



Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Электроснабжение»

ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

**Курс лекций
для студентов специальности 1-43 01 03
«Электроснабжение»
дневной и заочной форм обучения**

Гомель 2006

УДК 621.311.031:621.38(075.8)
ББК 31.29-5я73
Э45

*Рекомендовано к изданию научно-методическим советом
энергетического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 6 от 30.05.2006 г.)*

Автор-составитель: *В. В. Курганов*

Рецензент: канд. техн. наук, доц. каф. «Электроснабжение»
ГГТУ им. П. О. Сухого *А. Н. Бохан*

Э45

Электронные устройства систем электроснабжения : курс лекций для студентов специальности 1-43 01 03 «Электроснабжение» днев. и заоч. форм обучения / авт.-сост. В. В. Курганов. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2006. – 84 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Мб RAM ; свободное место на HDD 16 Мб ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://gstu.local/lib>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 985-420-466-9.

Рассмотрены принципы построения, схемы и характеристики основных автоматических устройств систем электроснабжения, серийно выпускаемых промышленностью.

Для студентов специальности 1-43 01 03 «Электроснабжение», а также инженерно-технических работников, занимающихся наладкой и обслуживанием устройств релейной защиты и автоматики.

УДК 621.311.031:621.38(075.8)
ББК 31.29-5я73

ISBN 985-420-466-9

© Курганов В. В., составление, 2006
© Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого», 2006

ВВЕДЕНИЕ

Полное название курса – «Электронные устройства релейной защиты, противоаварийной и режимной автоматики систем электроснабжения».

Данная дисциплина впервые читается в нашем университете с 1994 года и обусловлена она производственной необходимостью, подсаннанной нашими выпускниками прошлых лет, инженерами-электриками, которые обращались к нам с просьбой организовать курсы повышения квалификации по изучению новых конкурентоспособных электронных автоматических устройств на микроэлектронной, а в последние годы и микропроцессорной элементной базе, широко внедряемых на электроэнергетических объектах промышленных предприятий и энергосистем. Достаточно сказать, что вновь строящиеся и реконструируемые объекты электроэнергетики вместо устаревших электромеханических систем полностью оборудуются релейной защитой и автоматикой, выполненной на базе электронных микросхем средней и большой степени интеграции.

Флагманы релестроения – Чебоксарский, Запорожский и Киевский электроаппаратурные заводы – прекратили выпуск физически и морально устаревших электромеханических реле и перешли на серийное производство отдельных реле и комплектной аппаратуры на аналоговых и цифровых интегральных микросхемах. Специалисты, умеющие эксплуатировать эту технику, очень ценятся на производстве.

Курс «Электронные устройства систем электроснабжения» базируется на следующих дисциплинах: «Релейная защита», «Системная автоматика», «Информационно-измерительная техника» и, конечно, «Промышленная электроника». Охватить полный перечень выпускаемых электронных автоматических устройств для электроэнергетики за отведенные на данный курс часы не удастся, да это и не нужно, поскольку ряд устройств студенты будут изучать в таких дисциплинах, как «Электропривод», «Микропроцессорная техника», «Электрическое освещение» и других. В параллельном курсе «Релейная защита и автоматика» рассматриваются общие вопросы построения релейной защиты и автоматики в основном на примере электромеханических систем, а также принципы расчета и выбора уставок релейной защиты. Основной задачей данного курса является изучение принципов выполнения отдельных узлов электронных автоматических устройств и анализ их характеристик в сравнении с электромеханическими аналогами. Знание принципов работы отдельных типовых функциональных узлов позволяет развить навыки у студентов к чтению сложных принципиальных электрических схем электронных устройств любого назначения.

1. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА АВТОМАТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Производство и распределение электроэнергии имеют такие особенности, как неразрывность производства и потребления во времени при передаче больших потоков энергии на значительные расстояния, с одной стороны, и практически мгновенное распространение электромагнитных и электромеханических возмущений, с другой. В таких условиях надлежащие качества и надежность электроснабжения при ограниченных затратах могут быть обеспечены только при широком применении комплекса автоматических устройств, среди которых первостепенное значение имеет устройство релейной защиты и противоаварийной автоматики (РЗА).

Устройство РЗА предназначено для быстрой локализации поврежденного участка системы электроснабжения, автоматического восстановления напряжения на неповрежденных участках и предотвращения ненормальных режимов. Кроме этого, в системах электроснабжения широко применяются устройства автоматического регулирования, например, автоматическое регулирование возбуждения (АРВ) генераторов и синхронных электродвигателей, устройства регулирования коэффициента трансформации под нагрузкой (РПН), регулирование конденсаторных установок и др. В большинстве своем автоматические устройства, кроме АРВ, работают в релейном (дискретном) режиме: отключить–включить.

