. 4 – Сигналы при повреждениях в точках а и в

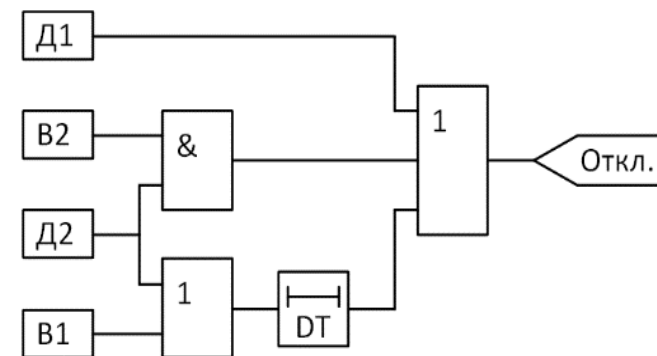


Рис. 2 – Упрощенная логическая схема разработанного алгоритма защиты

Логика алгоритма:

- При КЗ в зоне защиты первой ступени ДЗ (Д1) защита срабатывает без выдержки времени;
- При попадании КЗ в зону защиты второй ступени ДЗ (Д2) и во вторую зону волнового органа (В2) защита срабатывает также без выдержки времени, причем скорость срабатывания может быть быстрее, чем первой ступени ДЗ;
- При КЗ на смежной линии срабатывает вторая ступень ДЗ (Д2) и волновой орган определяет расстояние до места повреждения, входящее в зону (В1) (при очень близком КЗ В1 не срабатывает, но также не срабатывает В2), при этом защита действует с выдержкой по времени, ускорения второй ступени ДЗ не происходит.

Результат:

Комбинирование защит позволяет увеличить основную зону защит, уменьшить зависимость от режима сети, ликвидировать мертвую зону, повысить быстродействие и точность ИО.

Создана новая отечественная **аппаратно-программная платформа** для реализации устройств релейной защиты и автоматики и интеллектуальных электронных устройств (ИЭУ)

Главный экран управления комплектом ИРЗ



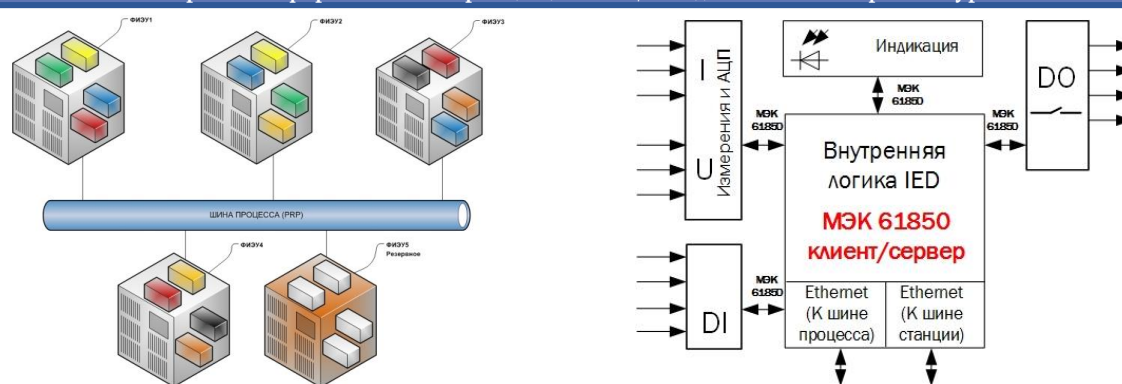
Экспериментальный образец резервной защиты ИРЗ



Испытательный стенд функциональной проверки ИРЗ



Кроссплатформенная киберзащищённая ЦПС с динамической архитектурой



Разработанные компоненты ПАК ЦПС

Плата дискретных вх/выходов



Вычислительный модуль



Плата резервирования



ПК на базе промышленного компьютера QOTOM



ПК на базе платформы «Эльбрус»



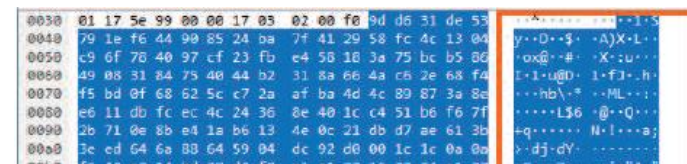
Устройства ЦПС нижнего и среднего уровня с МЭК 61850



Двухфакторная аутентификация с использованием USB-идентификатора



TLS-шифрование MMS-пакетов



Доверенные вычислители и ОС



- микропроцессор Эльбрус



- микропроцессор Байкал



- операционная система на базе Linux

Разработано программное обеспечение предназначенное для управления и обеспечения работы терминала РЗА с применением протокола МЭК 61850, реализации основных функций и разработки алгоритмов защит с использованием блоков функциональных диаграмм (FBD) - **КОДОГЕНЕРАТОР**

