



## Микропроцессорные средства управления в электроэнергетике



*Направление подготовки  
140400.62 «Электроэнергетика и электротехника»*

*Квалификация выпускника: бакалавр*



Презентации разработаны в рамках реализации гранта «Подготовка высококвалифицированных кадров в сфере электроэнергетики и горно-металлургической отрасли для предприятий Амурской области»



## Микропроцессорные средства управления в электроэнергетике



Тема лекции:

### *Архитектура РЗ. Микропроцессорные РЗ*

Канд. техн. наук КОЗЛОВ А.Н.



Презентации разработаны в рамках реализации гранта «Подготовка высококвалифицированных кадров в сфере электроэнергетики и горно-металлургической отрасли для предприятий Амурской области»



## Микропроцессорные средства управления в электроэнергетике



Презентации по курсу лекций обсуждены на заседании кафедры энергетики

«15» 11 2013 г., протокол № 4

Заведующий кафедрой Н.В. Савина

Презентации по курсу лекций одобрены на заседании учебно-методического совета направления подготовки 140400.62 – «Электроэнергетика и электротехника»

«16» 12 2013 г., протокол № 5

Председатель Ю.В. Мясоедов

Рецензент: А.А. Андро, директор по информационно-технологическому сопровождению филиала ОАО «Федеральная сетевая компания Единой энергетической системы» (ОАО «ФСК ЕЭС») – Магистральные электрические сети Востока (МЭС Востока)



Презентации разработаны в рамках реализации гранта «Подготовка высококвалифицированных кадров в сфере электроэнергетики и горно-металлургической отрасли для предприятий Амурской области»

# Основные понятия об архитектуре РЗ

По своему функциональному назначению устройства РЗ являются решающими устройствами.

При организации системы РЗ объекта со сложной топологией производят его декомпозицию на отдельные зоны, контролируют параметры в тех или иных точках каждой зоны и анализируют состояние зон по заданным алгоритмам выявления повреждений различных видов.

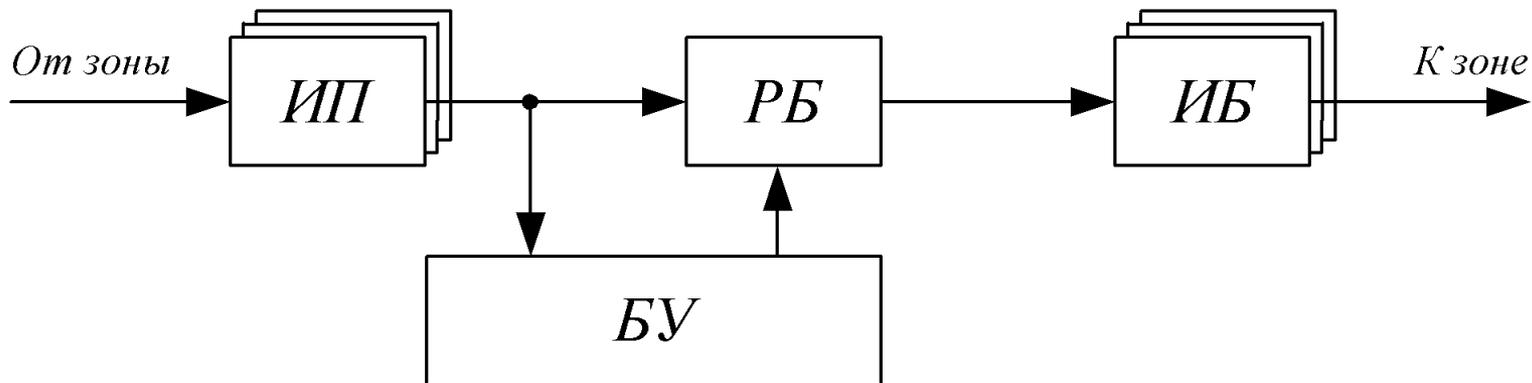
При выполнении условий, подтверждающих возникновение в пределах зоны повреждения, принимается решение об отключении соответствующей зоны и инициируется запуск исполнительных органов.

# Основные понятия об архитектуре РЗ

## Автономные системы РЗ

Наиболее простой вариант – защита одной выделенной в объекте защиты **зоны** по одному возможному виду повреждения

ИП – измерительные преобразователи; РБ – решающий блок;  
ИБ – исполнительные блоки; БУ – блок управления.



## Автономные системы РЗ (АРЗ)

- РБ реализует какой-либо один алгоритм выявления повреждения (максимально-токовый, дифференциальный и т.п.);
- БУ обеспечивает адаптацию АРЗ к изменяющимся во времени контролируемым параметрам путем введения торможения, блокировок, автоматической коррекции уставок и т.п.

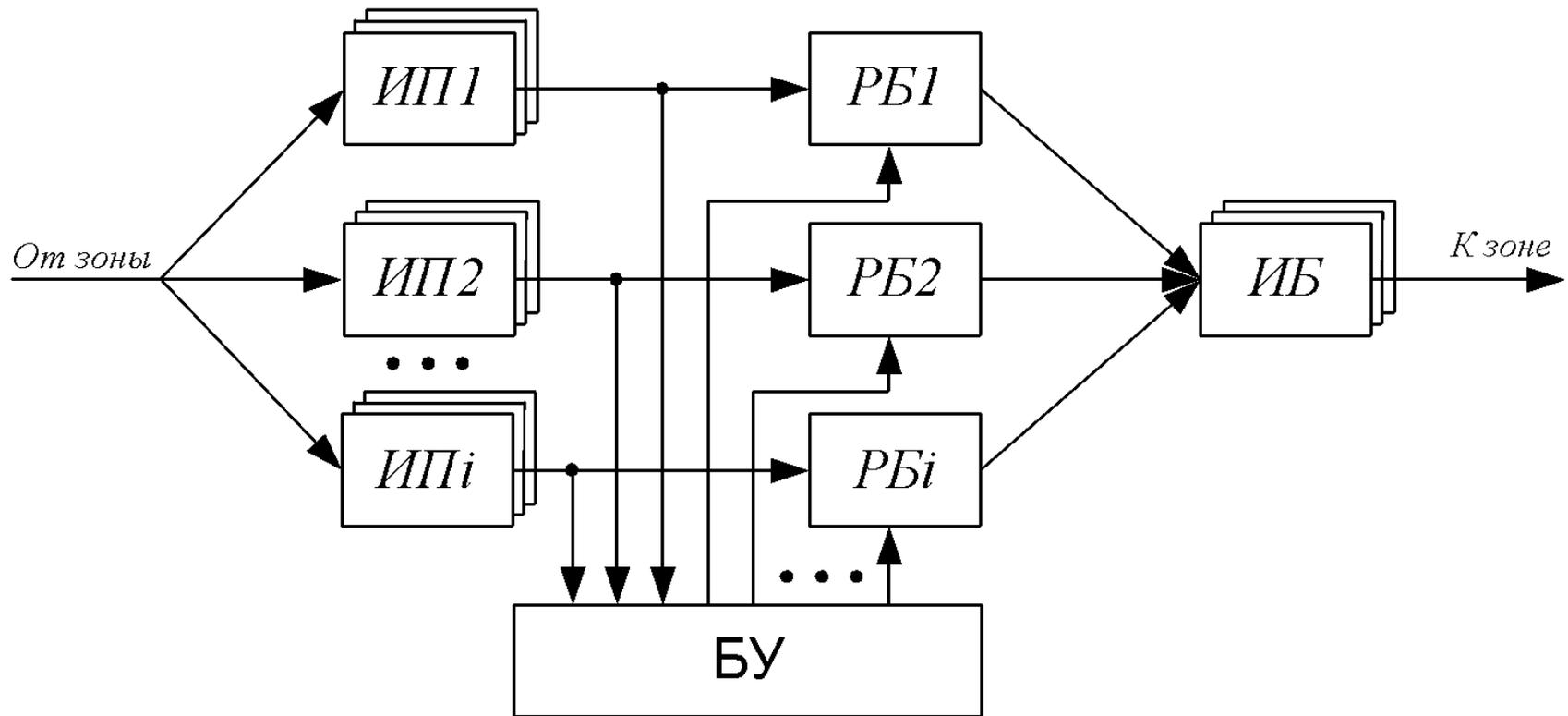
# Комплексные системы РЗ (КРЗ)

Предназначены для защиты одной из выделенных в объекте защиты зон (например, генератора в блоке Г-Т) по нескольким видам возможных повреждений.

КРЗ представляют собой набор из нескольких АРЗ, в отношении которых выполняются условия непротиворечивости их функционирования.

Обеспечение этого условия возлагается как дополнительная функция на БУ (непротиворечивость совместной работы нескольких РБ относительно одной зоны.)