Период развития релейной защиты и автоматики с конца 19-го века по настоящее время включает в себя этап применения электромеханических систем, этап использования дискретных полупроводниковых элементов, этап внедрения устройств на микроэлектронной элементной базе и в последние годы этап применения микропроцессорных (цифровых) реле.

Нельзя разделить во времени отмеченные этапы. Можно говорить только о моментах их появления, так как и сейчас, и в ближайшем будущем будут эксплуатироваться как электромеханические и микроэлектронные реле, так и цифровые релейные терминалы. В настоящее время промышленностью прекращен серийный выпуск электромеханических реле, но поскольку в действующих автоматических устройствах систем электроснабжения их доля составляет более 80 %, то находиться в эксплуатации они будут еще долгое время. Постепенно на смену им приходят более современные электронные устройства.

Основные принципы построения релейной защиты и автоматики были разработаны в начале первого этапа и по настоящее время они почти не меняются, изменяется лишь элементная база – электромеханическая, микроэлектронная, микропроцессорная.

Впервые электромеханические токовые реле (сейчас типа РТ-40) появились в конце 19-го века, год рождения индукционного дискового реле тока (РТ-80) 1901. Более сложные защиты с реле направления мощности (РБМ) и реле сопротивления (КРС) появились в 20-х годах, дифференциальные реле (РНТ, ДЗТ) для защиты трансформаторов разработаны в 30-х годах.

Основными преимуществами электронных устройств защиты по сравнению с электромеханическими является более высокая их чувствительность и надежность, существенно меньшее потребление мощности от измерительных трансформаторов тока и напряжения, что уменьшает их погрешность, упрощается процесс изготовления наладки и обслуживания (нет необходимости в рутинной механической регулировке и чистки контактов), значительно меньшие объемно-массовые показатели, и что особенно важно – возможность получить такие параметры и характеристики срабатывания, которые недостижимы на базе электромеханических систем в силу аппаратной избыточности таких устройств.

К недостаткам электронных устройств следует отнести необходимость иметь надежный стабилизированный источник электропитания полупроводниковых элементов, обычно ± 15 В, а для микропроцессорных реле еще и высокие ценовые показатели, которые многократно превышают стоимость устройств на микроэлектронной элементной базе. Например, комплект цифровой защиты для одного присоединения 6(10) кВ стоит до 5000 USD.

Отличительной особенностью цифровых реле является возможность без аппаратной избыточности в одно реле заложить множество видов защиты и автоматики с различными характеристиками срабатывания. Например, в цифровом реле серии ALSTOM заложено 10 различных типов зависимых от тока характеристик срабатывания максимальной токовой защиты. Такая избыточность носит скорее рекламный характер, поскольку реально в эксплуатации их используется не более 4 типов. Дело в том, что микропроцессорные реле относятся к поколению полностью цифровых устройств, в которых применяется аналого-цифровое преобразование (АЦП) входных величин тока или напряжения, а обработка полученных цифровых величин ве-

дется по программе исключительно с помощью математического аппарата, возможности которого безграничны. Поэтому и нет проблем заложить в одно реле большое число функций защиты и автоматики. При выборе микроэлектронных или цифровых реле следует исходить из экономической целесообразности. К примеру, для защиты радиальной линии 6(10) кВ по ПУЭ рекомендуется применять токовую отсечку и максимальную токовую защиту, в состав которых входят простые токовые реле с жесткой неизменяемой логикой управления. В этих условиях применять цифровое реле (ЦР) по экономическим соображениям нецелесообразно, поскольку в эксплуатации не возникает надобность в перестройке одного вида защит в другой.

Цифровые защиты в настоящее время рекомендуется применять на крупных подстанциях и электростанциях с большим количеством присоединений, где в полной мере можно использовать возможности цифрового терминала (логическая защита шин, УРОВ, АЧР, АПВ, АВР), а дополнительные функции ЦР, такие как связь с компьютером, измерения, технический учет электроэнергии, управление, осциллографирование аварийных процессов и самодиагностика, позволяют использовать их в качестве окончательных устройств сбора информации в АСУ ТП энергетического объекта. В таких условиях затраты при внедрении цифровых реле быстро окупаются.

Таким образом, микроэлектронные устройства защиты и автоматики еще долго будут иметь свою нишу применения, особенно при замене физически и морально устаревших электромеханических систем. В этой связи принципы построения РЗА и современную электронную базу в основном целесообразно изучать именно на таких устройствах, поскольку фирмой-производителем цифровое реле обычно представляется потребителю как некий «черный ящик», в котором программный продукт недоступен пользователю, а при вынужденных в эксплуатации внесениях даже незначительных изменений в логику управления объектом необходимо вызывать представителя фирмы для перепрограммирования.