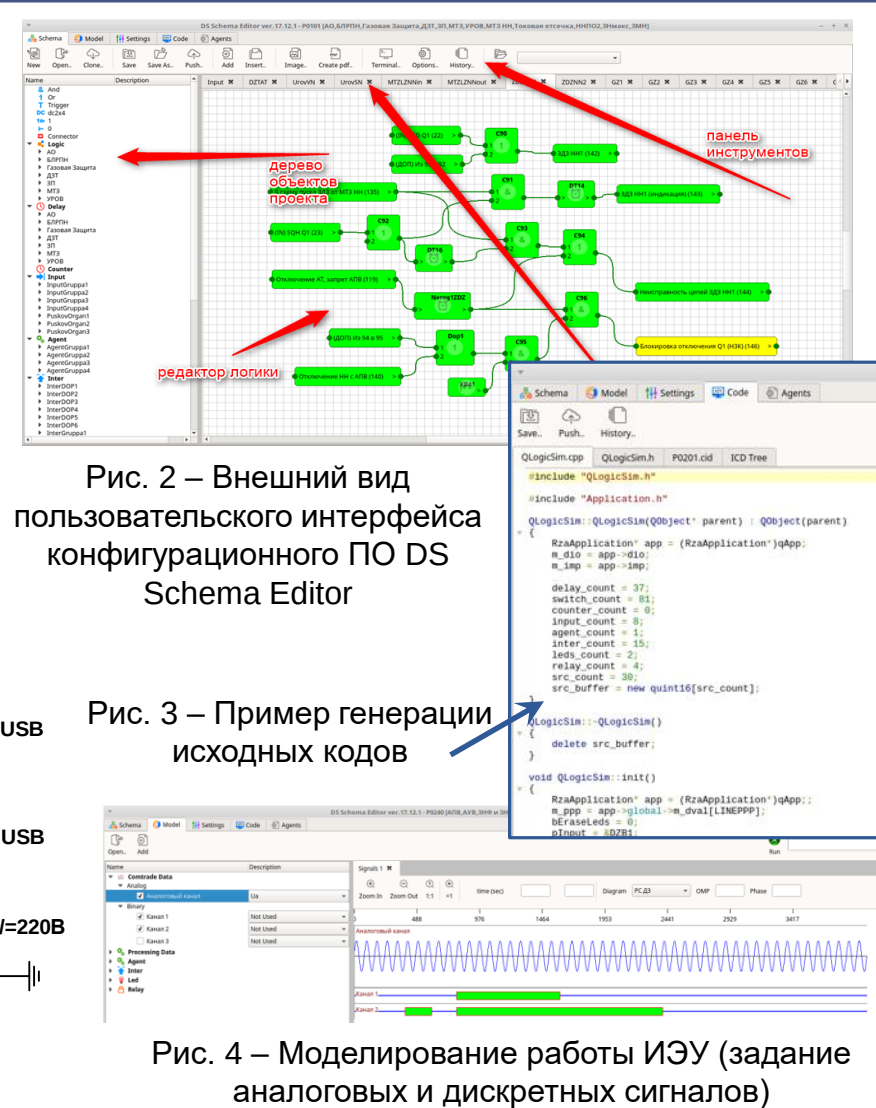
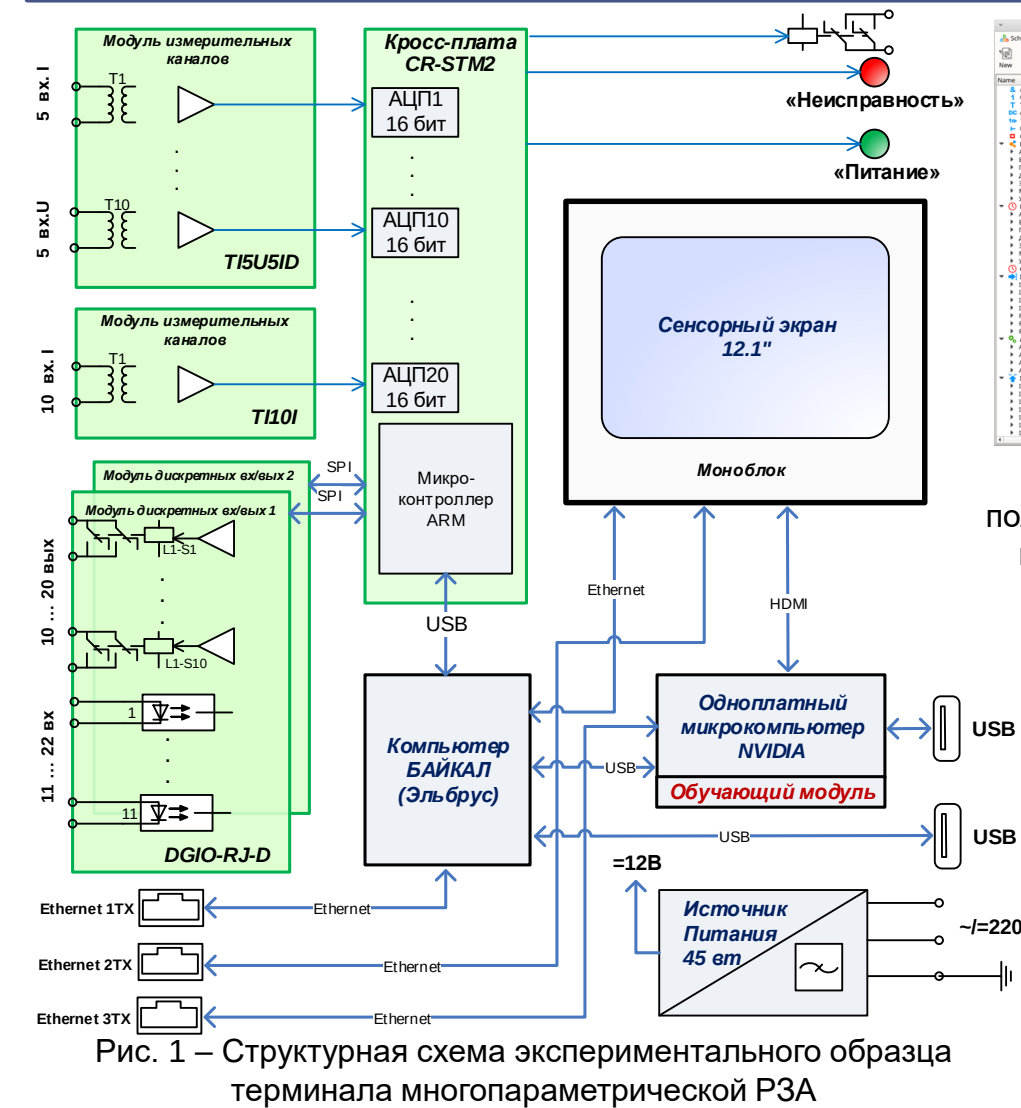