# Структурная схема КРЗ

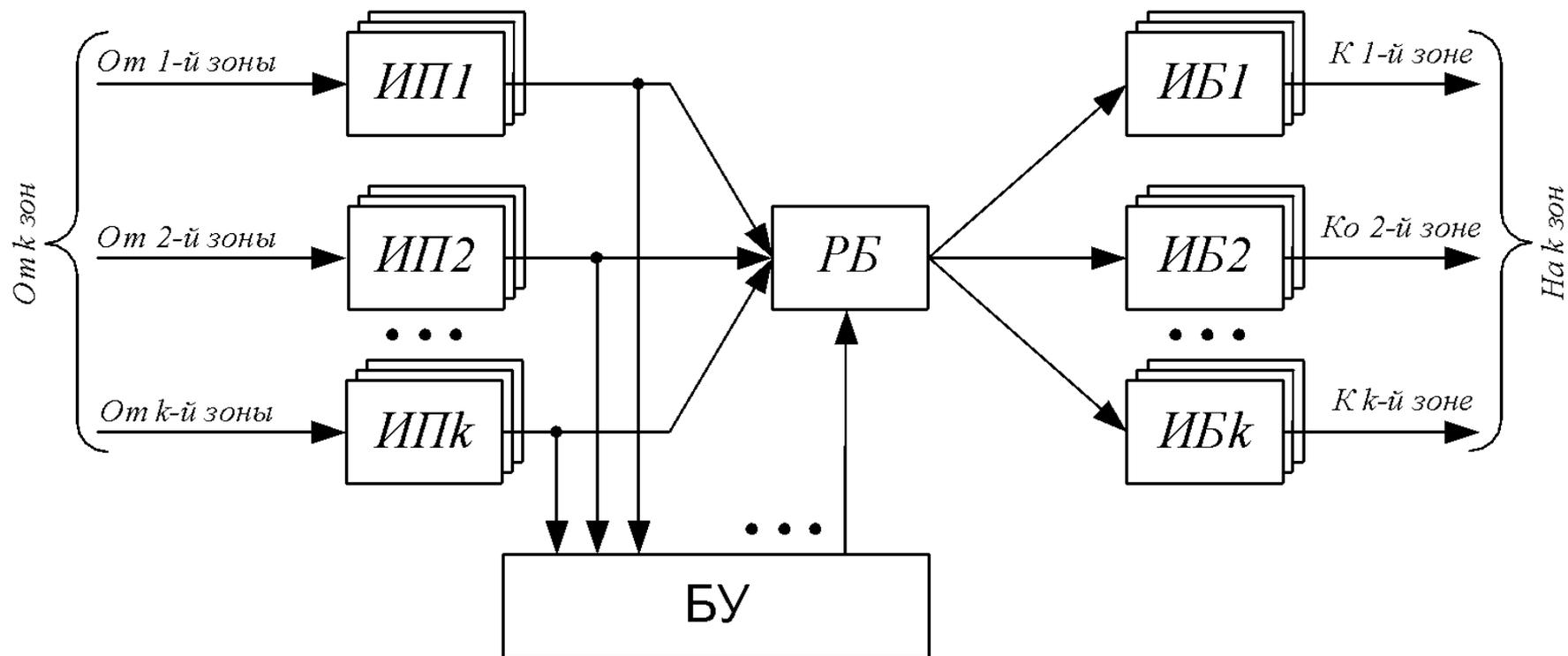


# Централизованные системы РЗ (ЦРЗ)

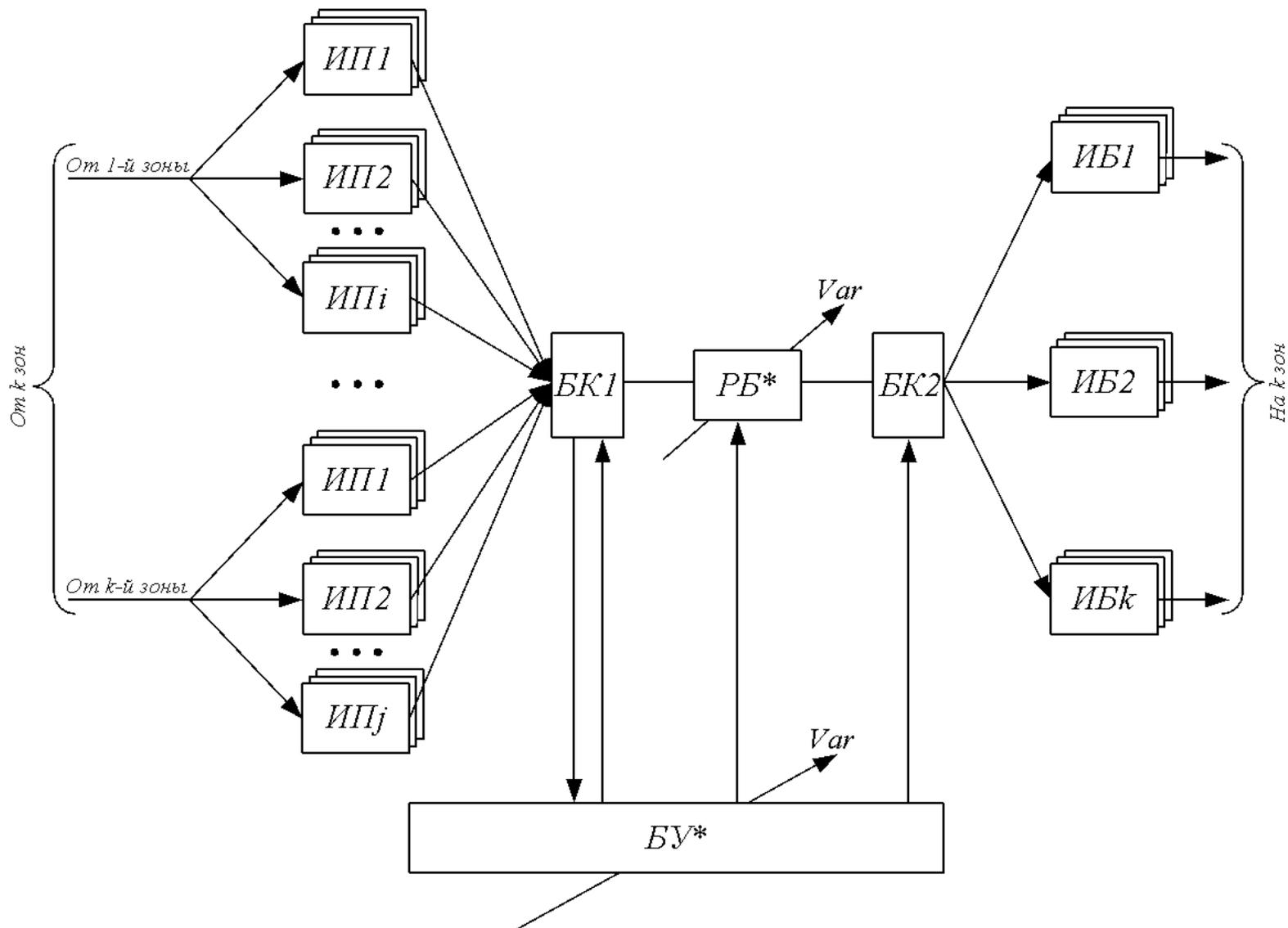
Предназначены для защиты нескольких зон по одному из возможных видов повреждений.

На БУ возлагается новая дополнительная функция – обеспечение условий непротиворечивости между несколькими решениями одного РБ относительно нескольких контролируемых зон.