В настоящее время серийные автоматические устройства, выполненные на основе микроэлектроники (интегральных микросхем средней степени интеграции) изготавливают двух видов.

Один вид – это аппараты, представляющие собой отдельные органы измерительной или логической части защиты. По аналогии с электромагнитными реле за такими органами сохранено название реле защиты или автоматики иногда с добавлением слова «статиче-

ское». В интегральном исполнении выпускаются различные статические реле: тока (РСТ), напряжения (РСН), направления мощности (РМ), сопротивления (БРЭ), а также времени (РВ), автоматического повторного включения (РПВ), синхронизации (РСФ) и др. Такие реле выпускаются в стандартных корпусах типа «Сура» с цоколем, полностью совпадающем с цоколем аналогичных электромеханических реле для их быстрой замены.

Другим видом серийных изделий является комплектная аппаратура, представляющая собой набор устройств релейной защиты и автоматики целого присоединения, собранных в кассеты, которые монтируются на панелях или в шкафах заводского производства.

Для распределительных устройств (6–10) кВ выпускаются комплектные электронные защиты типа ЯРЭ-2201, для 35 кВ – типа ШДЭ-2701, для 110–330 кВ – ШДЭ-2801(2), для 500–750 кВ – ПДЭ-2001.

2. ВЛИЯНИЕ ПОМЕХ НА ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА И ТИПОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ НА ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТЬ

Электронные автоматические устройства размещаются на электрических станциях, подстанциях, распределительных пультах в непосредственной близости от измерительных трансформаторов, коммутационных аппаратов (выключателей, контакторов, электромагнитных реле и т. д.) и работают в условиях интенсивных помех, вызванных грозовыми и внутренними перенапряжениями в электроустановках. Электрическая связь между электронным устройством и его источником питания, а также входными и выходными цепями устройства осуществляется, как правило, контрольными кабелями длиной до нескольких десятков метров и размещенных в общих кабельных каналах подстанции. Кратковременные импульсные волны перенапряжений, возникающие в силовых цепях подстанции, легко проникают через распределенную междукабельную емкость в электронное устройство и воздействуют на его изоляцию и полупроводниковые приборы. Транзисторы и интегральные микросхемы, обладая высокой чувствительностью и быстродействием, подвержены влиянию импульсными помехами длительностью от долей до нескольких десятков микросекунд. Они могут привести не только к отказу или ложному срабатыванию устройства, но и к выходу из строя отдельных полупроводниковых элементов. В устройствах автоматики, выполненных

на электромеханической элементной базе таких проблем не существует.

Источниками импульсных помех являются грозовые и коммутационные перенапряжения на подстанции. Грозовые перенапряжения появляются от набегающих волн перенапряжений при ударе молнии в воздушные линии электропередачи. Они ограничиваются вентильными разрядниками и ОПН до амплитуды не опасной для изоляции электрооборудования подстанции, но представляющих опасность для электронных устройств.

Коммутационные перенапряжения характеризуются высокочастотными импульсами и возникают они на подстанции при замыкании или размыкании электрической цепи, обладающей индуктивностью и емкостью.

Например, при отключении катушки промежуточного реле или электромагнита контактора на время расхождения отключающего контакта происходит многократный пробой его воздушного промежутка и в цепях оперативного тока возникают перенапряжения с амплитудой до 2,5 кВ и частотой от 10 кГц до 3 МГц.

На рис. 2.1 изображена схема отключения провода емкостью C , питающего катушку реле с индуктивностью L , и диаграмма перенапряжений.

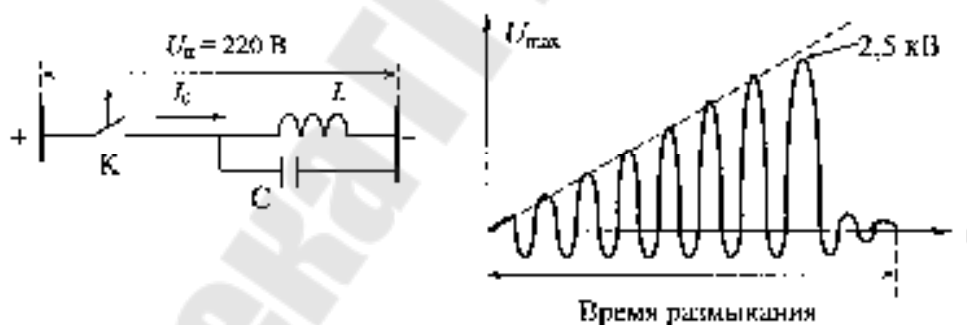


Рис. 2.1. Коммутационное перенапряжение при отключении индуктивности

При внезапном обрыве (срезе) тока I_0 в контуре цепи LC возникают высокочастотные колебания напряжения с частотой:

$$\omega = 1/\sqrt{LC}$$

и амплитудой:

$$U_{\max} = \sqrt{U_{\Pi}^2 + (I_0 \sqrt{L/C})^2} .$$

Это напряжение прикладывается к расходящимся контактам К и пробивает их воздушный промежуток. В результате происходит повторное зажигание дуги, которая быстро гаснет и процесс периодически повторяется, пока возрастающая электрическая прочность расходящихся контактов не превысит коммутационные перенапряжения U_{\max} . Чем меньше емкость C , тем больше амплитуда перенапряжений.