Рис. 4 – Моделирование работы ИЭУ (задание аналоговых и дискретных сигналов)

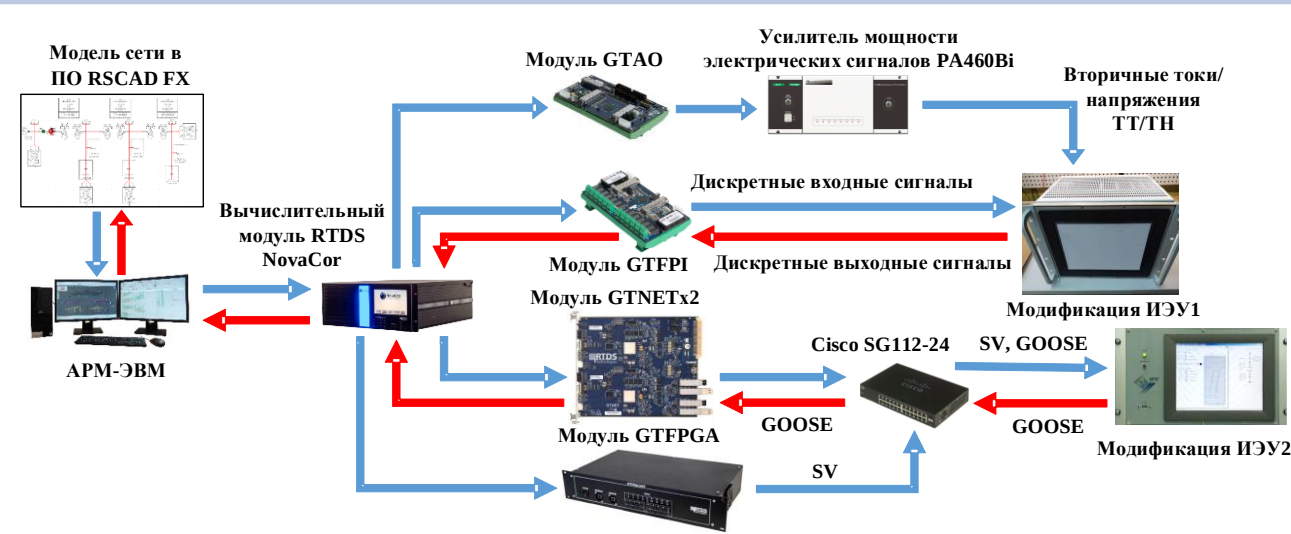


Рис. 1 – Структурная схема испытательной киберфизической установки

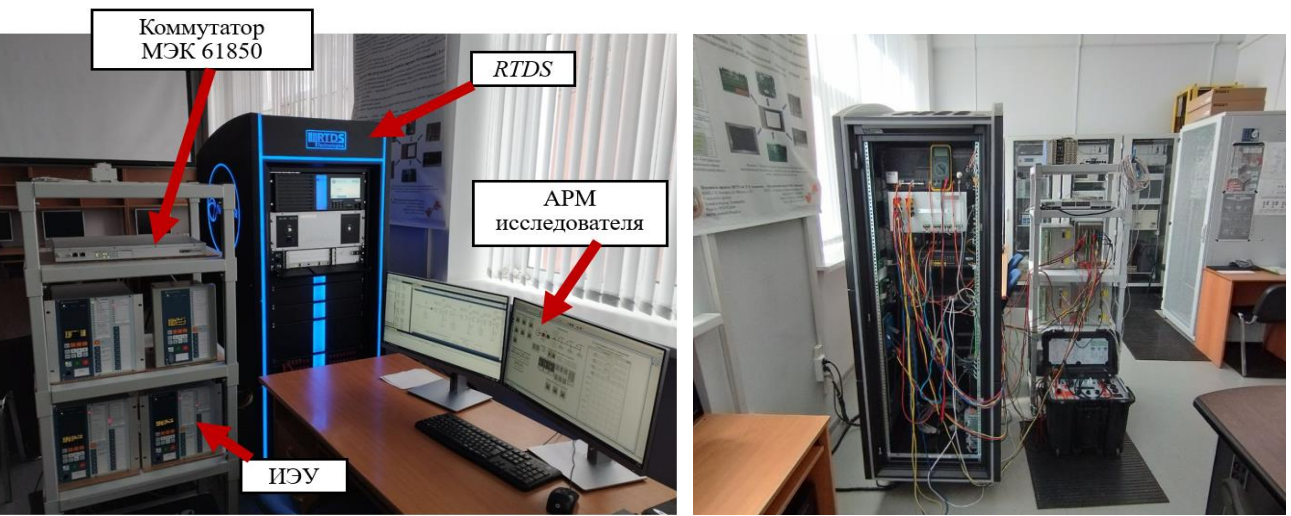


Рис. 2 – Внешний вид испытательного киберфизического стенда (спереди, сзади)