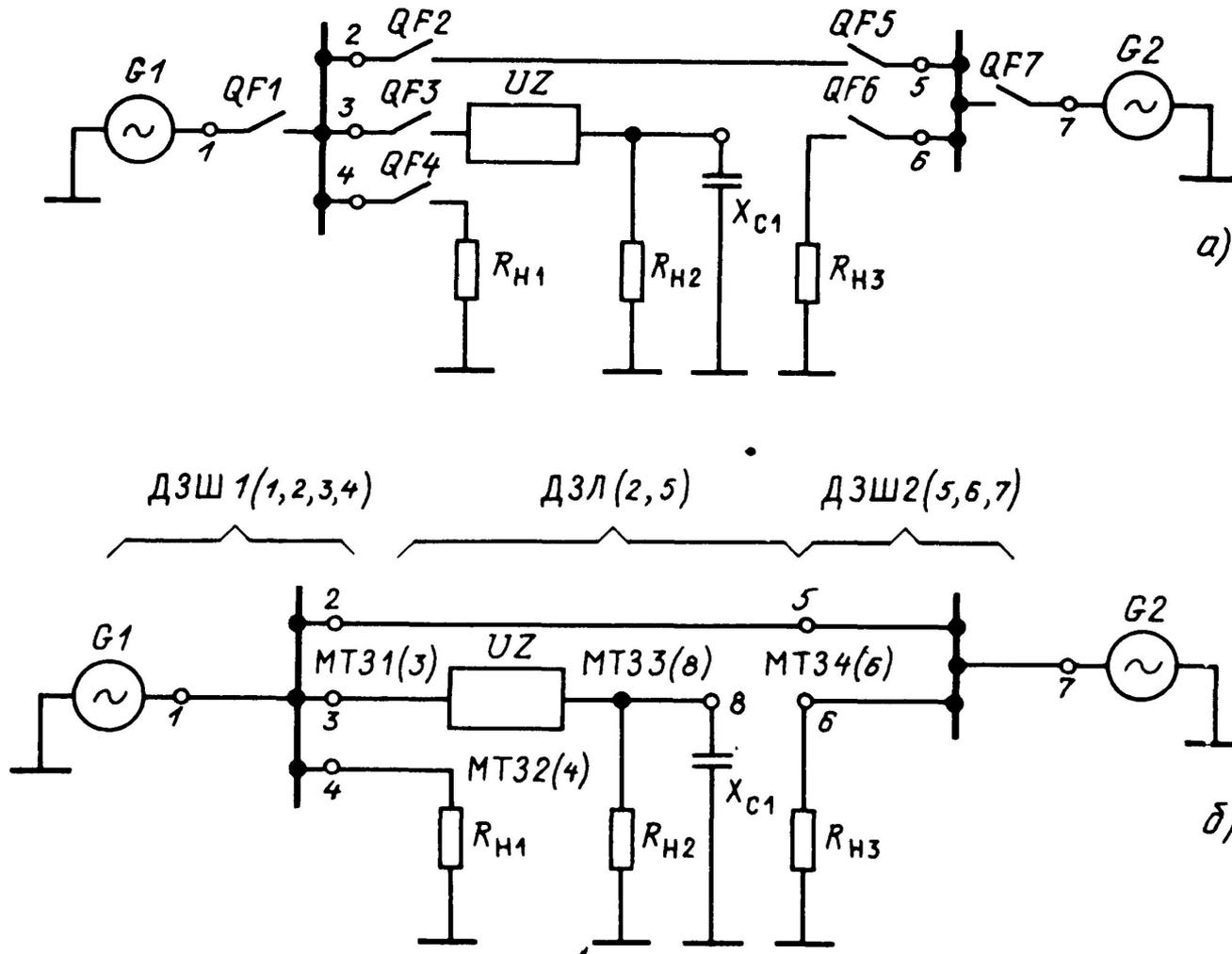
# Структурная схема ЦРЗ

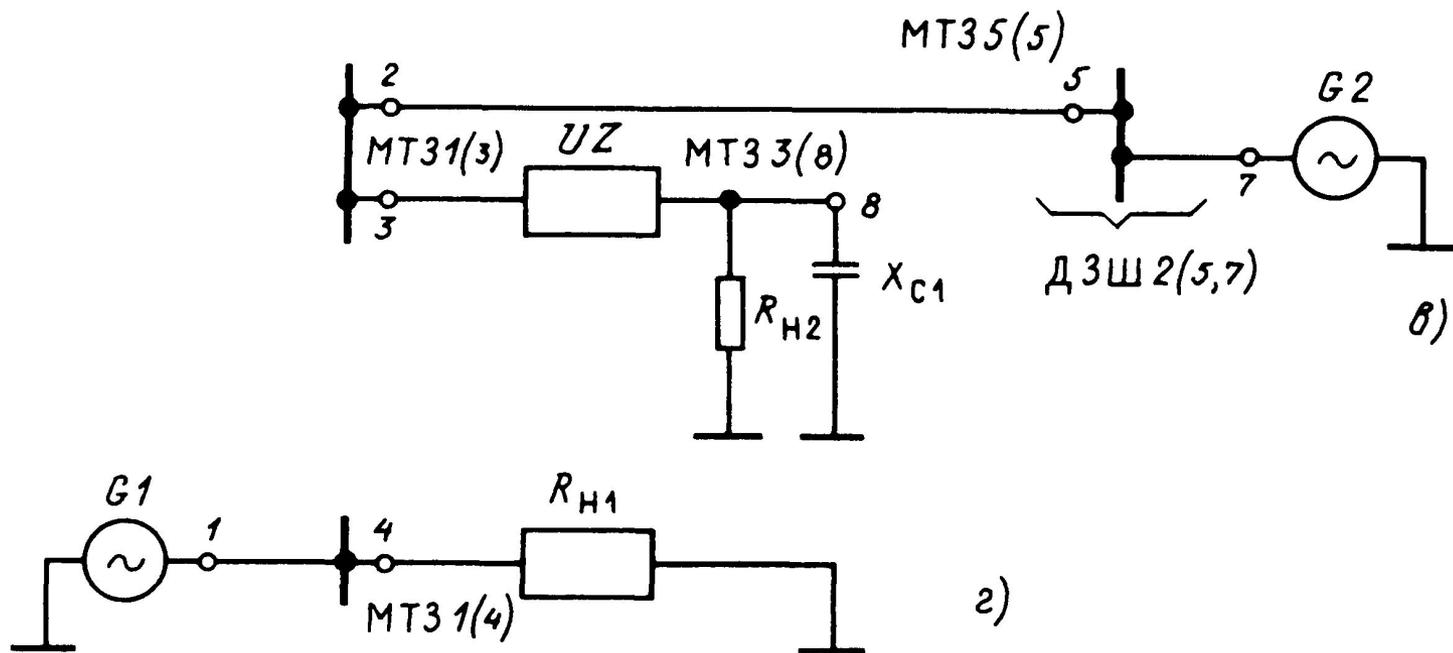


# Структурная схема УРЗ



# Влияние топологии сети на функциональный состав системы РЗ



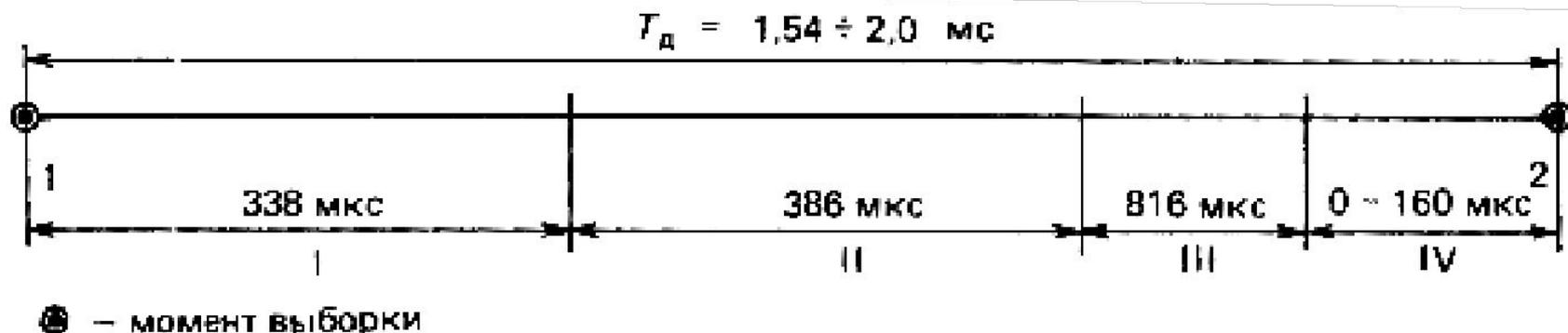


## Структурная схема алгоритма дифференциальной защиты генератора



Блоки 3-5 по сигналу таймера в течение периода дискретизации вводят значения фазных токов нейтрали и выводов статора. На время считывания запрещается смена состояний АЦП. Затем в блоках 6 и 7 выполняется проверка состояния каждой фазы статора и формируется, в случае необходимости, сообщение о КЗ. Поскольку ДЗГ предназначена для защиты от междуфазных КЗ, она должна действовать при срабатывании **защиты двух или трех фаз.** Сообщение о срабатывании защиты одной фазы – признак излишнего срабатывания или отказа в срабатывании. Поэтому в блоке 8 проверяется состояние ДЗГ и, если нужно, формируются сигналы отключения ТГ или сообщения об отказе.

Длительность цикла программы РЗ (период дискретизации) кратна полупериоду или периоду переменного тока; интервал дискретизации корректируется при изменении частоты в системе.



Распределение интервала дискретизации между операциями различных частей программы:

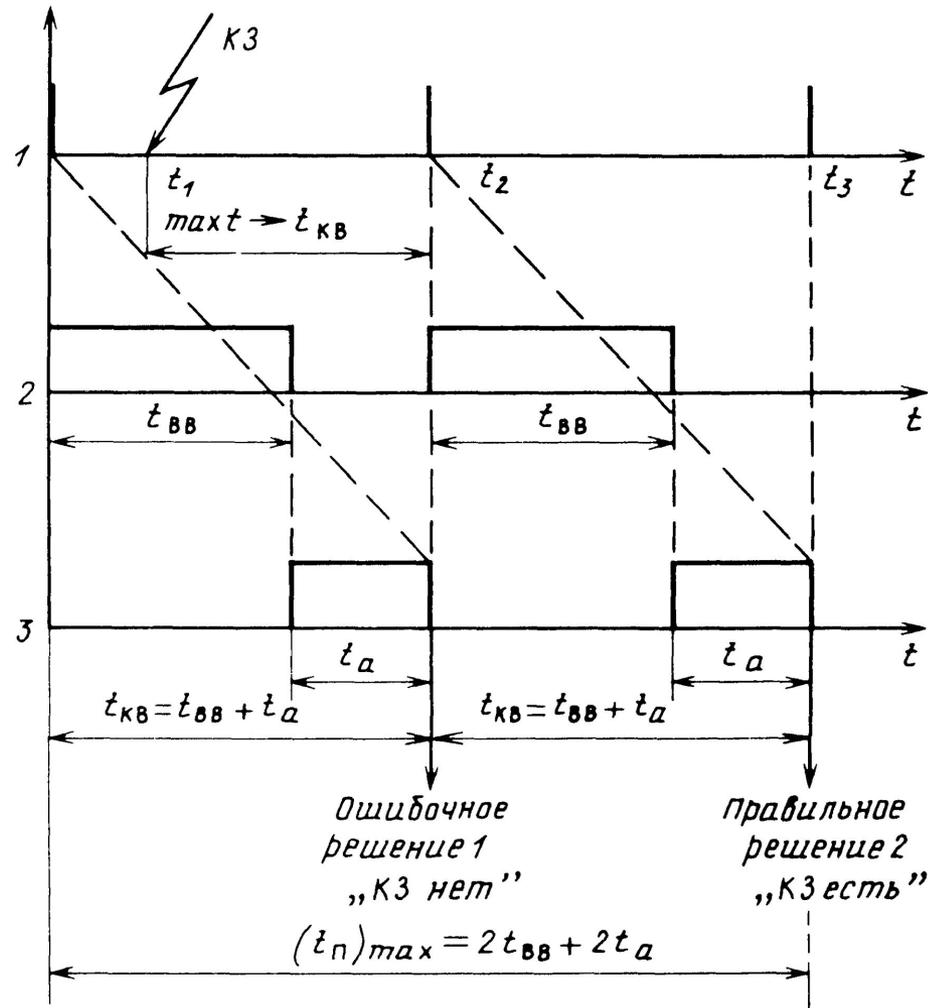
*I* – опрос ИП и формирование контролируемых параметров; *II* – сравнение с уставкой, формирование выдержек времени и логические функции; *III* – ожидание прерывания от таймера; *IV* – частотная коррекция интервала дискретизации  $T_d$

$$2,0 \text{ мс} = 2 \text{ миллисекунды} = 0,002 \text{ с}$$

$$338 \text{ мкс} = 338 \text{ микросекунд} = 0,000338 \text{ с}$$

$$\underline{\text{Один период тока } 50 \text{ Гц: } 1/50 \text{ с} = 0,02 \text{ с}}$$

# ПОВЫШЕНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ МПРЗ С ПРОЦЕДУРНЫМ ПРОГРАММИРОВАНИЕМ



Временные диаграммы, иллюстрирующие традиционный способ организации вычислительного процесса в МПРЗ

## Время преобразования порции (кванта) информации о контролируемом параметре режима:

$$t_{\Pi} = t_{\text{КВ}} + t_{\text{ВВ}} + t_{\text{а}}, \quad (4.3)$$

где  $t_{\text{КВ}}$  – интервал квантования параметра, преобразуемого из аналоговой формы в цифровую;  $t_{\text{ВВ}}$  – время ввода информации о контролируемом параметре в память данных ЭВМ;  $t_{\text{а}}$  – время анализа информации о контролируемом параметре на одном шаге квантования и принятия решения о состоянии объекта защиты.