Высокочастотные коммутационные перенапряжения проникают через междукабельную емкость в параллельно проложенные контрольные кабели и попадают внутрь электронных устройств.

Такой же проникающей способностью обладает и грозовое перенапряжение, импульс которого характеризуется длительностью около 50 мкс, фронтом волны 1,2 мкс и амплитудой до 5 кВ. Грозовые перенапряжения могут также попадать в ЭУ через емкость изоляции измерительных трансформаторов тока и напряжения.

Для уменьшения влияния импульсных помех при проектировании электронного устройства применяют следующие меры:

1. Все входные и выходные цепи устройства гальванически разделяют с помощью промежуточных трансформаторов, малогабаритных электромеханических реле или оптронов. Особую трудность представляет гальваническая развязка устройства с источником постоянного оперативного тока подстанции.

2. В промежуточных трансформаторах снижают межобмоточную емкость, по которой возможно попадание импульсных помех внутрь устройства. С этой целью секционируют вторичную обмотку или помещают между первичной и вторичной обмотками электростатический экран в виде медной фольги или намотки одного слоя тонкого провода, которые соединяются с землей.

3. Входные цепи устройства шунтируют варисторами и безиндуктивными конденсаторами.

4. Во входных преобразовательных устройствах применяют интегрирующие цепи, частотные фильтры, логические элементы высокопороговой серии К511 и т. д. с целью искусственного снижения быстродействия функциональных элементов устройства, то есть принимают компромиссное решение между быстродействием и помехоустойчивостью.

Серийно выпускаемые электронные изделия должны подвергаться испытаниям на помехозащищенность в соответствии со стандартом ИЕС международной электротехнической комиссии (МЭК), полный перечень которых следующий:

1. По изоляции (IEC 255-5): прочность изоляции 2 кВ, 50 Гц, 1 мин; импульсная прочность 5 кВ, 1,2/50 мкс.

2. По устойчивости к внешним возмущающим воздействиям (IEC 255-22-1):

2.1. Высокочастотное воздействие 2,5 кВ при продольной помехе и 1 кВ при поперечной.

2.2. Электростатический разряд 6 кВ от емкости 150 пФ при контактном воздействии и 8 кВ при разряде через воздушный промежуток.

2.3. По устойчивости к воздействию переменного магнитного поля напряженностью 10 В/м при частоте 150–1000 МГц (IEC 801-3).

2.4. Устойчивость к быстрому переходному процессу по (IEC 801-4).

2.5. Устойчивость к искровому разряду по стандарту КЕМА.

2.6. Устойчивость к воздействию постоянного магнитного поля до 400 А/м.

Электронные автоматические устройства, работающие на электроподстанциях в обязательном порядке еще на стадии ОКР в специальных лабораториях, должны пройти сертификационные испытания на помехозащищенность. При этом изделие подвергается испытаниям с помощью импульсного генератора, работающего в двух режимах:

1) вырабатывает с интервалом 5–10 с три одиночных импульса стандартной формы 1,2/50 мкс и амплитудой 5 кВ, причем 3 импульса положительной полярности и 3 отрицательной (трехударный метод испытаний);

2) вырабатывает в течение 2 с высокочастотные импульсы (1 МГц) затухающих колебаний с периодом их следования 2,5 мс и амплитудой 2,5 кВ или 1 кВ в зависимости от типа испытаний.

Применяются два типа испытаний: по продольной схеме (импульсы подаются между цепями устройства и корпусом, а также между независимыми цепями устройства) и поперечной схеме испытаний (между входами каждой цепи). По продольной схеме испытаний амплитуда высокочастотных импульсов равна 2,5 кВ, а при поперечной – 1 кВ.

Испытания электронных устройств релейного действия проводятся при одновременной подаче напряжения питания оперативного тока и воздействующих входных сигналов величиной 0,8 и 1,2 порога

срабатывания. При этом испытываемое устройство не должно ложно срабатывать или отказывать в срабатывании.