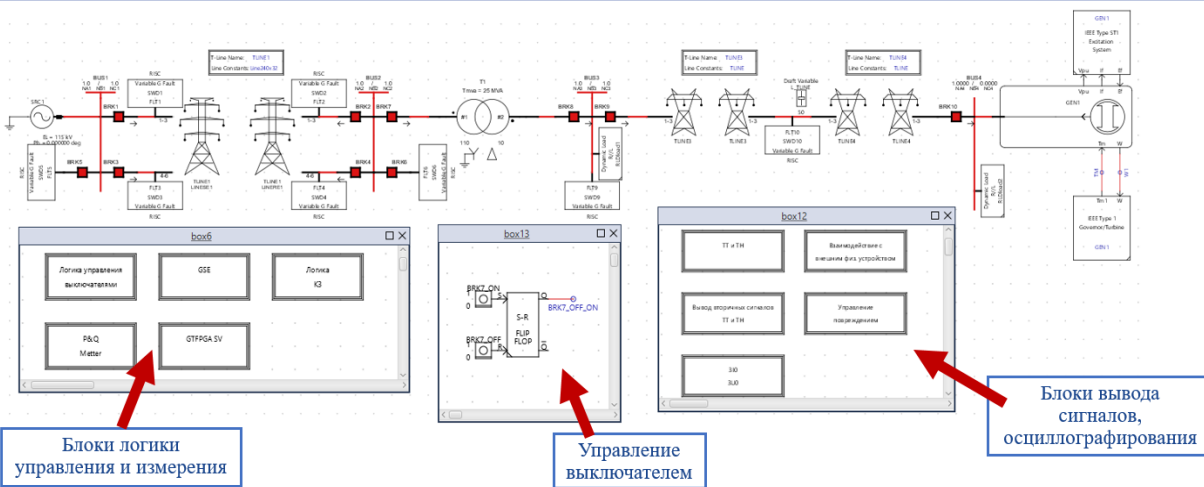


Рис. 3 – Внешний вид имитационной Draft-модели в ПО RSCAD FX

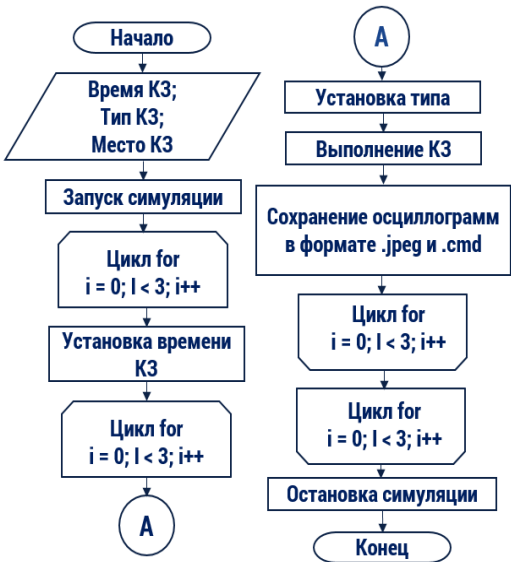


Рис. 4 - Упрощенная блок схема файла-сценария автоматизации полунатурного моделирования