Наличие слагаемого  $t_{\text{КВ}}$  в выражении (4.3) обусловлено тем, что если КЗ на объекте защиты возникает внутри текущего интервала квантования (ввода первой порции данных в ОЗУ ЭВМ), то соответствующая информация о КЗ начинает поступать для обработки в ЭВМ только с началом последующего интервала квантования (на втором шаге квантования). При этом будет иметь место задержка, максимальное значение которой приближается к длительности интервала  $t_{\text{КВ}}$ . Очевидно, что для реализации описанного алгоритма преобразования информации зна-

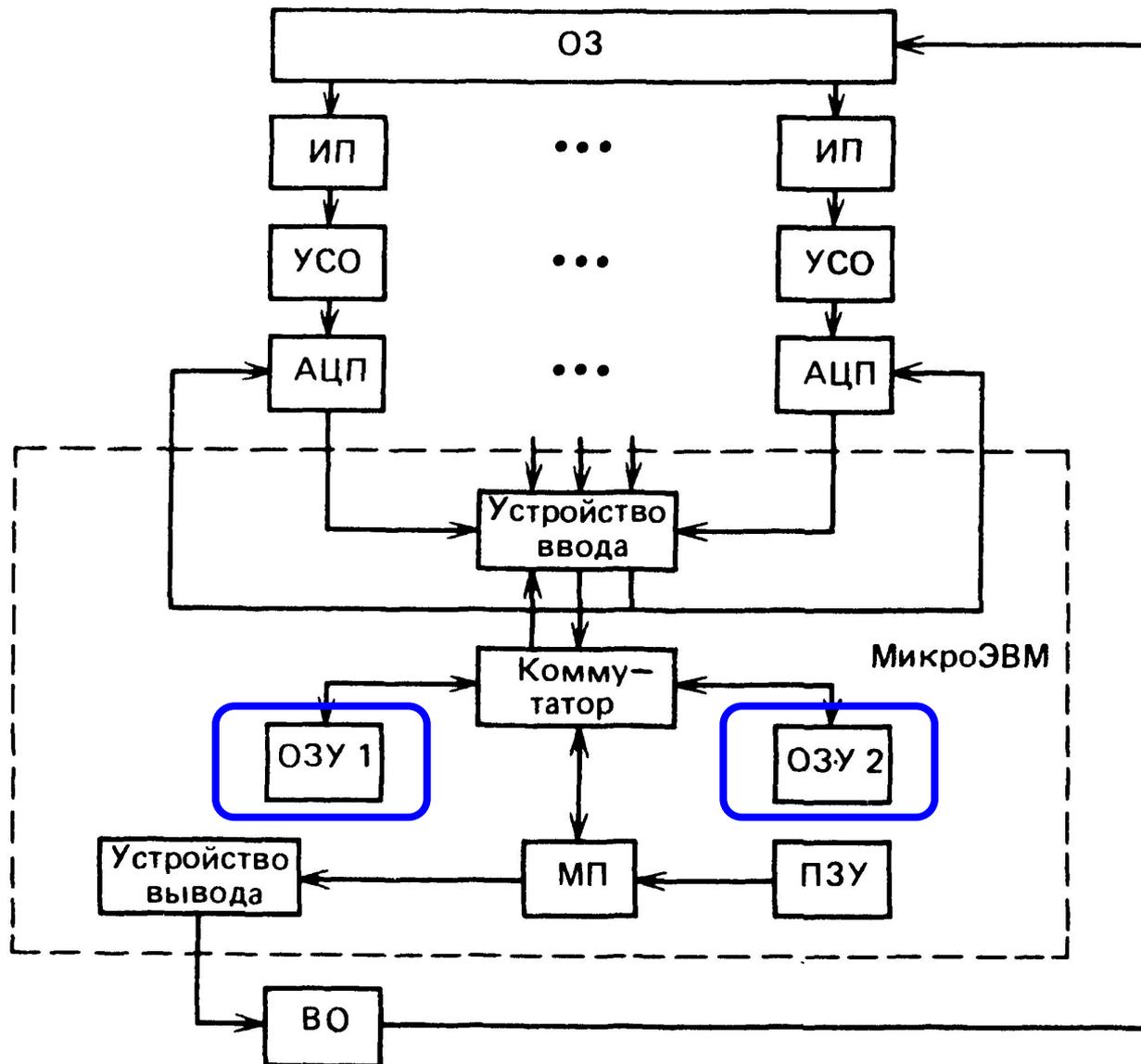
чение  $t_{\text{КВ}}$  должно выбираться из условия

$$t_{\text{КВ}} = t_{\text{ВВ}} + t_{\text{а}}, \quad (4.4)$$

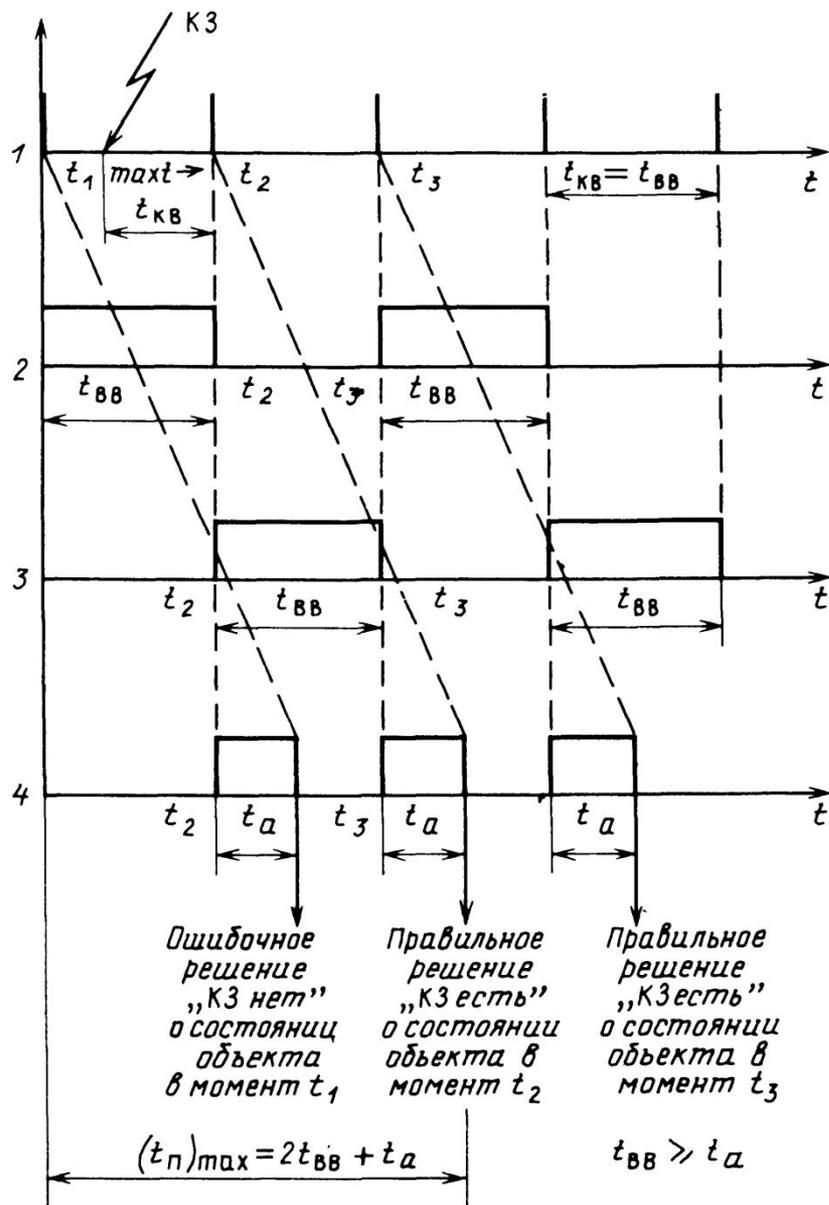
т.е. каждый очередной опрос данных может быть осуществлен только после ввода и обработки предыдущей порции данных. Сопоставляя выражения (4.3) и (4.4), получаем формулу для максимального значения времени  $t_{\text{п}}$

$$(t_{\text{п}})_{\text{max}} = 2t_{\text{ВВ}} + 2t_{\text{а}} = 2t_{\text{КВ}}. \quad (4.5)$$

Сокращение времени  $t_{\text{п}}$  (а значит, и времени выявления КЗ) за счет уменьшения времени квантования (увеличения частоты опроса) неприемлемо, поскольку в этом случае не хватит времени либо для ввода в память ЭВМ соответствующей порции информации, либо для обработки из-за ограниченного быстродействия процессора.