Не все проектируемые электронные устройства могут выдерживать такие испытания, поэтому их проводят независимые эксперты, без заключения которых не утверждается основной документ – ТУ (технические условия) на изделие. Ранее выпускаемые в 60-х годах электронные устройства на дискретных полупроводниковых элементах имели ограниченное применение в эксплуатации в силу низкой своей надежности и помехозащищенности.

Только в 80-х годах с появлением высококачественных интегральных микросхем и проведения исследований в области помех электронные устройства стали широко применяться в электроэнергетике.

3. СОСТАВ И НАЗНАЧЕНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ БЛОКОВ ЭЛЕКТРОННЫХ АВТОМАТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

Электронные устройства (ЭУ) релейной защиты и автоматики различного назначения имеют много общего, а их структурные схемы очень похожи и подобны представленной схеме на рис. 3.1.

Основными функциональными узлами ЭУ являются измерительный орган (ИО) и логическая часть устройства (ЛЧ). На ИО поступают информационные напряжения от входных преобразователей аналоговых сигналов ВПА1, ВПА2 и пороговое напряжение $U_{пор}$, соответствующее уставке защиты. Измерительный орган обрабатывает поступившую информацию, сравнивает ее с уставкой и выдает управляющее воздействие в логическую часть защиты. В ЛЧ кроме сигнала от ИО поступает информация от входных преобразователей дискретных сигналов ВПД1 и ВПД2. В соответствии с заложенным алгоритмом ЛЧ выполняет логические операции И, ИЛИ, НЕ, ВРЕМЯ, ПАМЯТЬ и выдает сигнал на выходной орган (ВО) электронного устройства. Последний управляет исполнительным механизмом, например, приводом выключателя. Электропитание активных полупроводниковых элементов ЭУ (транзисторов, микросхем) осуществляется блоком питания (БП).

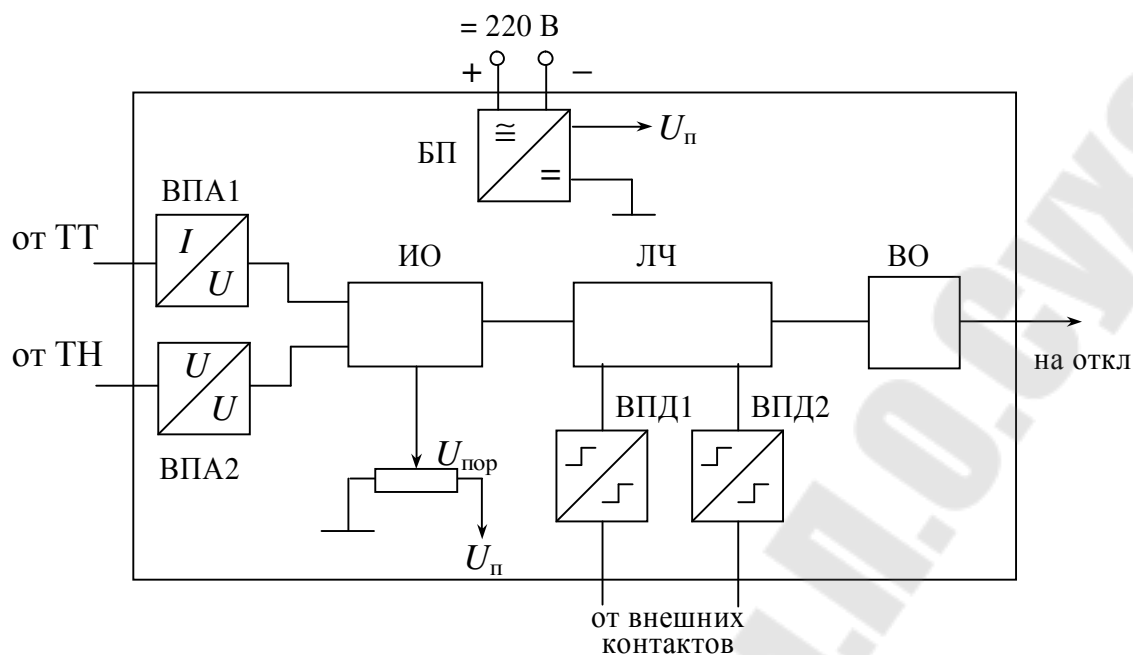


Рис. 3.1. Структурная схема электронного автоматического устройства

Приведенная структурная схема относится к обобщенному электронному устройству защиты и автоматики. Она более подходит для комплектных защит, состоящих из нескольких видов реле. Причем, в комплектных защитах может быть несколько измерительных органов (ИО) и большое число входных преобразователей ВПА и ВПД – до 7-ми ВПА и до 10 ВПД. В отдельных статических реле защиты, например, реле направления мощности, полностью отсутствуют преобразователи ВПД и логическая часть ЛЧ. Последняя собирается из отдельных промежуточных реле и реле времени.