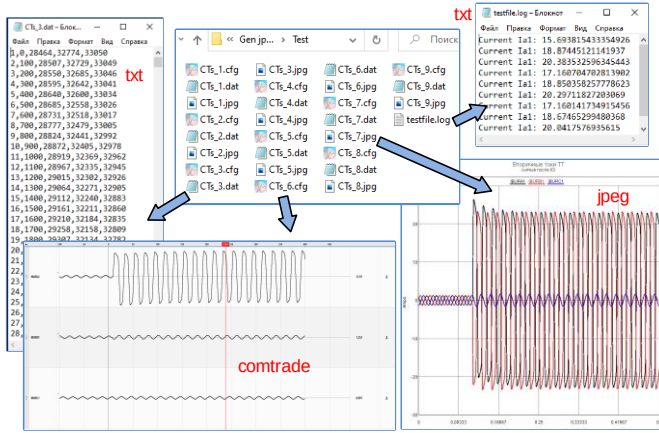


Рис. 5 - Сохранение результатов моделирования в базу данных в различных форматах

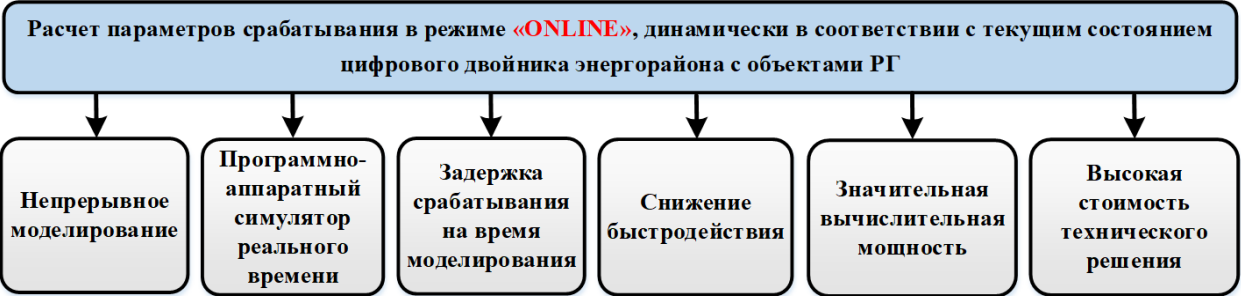


Рис.1 - Способ адаптации ИЭУ защиты в режиме «ONLINE»

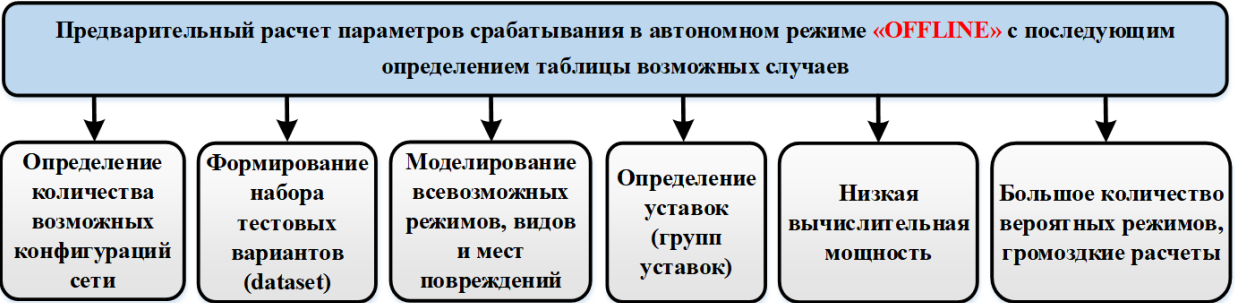


Рис.2 - Способ адаптации ИЭУ защиты в режиме «OFFLINE»

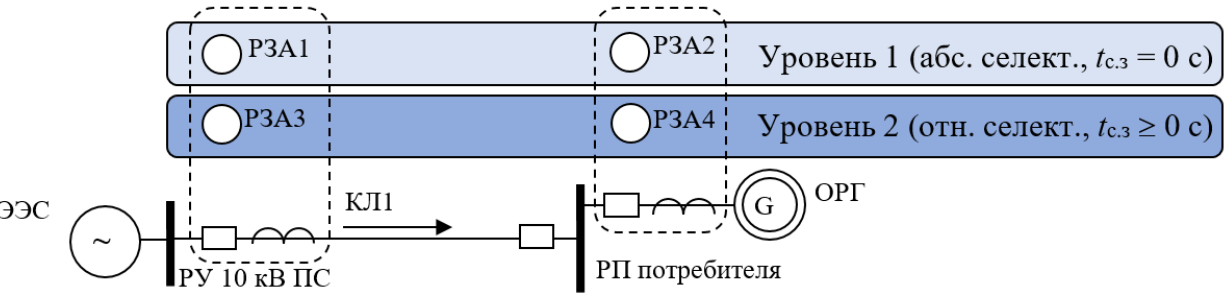


Рис.3 - Два независимых уровня защиты распределительной электросети [61,62]