Структурная схема МПРЗ повышенного быстродействия



Временные диаграммы, иллюстрирующие способ организации вычислительного процесса в МПРЗ повышенного быстродействия

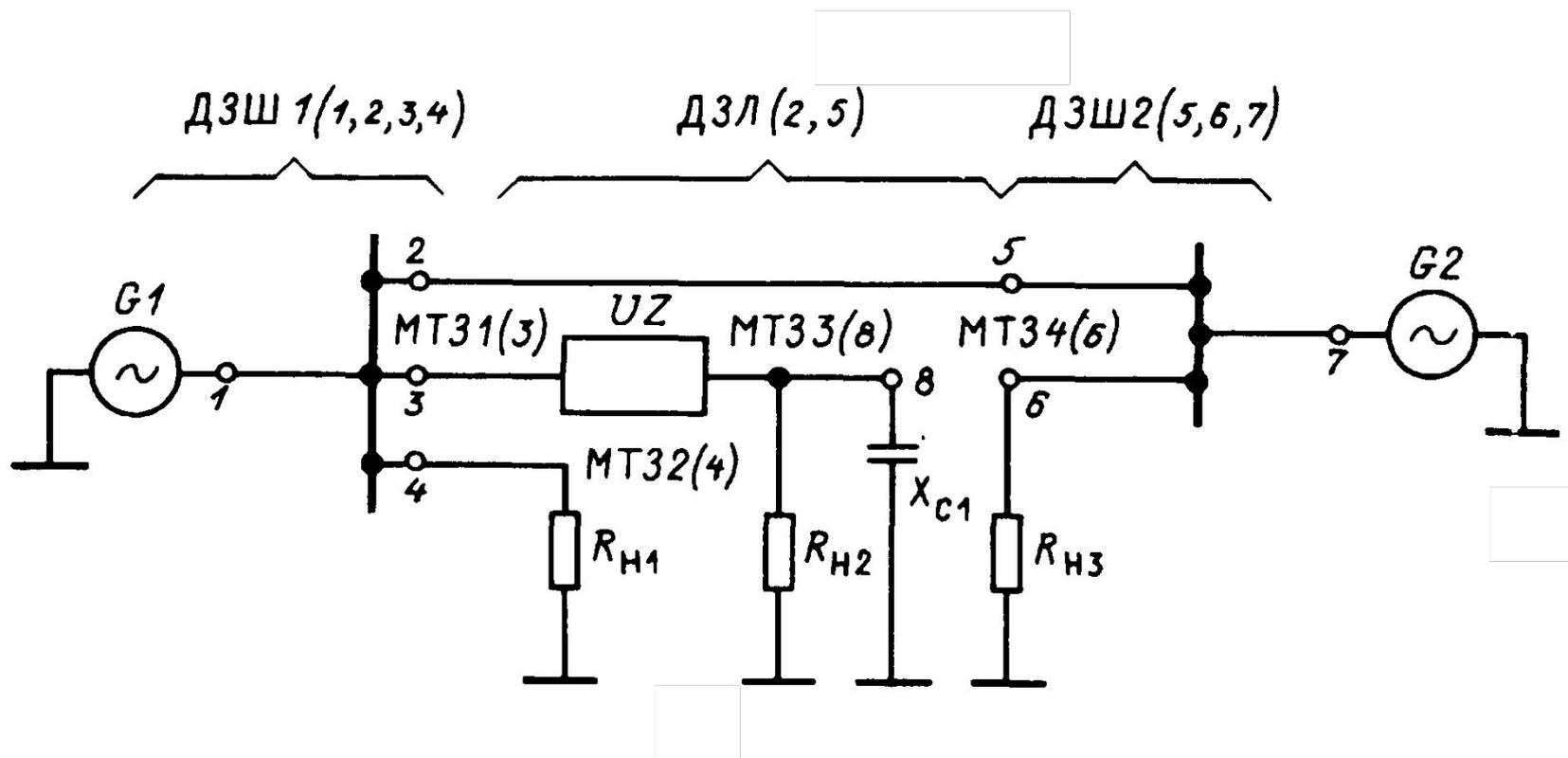
способ особенно эффективен при реализации сложных алгоритмов МПРЗ с большим временем обработки данных и принятия решения  $t_a$ , а также при защите многоконцевых объектов, т.е. там, где велико значение  $t_{\text{ВВ}}$ .

## МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ РЗ С ПРОЦЕДУРНО-АППАРАТНЫМ ПРОГРАММИРОВАНИЕМ СТРУКТУРЫ

Суть принципа заключается в гибкой перестройке системы РЗ в реальном масштабе времени с обеспечением автоматического перебора ансамбля структур защиты по тому или иному закону в зависимости от режимов и топологии объектов защиты путем программируемой коммутации готовых структур или функциональных узлов (ФУ) одного и того же набора.

При этом не требуется кардинальная профессиональная переквалификация специалистов по РЗ ЭЭС, так как проектирование, программирование и эксплуатация систем защиты на базе перестраиваемых структур значительно проще, чем традиционных средств вычислительной техники.

Решения о том, какие структуры РЗ целесообразно применять для той или иной конфигурации ОЗ, возникающей в процессе оперативных переключений АВ, **принимаются разработчиком на стадии проектирования** и закладываются в базу данных в виде таблицы соединений внешних элементов ФУ.



## СИСТЕМА МПРЗ С АСИНХРОННЫМ ПЕРЕФОРМИРОВАНИЕМ СТРУКТУР

Для ЭЭС, конфигурация которых в процессе эксплуатации и аварийных переключений изменяется относительно редко (например, единицы раз за несколько десятков—сотен часов работы), целесообразно использование универсальных МПРЗ с переформированием **заранее заданных** структур РЗ, причем для каждого возможного режима объектов защиту в блоке управления (БУ) хранится программа **коммутации ФУ в набор соответствующих структур РЗ**. Каждый ФУ, как и в жестких РЗ, может входить только в одну структуру РЗ.

Переформирование аппаратно реализованных структур РЗ путем перекоммутации связей между ФУ выполняется **при каждой реконфигурации** объектов защиты (ОЗ).

Поскольку каждая перекоммутация структур происходит только при переходе ОЗ в определенное состояние, а именно **при изменении топологии и режимов ОЗ**, такая МПРЗ названа защитой **с асинхронным переформированием структур**. При этом используется принятое в ВТ понятие асинхронной системы, что предполагает **перед выполнением операции проверку состояния внешнего по отношению к ЭВМ объекта и только после перехода последнего в соответствующее состояние осуществление необходимой операции**. Аналогичный принцип использован в МПРЗ



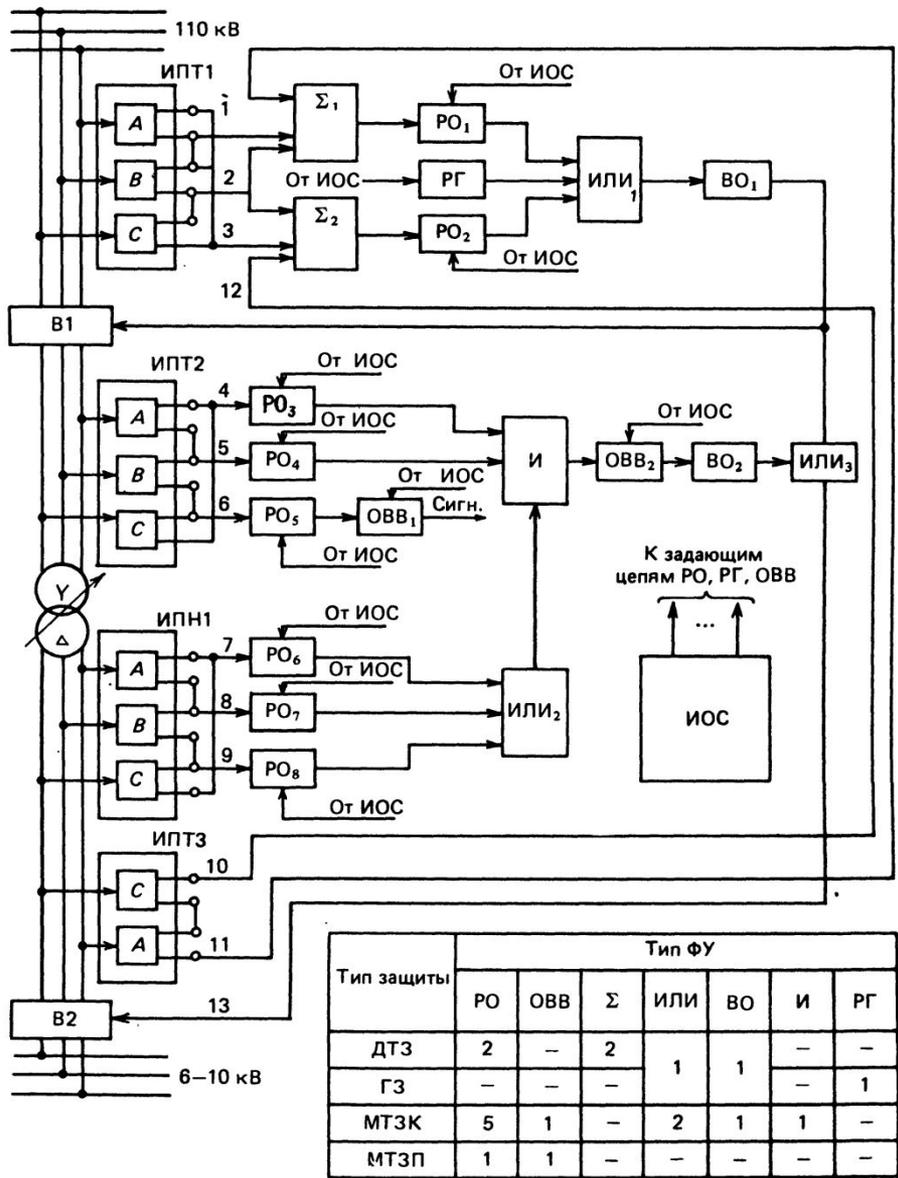
Скоммутированное устройство РЗ существует до тех пор, пока не произойдет изменение топологии сети, после которой аналогичным образом будет скоммутирована наиболее целесообразная для новой конфигурации сети РЗ (например, дифференциальная) . Наряду с этим может обеспечиваться параметрическая адаптация устройств РЗ путем корректировки их уставок.