3.1. Блоки питания

На подстанциях или распределительных пунктах для питания цепей защиты и автоматики применяют постоянный или переменный оперативный ток. Постоянный ток получают от аккумуляторной батареи напряжением ≈ 220 В, а переменный – от трансформатора собственных нужд подстанции ≈ 220 В. Кроме того, в качестве источника оперативного тока иногда используют измерительные трансформаторы тока. Задачей блока питания является преобразование относительно высокого напряжения 220 В в постоянное стабилизированное напряжение (обычно ± 15 В) для питания полупроводниковых элементов электронного устройства (ЭУ).

В отдельных статических реле защиты применяют упрощенные блоки питания, выполненные в виде делителя напряжения с параметрическим стабилизатором (рис. 3.2).

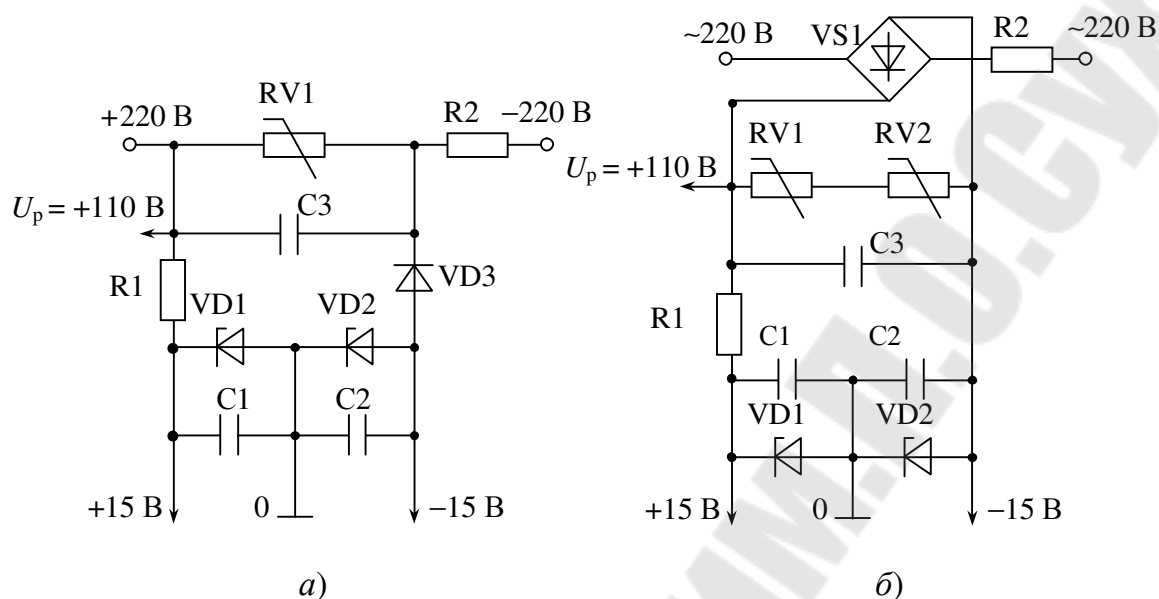


Рис. 3.2. Блоки питания статических реле: а) на постоянном оперативном токе; б) на переменном оперативном токе

Данные схемы обеспечивают получение стабилизированных разнополярных напряжений $U_n = \pm 15$ В для питания аналоговых микросхем с операционными усилителями и нестабилизированного напряжения $U_p = 110$ В для питания выходного реле. Схемы отличаются тем, что при переменном оперативном токе блок питания на входе имеет выпрямительный диодный мост VS1. Назначение элементов схем следующее:

RV – варистор типа СН1 (нелинейный резистор), обеспечивающий защиту электронных узлов от возможных перенапряжений;

R2, C3 – интегрирующая цепь для подавления низкочастотных составляющих напряжения оперативного тока;

C1, C2 – безиндуктивные конденсаторы емкостью по 0,15 мкФ для защиты от высокочастотных помех;

VD1, VD2 – стабилитроны типа КС515, обеспечивающие получение стабилизированных напряжений +15 В и – 15 В относительно нулевой шинке.

Балластные резисторы R1, R2 выбираются по возможности с равными сопротивлениями, во-первых, для деления на два напряжения оперативного тока с целью получения напряжения 110 В для питания выходного реле, во-вторых, при таком исполнении нулевая

шинка в нормальном состоянии изоляции сети оперативного тока оказывается под потенциалом, близким к нулю по отношению к земле. Величина сопротивления балластных резисторов выбирается таким, чтобы при изменении напряжения оперативного тока в диапазоне $(0,8-1,2)U_{\text{ном}}$ значение тока, проходящего через стабилитроны, не выходило за пределы допустимых величин от 1 до 53 мА. Следовательно, сопротивления балластных резисторов должны быть по величине равны $(3,1-3,6)$ кОм, а рассеиваемая ими мощность составляет не более 6 Вт. Поскольку балластные резисторы нагреваются, то их выносят за пределы корпуса реле и крепят с внешней стороны цоколя.