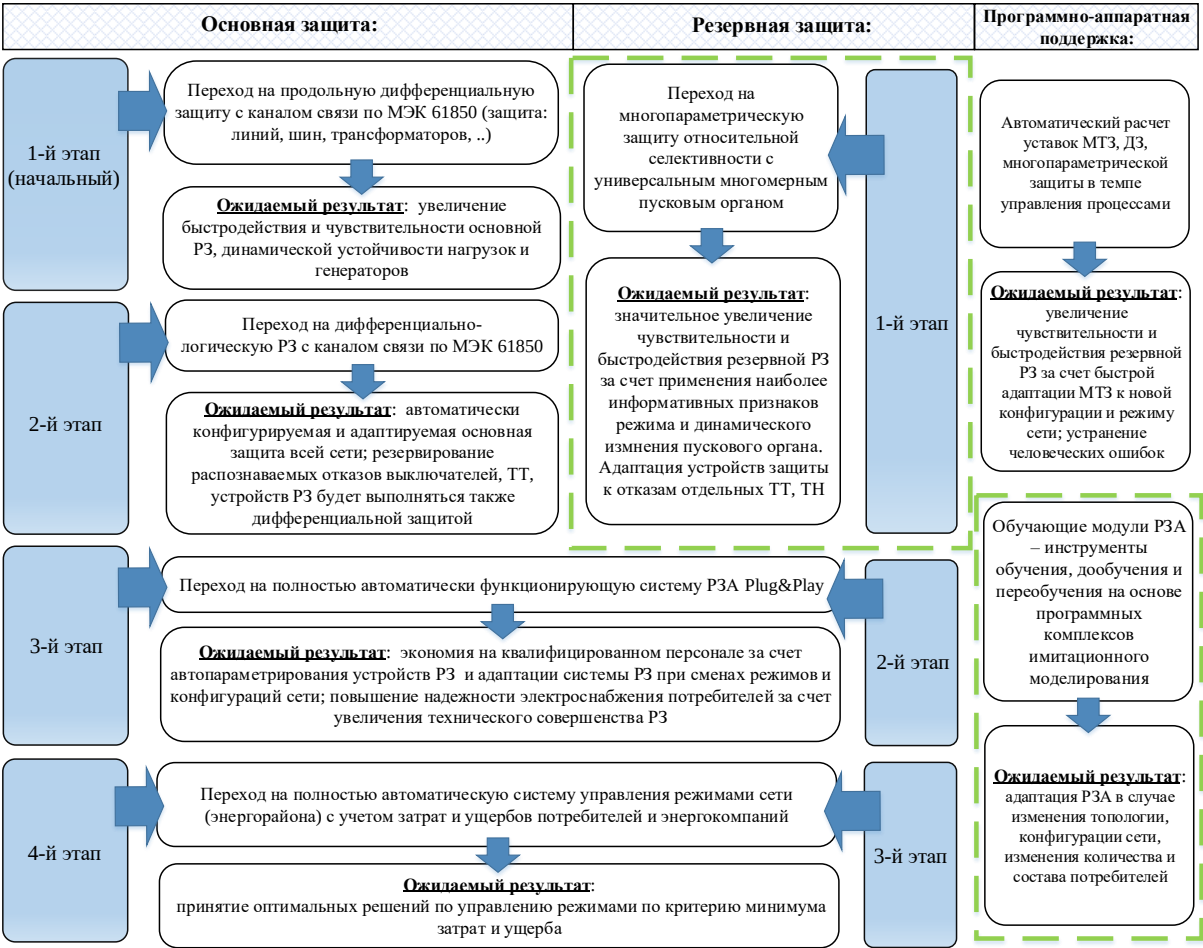
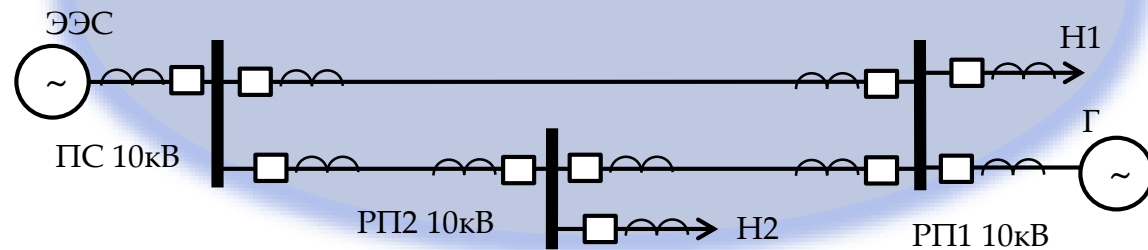