## Универсальная микропроцессорная релейная защита с циклической перекоммутацией функциональных узлов

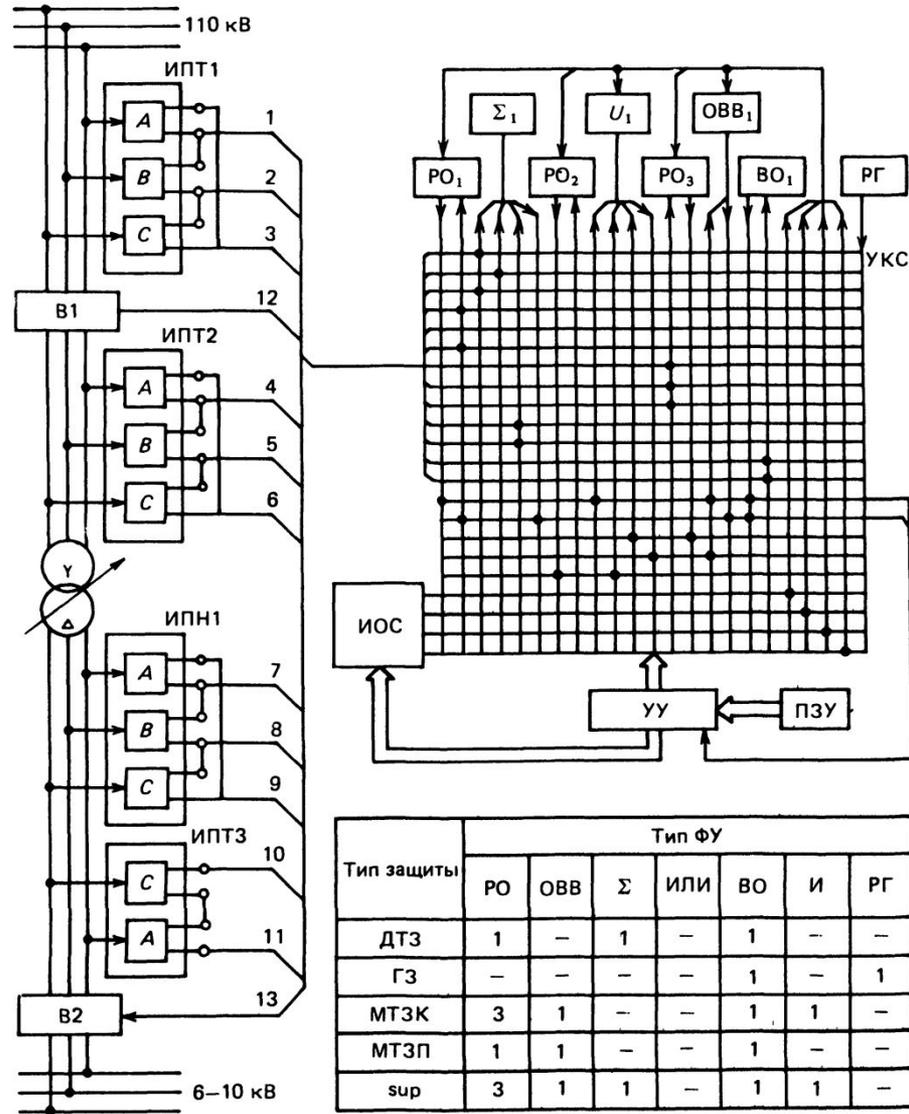
Проблема обеспечения быстродействия снимается за счет аналоговой реализации устройств выявления повреждений, а цифровая реализация функций настройки решающих блоков (РБ) и автоматической перестройки архитектуры РЗ в процессе контроля ОЗ обеспечивает достаточно полное использование вычислительной мощности средств ВТ.

В качестве примера использования МПРЗ с перекоммутацией ФУ рассмотрим вариант защиты силового понижающего трансформатора.

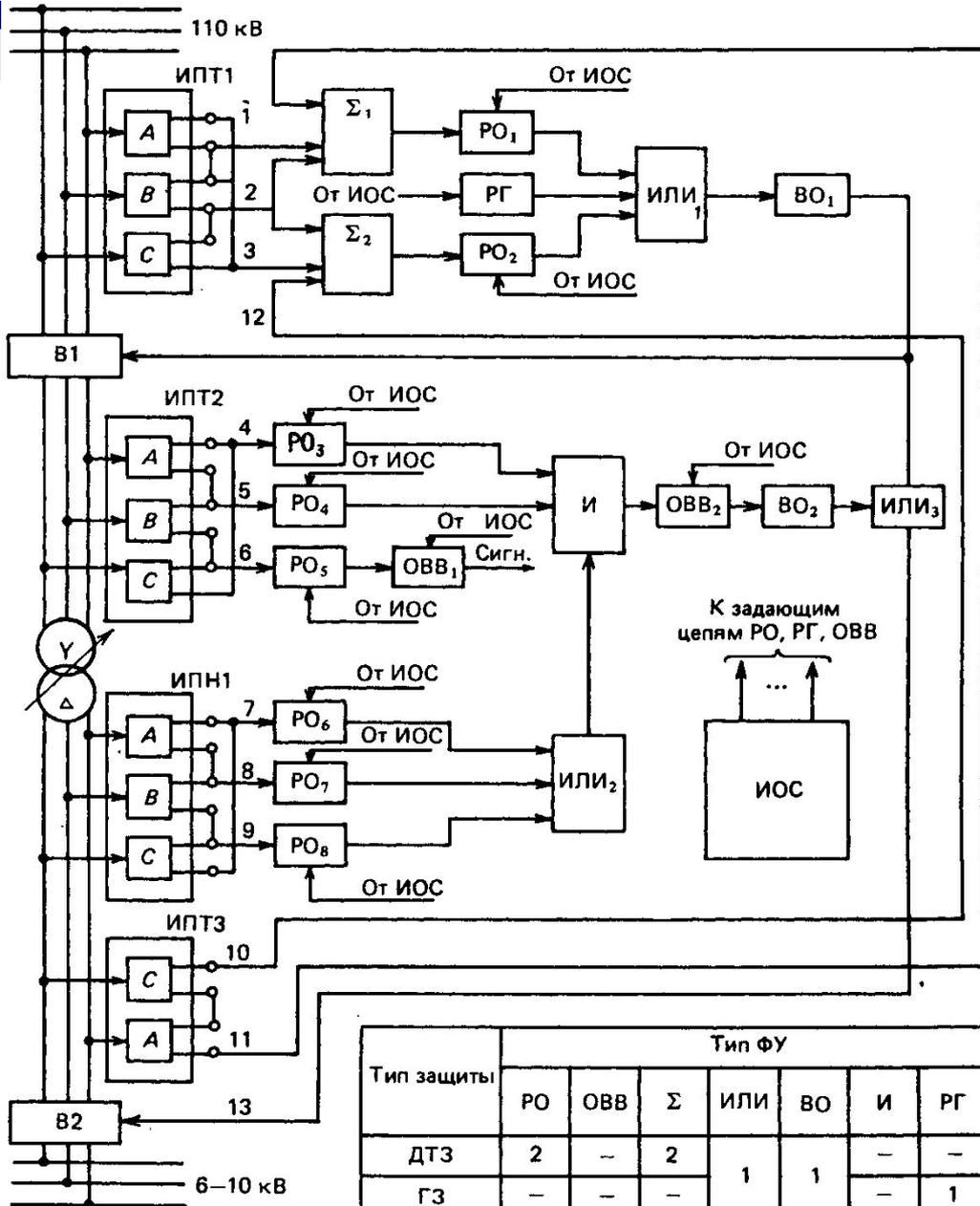
Система РЗ содержит четыре типа автономных защит: дифференциально-токовую ДТЗ; газовую ГЗ, максимальную токовую защиту комбинированную МТЗК и максимальную токовую защиту от перегрузки МТЗП.