Недостатком блоков питания на основе параметрического стабилизатора является низкий КПД (не более 15 %) и наличие гальванической связи между электронными узлами реле и цепями оперативного тока.

В комплектных электронных устройствах защиты и автоматики с логической частью и несколькими измерительными органами требуется блок питания с номинальной мощностью от 15 до 180 Вт. В этом случае применяют импульсный блок питания, выполненный на базе высокочастотного инвертора. Упрощенная схема такого БП с двухтактным инвертором представлена на рис. 3.3.

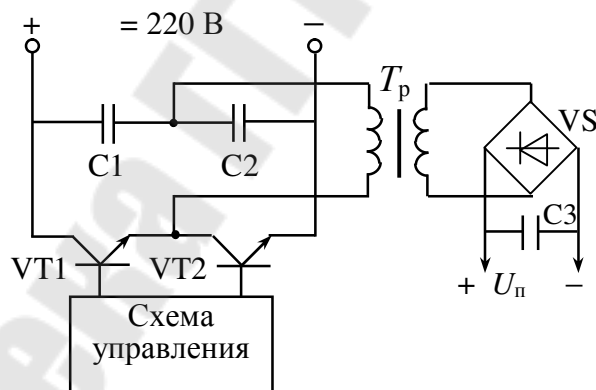


Рис. 3.3. Схема импульсного блока питания комплектных

Инвертор состоит из разделительного трансформатора T_p и коммутатора, собранного по полумостовой схеме с конденсаторами C_1 , C_2 и транзисторными ключами VT_1 , VT_2 . Преобразование входного постоянного напряжения в переменное высокой частоты (до 30 кГц) производится путем периодического подключения первичной обмотки трансформатора к источнику оперативного тока через конденсаторы и ключи вначале с одной, а затем с противоположной полярностью. Трансформатор, работающий на высокой частоте, получа-

ется небольших габаритов, с малым числом витков в обмотках, но с относительно большой проходной мощностью. Использование широтно-импульсной модуляции при управлении транзисторными ключами позволяет поддерживать стабильным выходное напряжение $U_{\text{п}}$ при изменении питающего напряжения от 90 до 240 В. Емкости накопительных конденсаторов $C1$, $C2$ выбирают из соображения сглаживания пульсаций выходного напряжения в случае питания инвертора от переменного оперативного тока через диодный мост.

Импульсный блок питания обеспечивает гальваническую развязку электронных узлов за счет использования разделительного трансформатора и КПД его составляет 85 %.

На подстанциях без аккумуляторных батарей применение в качестве источника оперативного тока трансформатора собственных нужд явно недостаточно, поскольку при близких коротких замыканиях переменное напряжение оперативного тока пропадает и релейная защита оказывается без питания. В этих случаях применяют блоки питания, источниками тока которых являются измерительные трансформаторы тока подстанции. Схема и времяимпульсная диаграмма блока питания на основе преобразователя тока в постоянное напряжение приведена на рис. 3.4.

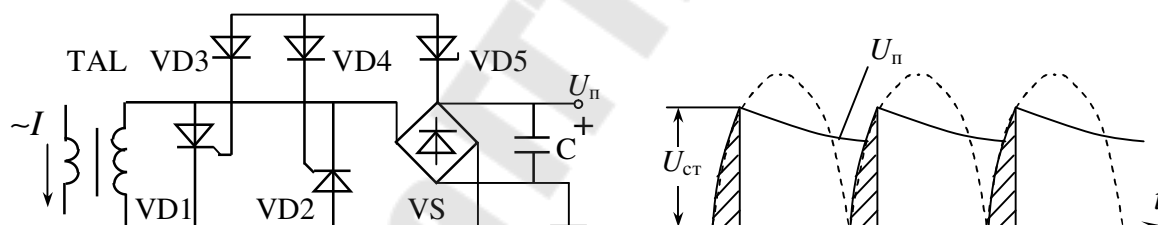


Рис. 3.4. Блок питания на основе преобразователя тока

При прохождении тока через промежуточный трансформатор тока TAL , на его вторичной обмотке выделяется ЭДС, которая выпрямляется диодным мостом VS , сглаживается конденсатором C и подается в схему ЭУ. При коротких замыканиях резко возрастает ток и пробивается стабилитрон $VD5$, через который подается сигнал на управляющие электроды тиристоров $VD1$ и $VD2$. Последние поочередно открываются в положительные полупериоды и шунтируют (замыкают накоротко) вторичную обмотку промежуточного трансформатора тока. В паузы между шунтированием обмотки напряжение $U_{\text{п}}$ поддерживается конденсатором C . Таким образом ограничивается напряжение $U_{\text{п}}$ до уровня не превышающего напряжения пробоя стабилитрона $U_{\text{ст}}$.