Рис.4 - Предполагаемое развитие РЗА в СЭС ПП с ОРГ [61,62]

Устройство автоматического расчета уставок и согласования защит (АРЗ).
Виртуальный «цифровой» релейщик

Информационная сеть по МЭК 61850



1. Происходят изменения в электрической сети

2. Изменения передаются в устройство АРЗ и оно пересчитывает уставки защит сети

3. Устройство АРЗ передает новые уставки защит в устройства защиты

- Все процессы АРЗ происходят без участия человека.
- Возможен расчет традиционных защит (МТЗ, ДЗ) и перспективных высокочувствительных многопараметрических РЗ.
- Технология применима к любым ступенчатым релейным защитам относительной селективности сетей любой топологии, с любым количеством источников питания.
- АРЗ совместима со старыми типами РЗ и не требует полной модернизации распредсети

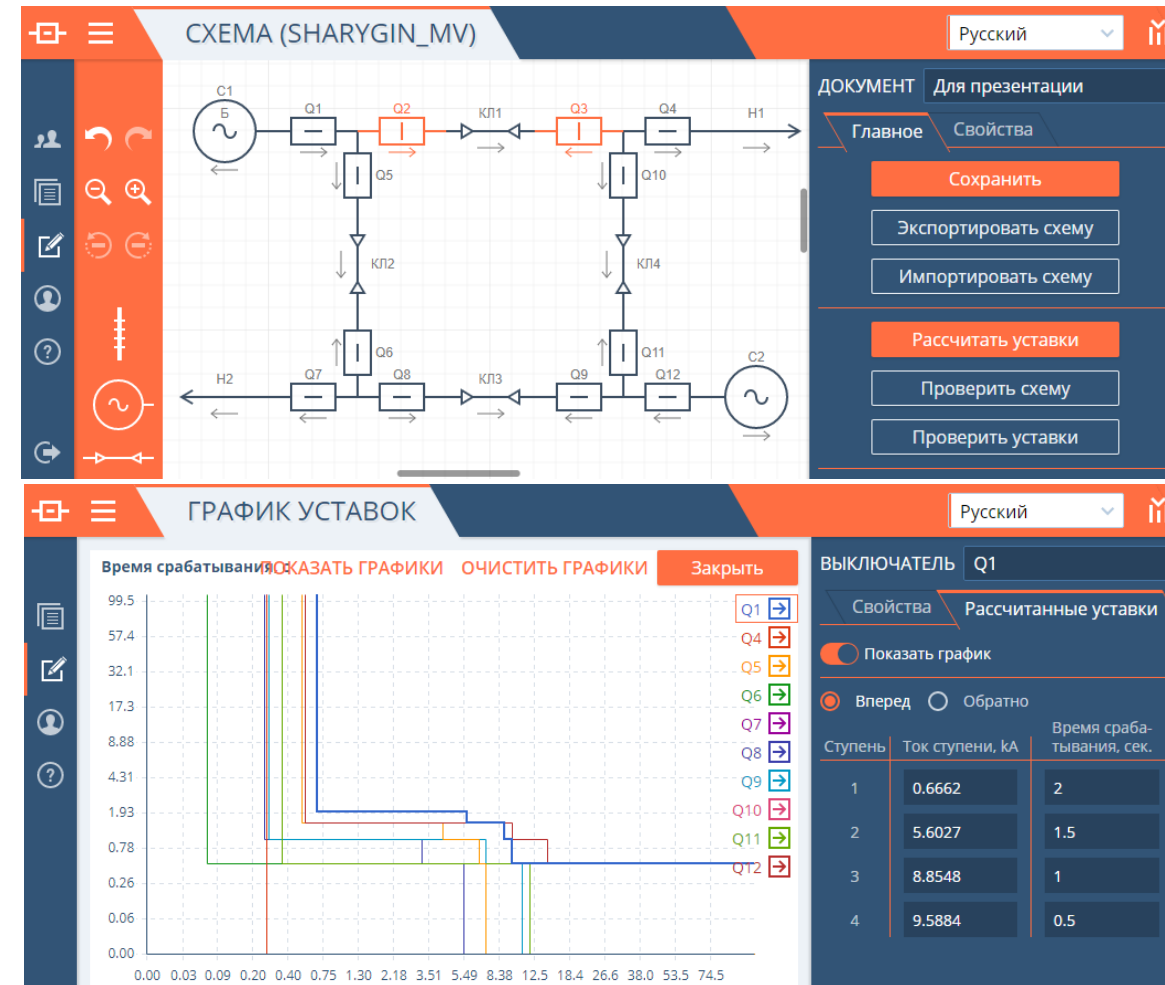


Рис. 1 – Интерфейс облачного сервиса (программы) АРЗ

Алгоритм расчета уставок РЗ основан на новом методе распознавания режимов электросети (статистический байесовский подход), который максимально полно использует информацию многомерных измерений.