Защита с жесткой архитектурой

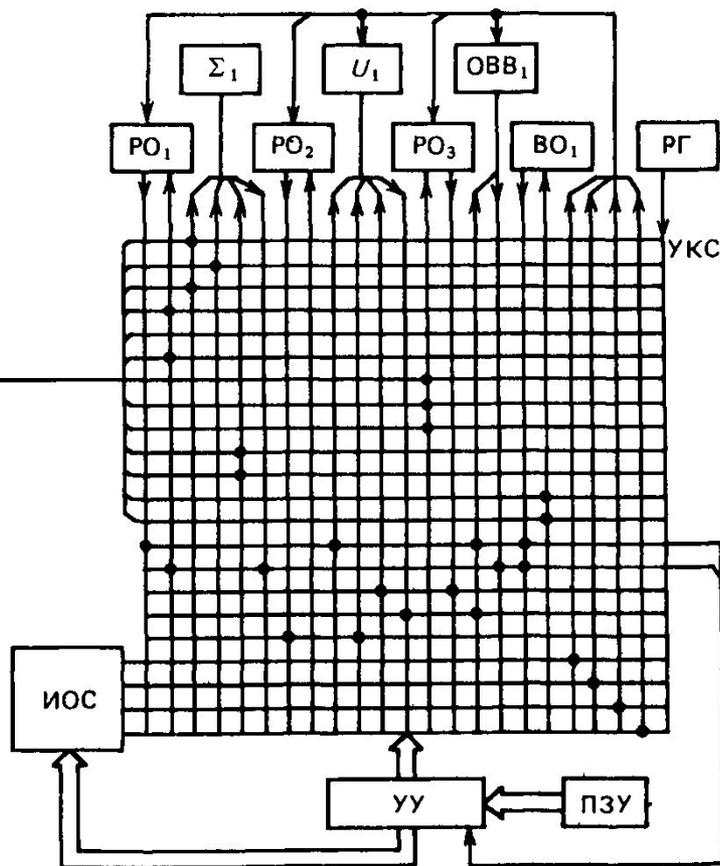
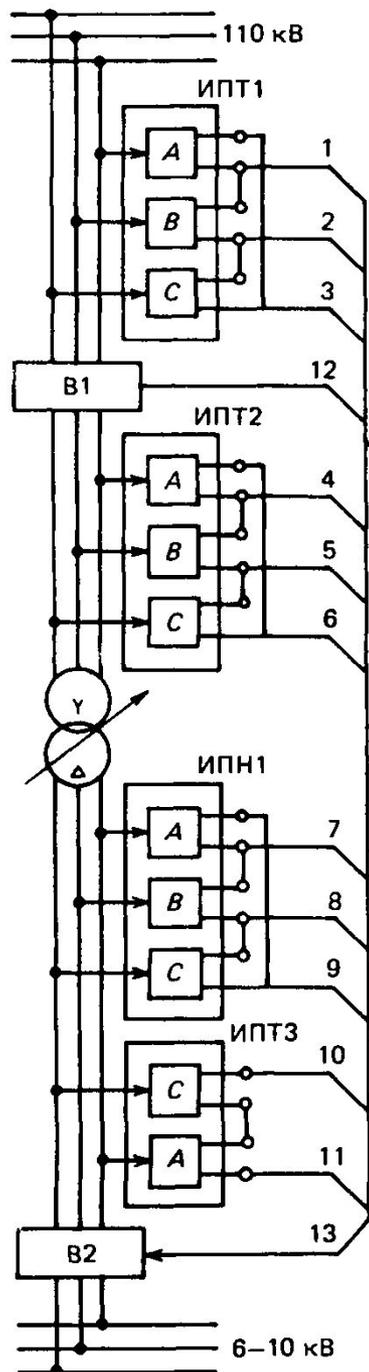


Защита с гибкой архитектурой



Традиционная реализация РЗ (первый вариант – жесткая архитектура) предусматривает использование 19 достаточно сложных ФУ, причем многие из них повторяются в каждой структуре автономных РЗ.

Тип защиты	Тип ФУ						
	РО	ОБВ	$\Sigma$	ИЛИ	ВО	И	РГ
ДТЗ	2	–	2	1	1	–	–
ГЗ	–	–	–	1	1	–	1
МТЗК	5	1	–	2	1	1	–
МТЗП	1	1	–	–	–	–	–



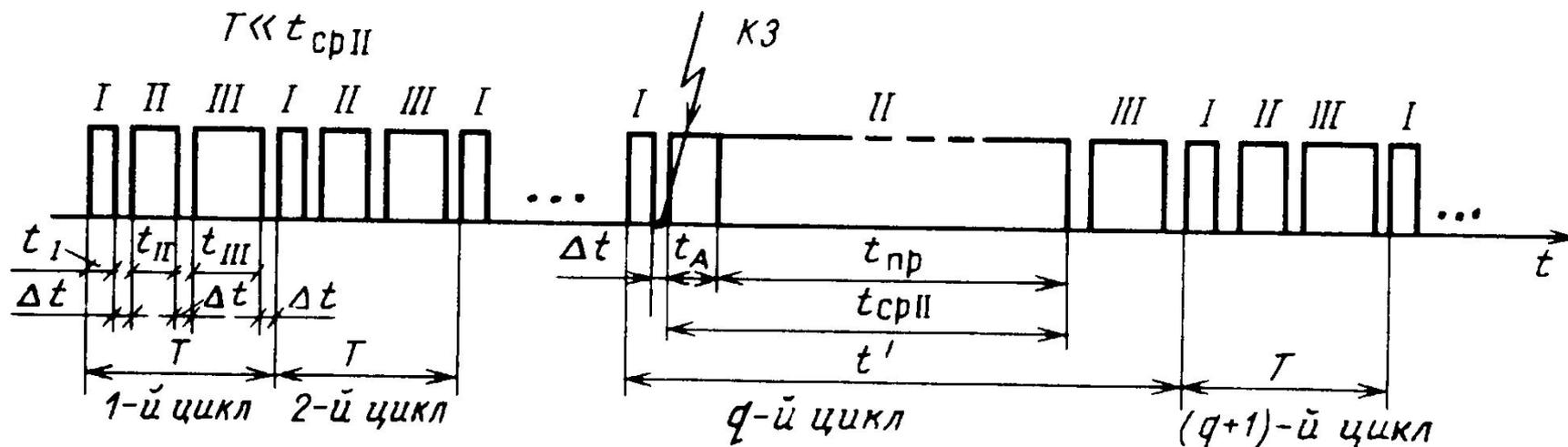
Тип защиты	Тип ФУ						
	РО	ОВВ	Σ	ИЛИ	ВО	И	РГ
ДТЗ	1	—	1	—	1	—	—
ГЗ	—	—	—	—	1	—	1
МТЗК	3	1	—	—	1	1	—
МТЗП	1	1	—	—	1	—	—
sup	3	1	1	—	1	1	1

Второй вариант построения РЗ (гибкая архитектура) предполагает рациональное использование минимального набора ФУ за счет их периодической перекоммутации для организации заданного ансамбля структур РЗ. Достигаемая таким образом экономия в общем количестве ФУ приводит к существенному упрощению РЗ. Такой подход позволяет применительно к рассматриваемому примеру сократить количество ФУ с **19 до 8**, т.е. почти в 3 раза.

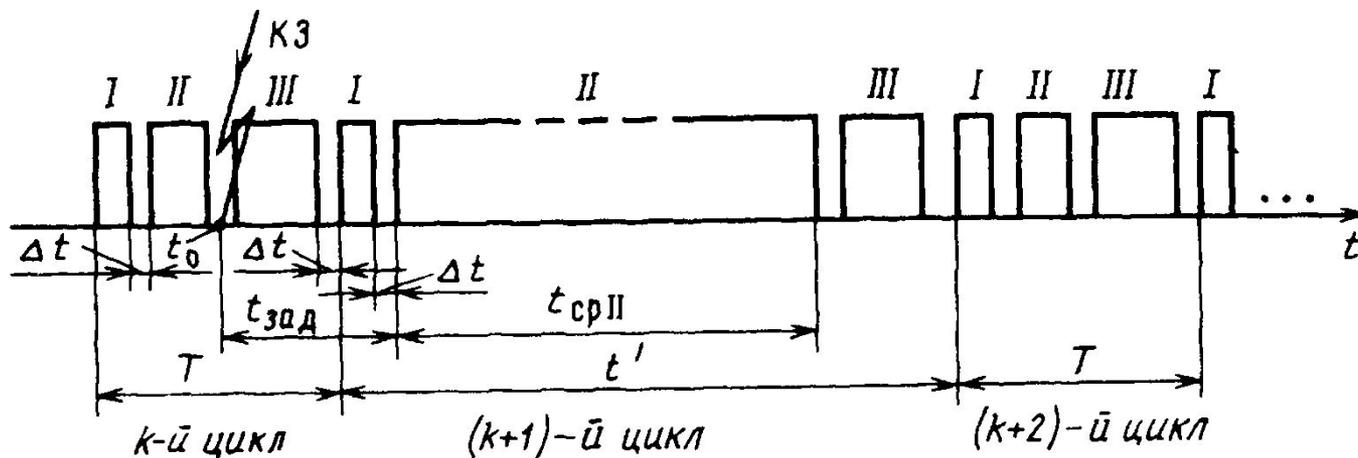
Устройство РЗ содержит измерительные преобразователи параметров защищаемого объекта ИПТ, ИПН, многоканальный управляемый источник опорных сигналов ИОС, набор ФУ и универсальную коммутирующую структуру УКС, состоящую из систем горизонтальных и вертикальных шин, на пересечении которых установлены элементарные настраиваемые ключи. Ключи (например, триггерные контакты) имеют два состояния настройки: "включен" (ключи в этом состоянии обозначены точками) или "отключен". Кроме того, система гибкой УРЗ должна содержать устройство управления УУ и ПЗУ. Измерительные преобразователи параметров, например электрического тока ИПТ, подключены к части горизонтальных шин УКС. К другой части шин подключены выходы ИОС.

Получив из ПЗУ задание, УУ реализует коммутационный граф, настраивая ключи УКС. Одновременно с этим УУ настраивает ИОС таким образом, чтобы на выходах последнего была представлена необходимая совокупность опорных напряжений (уставок). После выполнения всех необходимых соединений внутри УКС будет реализована **первая структура (I)** из входящих в ансамбль защит. Через заданный промежуток времени **t1** (его значение определяется заранее при проектировании УРЗ исходя из необходимого времени анализа состояния контролируемых зон по алгоритму реализованной структуры защиты) в случае, если режим работы защищаемых зон нормальный, по правилам, хранящимся в ПЗУ, устройство УУ перекоммутирует с помощью УКС соответствующие ФУ, ИП и ИОС (перестройка уставок) и реализует очередную структуру **(II)** второй из входящих в ансамбль РЗ. И так до тех пор, пока не произойдет возврат к структуре **I**. На этом первый цикл работы УРЗ заканчивается. В данном цикле будет реализован весь ансамбль структур УРЗ и, следовательно, произведен контроль защищаемых зон по каждому из возможных видов повреждения.

Если в процессе работы при реализации некоторой  $j$ -й структуры будет выявлено повреждение в пределах защищаемых зон, УУ приостановит дальнейшую перекоммутацию УРЗ. Спустя время, необходимое для принятия решения -  $t_{np}$ , «законсервированная» структура защиты отключает выявленное КЗ соответствующего вида.