1. Анализ отечественного и зарубежного опыта внедрения ОРГ в СЭС ПП показал сложность переходных процессов, увеличение скорости изменения частоты, проблемы с устойчивостью работы генераторов, искажения ПКЭ, отражающиеся на **эффективности работы РЗА при распознавании режимов работы**. Показана перспективность использования **имитационного моделирования и многопараметричности** при организации ЛЧ РЗА, а также статистических методов, машинного обучения и искусственного интеллекта.
2. Предложенные **статистические методы и методы объединения бинарных сигналов от ПО** позволяют повысить чувствительность многопараметрической РЗА и распознаваемость аварийных режимов на **5–70 %** в зависимости от конфигурации сети и требований к организации защиты электротехнического объекта.
3. Исследованы методы реализации многопараметрической РЗА с **объединением информационных признаков ИНС и методом дерева решений**, повышающие распознаваемость аварийных режимов в СЭС ПП (**более чем на 14 %**), в том числе на ранних этапах развития повреждений трансформаторов (с процентом замкнутой части обмоток **менее 0,1%, (1–3 витка)**).
4. **Применение метода решающих деревьев и его модификаций для организации РЗА на ЛЭП с ответвлениями в СЭС ПП** позволило сформировать алгоритм многопараметрической защиты, отличающийся повышенной чувствительностью при КЗ на ответвлении за трансформатором, что **более чем на 24% эффективнее «Дистанционного ИО»**.
5. Разработаны и опробованы на примере фрагмента СЭС ПП **методы «сжатия данных»** для перехода к обобщенному признаку в логическую часть многопараметрической релейной защиты, **повышающие распознаваемость режимов и упрощающие реализацию по принципу сравнения с обобщенной уставкой**. Результаты на объектной характеристике, полученные по МГК и ЛДФ, показывают лучшие результаты распознавания аварий, чем одномерные признаки (**до 5–6 раз**).
6. Обоснована эффективность применения **последовательного анализа Вальда** при распознавании режимов работы энергорайона на примере принятия решения устройством АЧР в условиях больших ошибок измерения частоты и отклонений ПКЭ от нормативных значений. Разработанные алгоритмы обладают **высокой степенью адаптации, быстродействия и вероятностью правильного принятия решения за 4–6 шагов** дискретизации.
7. Разработаны **новые методы ОМП для СЭС ПП**, включающие сети 6-220 кВ. Разработан и апробирован на математических моделях **метод наложения** для формирования алгоритмов ОМП ЛЭП при однофазных и двойных замыканиях на землю в сетях 6-35 кВ. На примере двухстороннего ОМП ЛЭП показано, что **применение алгоритмов поиска позволяет существенно (в 10–50 раз) сократить** число шагов вычислительной итерационной процедуры и соответственно **время вычисления расстояния до повреждения**. Разработанные методы ОМП обеспечивают **высокую точность** в условиях **отклонения ПКЭ** от нормативных значений.
8. Разработаны технические решения по **комбинированию традиционных и волновых защит** в логической части ИЭУ для СЭС ПП, **расширяющие зону защиты, улучшающие распознаваемость повреждений, повышающие быстродействие и надежность ИЭУ защиты**.
9. Создана новая отечественная аппаратно-программная платформа для реализации разработанных методов в ИЭУ, обладающая **универсальностью** аппаратного обеспечения и требующая только **модернизации ПО** под конкретный электротехнический комплекс и используемый алгоритм функционирования в составе СЭС ПП.

По теме исследования опубликовано более **125** работ, среди которых:

- **26** статей в журналах ВАК: «Электричество», «Электрические станции», «Электротехника», «Известия Российской академии наук. Энергетика», «Электроэнергия. Передача и распределение», «Энергетик», «Релейная защита и автоматизация», «Интеллектуальная электротехника», «Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева», «Электроника и электрооборудование транспорта»;
- **26** статей в научных изданиях, индексируемых в Scopus и Wos;
- **28** патентов на изобретение;
- **4** свидетельства на программу для ЭВМ;
- **2** монографии;
- **2** учебных пособия.

Разработка интеллектуальных электронных устройств, методов и алгоритмов распознавания повреждений и автоматики велась в соответствии с заданием следующих **проектов**:

- Государственных контрактов: № 14.577.21.0124 от 20.10.2014 - № 14.577.21.0244 от 26.09.2017г. ;
- Проекта участников НОЦ Нижегородской области. Договор №16-11-2021/50 от 16.11.2021г.;
- Программы «ПРИОРИТЕТ-2030»;
- Гранта Президента РФ 2019-2020гг.;
- Грантов Правительства Нижегородской области: Соглашение № 316-06-16-48а/21 от 10.11.2021г., Соглашение № 316-06-16-5а/22 от 20.05.2022г.;
- Государственного задания в сфере научной деятельности (темы: №FSWE-2022-0005, №FSWE-2025-0001).

Спасибо за внимание!