Временная диаграмма функционирования гибкой системы УРЗ (случай возникновения КЗ, выявляемого структурой II перед началом ее формирования)



Временная диаграмма функционирования гибкой системы УРЗ (случай возникновения КЗ, выявляемого структурой II после завершения ее формирования)

Наихудший вариант: возникновение КЗ вида, выявляемого структурой II, но в момент времени  $t_0$ , пришедшийся на интервал  $\Delta t$  перекоммутации УКС в  $k$ -м цикле от структуры II к структуре III. Поскольку структура III не предназначена для выявления возникшего вида КЗ, то до начала его выявления пройдет какое-то время задержки  $t_{зад}$ , равное в данном случае сумме времен  $t_{III}$ ,  $t_I$ ,  $2\Delta t$  и времени между моментом  $t_0$  и началом формирования структуры III. Через время  $t_{зад}$  после формирования структуры II начинается выявление возникшего КЗ. При этом структура II "замораживается" на время  $t_{срII} = t_a + t_{np}$ , т.е. пока не будет дана команда на отключение поврежденной зоны, а далее возобновляется перекоммутация очередных структур.

В общем случае будет иметь место задержка  $t_{зад}$  в срабатывании защиты, максимальное значение которой может достигать величины  $T - t_j$ , где  $t_j$  — время существования структуры  $j$ , выявляющей возникшее замыкание соответствующего вида. Ясно, что с ростом числа структур в ансамбле увеличивается  $T$ , причем в этом случае  $T \gg t_j$ . Поэтому можно считать, что  $t_{зад.макс} \leq T$ . Отсюда вытекает требование: для сокращения доли  $t_{зад}$  в общем времени от момента возникновения до выявления и отключения замыкания необходимо выполнение условия

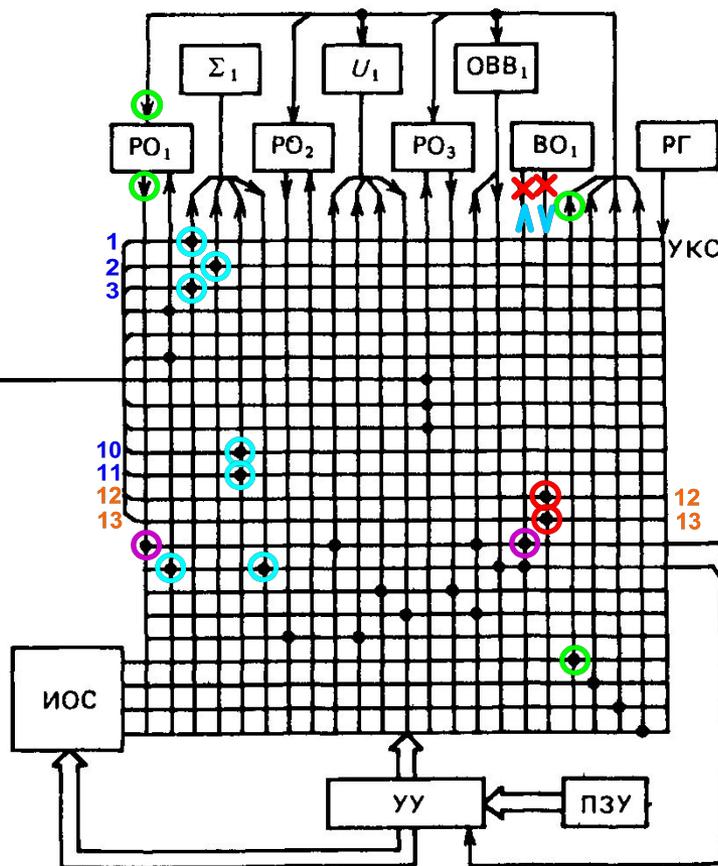
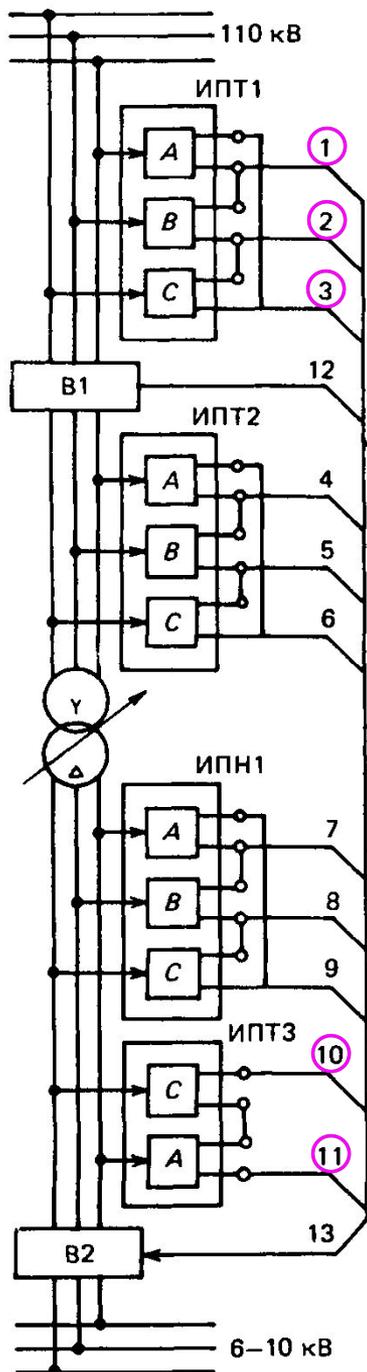
$$(t_{зад.})_{max} \leq T \leq t_{cpj}, \quad \text{где} \quad t_{cpj} = (t_a)_j + (t_{np})_j$$

Современный уровень развития техники РЗ (например, в автономных ЭЭС) позволяет реализовать структуры, которые за время  $t_a = (0,5 \div 1,0)$  мс могут проанализировать состояние контролируемых зон. Электронные коммутирующие устройства (УКС) обладают быстроедействием  $\Delta t = (100 \div 200)$  нс. Таким образом, при заданном времени принятия решения, например  $t_{np} = 50$  мс, технически возможно уже в настоящее время реализовать за время  $T = 5$  мс ( $T \ll t_a + t_{np}$ ) до

$$T / (t_a + t_{np}) = 5 \div 10$$

структур РЗ в одном ансамбле, что вполне достаточно для защиты сложных объектов.





Получив из ПЗУ задание, УУ реализует коммутационный граф, настраивая ключи УКС.

Одновременно с этим УУ настраивает ИОС таким образом, чтобы на выходах последнего была представлена необходимая совокупность опорных напряжений (уставок).

За время  $\Delta t$  реализована **первая структура (I)** из входящих в ансамбль защит - **ДТЗ**

Через заданный промежуток времени  $t_1$ , если режим работы защищаемых зон нормальный, устройство УУ выполнит перекоммутацию и реализует очередную структуру (II)

Тип защиты	Тип ФУ						
	PO	OBB	Σ	ИЛИ	BO	И	PГ
ДТЗ	1	—	1	—	1	—	—
ГЗ	—	—	—	—	1	—	1
МТЗК	3	1	—	—	1	1	—
МТЗП	1	1	—	—	1	—	—
sup	3	1	1	—	1	1	—

## ПРОГНОЗИРУЮЩИЕ ГИБКИЕ РЗ НА БАЗЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ МП

Известно, что операция прогнозирования (предсказания), состоит в точном или приближенном определении последующего значения функции по некоторой имеющейся совокупности данных, зависящих от ее предыдущих значений.

В энергетических установках и ЭЭС (автономных и объединенных) для целей прогноза максимальных значений токов КЗ могут применяться простейшие прогнозирующие РЗ, основанные на использовании таких информативных параметров, как первая, вторая производные тока и их функции. Прогнозирующие защиты повышенного уровня технического совершенства должны основываться на использовании моделей переменной составляющей тока КЗ, а в пределе — модели полного тока КЗ с учетом его апериодической слагающей.

Прогнозирующие РЗ в начальный момент развития повреждения прогнозируют развитие аварийной ситуации и принимают решение об отключении ОЗ задолго до наступления максимальных значений тока КЗ. В совокупности с быстродействующими АВ ПРЗ осуществляют токоограничивающее отключение цепей КЗ. Такая потребность уже давно существует в автономных ЭЭС низкого напряжения, где быстродействующие АВ имеют времена срабатывания около единиц миллисекунд, что вызывает необходимость срабатывания устройств РЗ за время менее 1 мс. Аналогичная ситуация возникает и в объединенных ЭЭС высокого напряжения, где появляются криогенные преобразователи, позволяющие в миллисекундном временном диапазоне ограничить токи КЗ, в первую очередь на атомных и гидроаккумулирующих станциях, так как токи повреждения в их генераторных цепях могут достигать 100—200 кА.

Контролируемые параметры	Алгоритм функционирования ПРЗ	$t_{с,з}$ , мс	$K_{рч}$	$K_{гапп}$
$i_1$	$i_1 > I_{уст}$	5–10	1	1
$i_1'$	$i_1' > I_{уст}$	0,4–5	1,8–10	2
$i_1', i_1''$	$\sup(i_1', i_1'') > I_{уст}$	0,4	7,5–10	3
$i_1', i_1''$	$\Sigma(i_1', i_1'') > I_{уст}$	0,4	9–10	3
$i_1, i_{1\text{мод}}$	$\Delta i_1 / \Delta i_{1\text{мод}} > 1$	0,4–2,5	2,5–10	6
$i_1, i_{1\text{мод}}$	$t_{и}$ $\int_0^{t_{и}} [(i_1 - i_{1\text{нач}}) - (i_{1\text{мод}} - i_{1\text{мод,нач}})] dt > I_{уст}$	0,4	10	10

Для сравнения используем значения относительной чувствительности ПРЗ

$$K_{рч} = K_{ч,ПРЗ} / K_{ч,отс}$$

Коэффициент аппаратной сложности также используем относительный, принимая за базу аппаратную сложность токовой отсечки, для которой  $K_{гапп} = 1$ .