Заштрихованная область на рис. 3.4 показывает закрытое состояние тиристора.

Блоки питания на основе преобразователей тока и напряжения либо выпускаются отдельно для питания комплектных защит, либо встраиваются непосредственно в реле (см. Приложение, рис. П. 4.1).

3.2. Выходные релейные органы

Воздействие электронного устройства на объект защиты традиционно осуществляется в виде дискретных сигналов управления. При этом выходные цепи ЭУ выполняют так, чтобы обеспечить гальваническую развязку коммутируемых цепей как между собой, так и относительно внутренних цепей устройства. Выходные органы должны обладать соответствующей коммутационной способностью и, в общем случае, обеспечивать видимый разрыв коммутируемой цепи.

Несмотря на очевидные достижения электроники в области коммутации высоких потенциалов и сильных токов в электронных реле в большинстве случаев по-прежнему используют промежуточные электромагнитные реле. Контактная пара пока еще остается вне конкуренции как единственное устройство, обеспечивающее видимый разрыв в коммутируемой цепи. К тому же это и самое дешевое решение. Исключение составляют защиты линий сверхвысоких напряжений, когда требуется при коротких замыканиях воздействовать на катушку отключения выключателя за время не более 20 мс. В этом случае применяют тиристорный ключ.

Как правило, в электронных устройствах защиты и автоматики применяются малогабаритные промежуточные реле типа РП13 с номинальным напряжением катушки 110 В постоянного тока. Выходные контакты этого реле способны коммутировать ток до 20 А при включении выключателя и до 1 А при отключении. В цепях сигнализации иногда применяют герконовые реле (герметизированные магнитоуправляемые контакты) типа РПГ-5.

Согласующим элементом между слаботочными электронными узлами и катушкой реле служит транзисторный ключ VT. Схема выходного органа ЭУ приведена на рис. 3.5. Если на вход выходного органа от ЛЧ подается напряжение более 8 В (логическая единица), то транзистор VT открывается и реле KL срабатывает. При логическом нуле на входе ВО, транзистор запирается и реле отпадает. Диод VD1 служит для защиты транзистора от сверх ЭДС, которое возникает при срезе тока в катушке индуктивности реле.

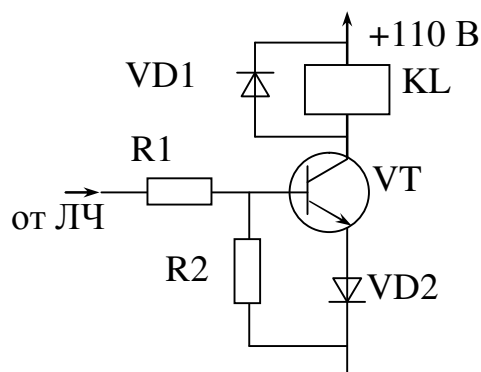


Рис. 3.5

Диод VD2 и резистор R2 предназначены для удержания потенциала базы транзистора на уровне нулевой шинки в закрытом состоянии транзистора, тогда как потенциал эмиттера будет выше нуля за счет падения напряжения на диоде VD2 от протекающего по нему тока $I_{к.о}$ (обратный ток коллекторного перехода), величина которого зависит от температуры. Резистор R1 служит для ограничения тока базы транзистора и надежного отпирания. Значение его для транзистора типа КТ940 не должно выходить за пределы $1K \leq R_1 \leq 30K$.

Схема выходного органа может быть несколько измененной при подаче на его вход разнополярных напряжений от операционного усилителя измерительного органа ЭУ. Тогда диод VD2 исключают из цепи эмиттера и подключают его параллельно резистору R2 с полярностью, противоположной показанной на схеме. В этом случае диод защищает базу транзистора от отрицательного потенциала.

3.3. Входные преобразователи аналоговых и дискретных сигналов

Входные преобразователи аналоговых сигналов, называемые сокращенно датчиками, получают информацию от первичных измерительных трансформаторов тока или напряжения защищаемого присоединения, и преобразуют их в пропорциональные сигналы по уровню, приемлемые для дальнейшей обработки в измерительных органах электронных устройств.

Наиболее часто датчики выполняются на обычных электромагнитных промежуточных трансформаторах с ферромагнитным сердечником. Несмотря на их нелинейные передаточные характеристики при широком диапазоне входных сигналов, они все же приемлемы

для построения устройств защиты, допускающих работу с погрешностью не более 7 %.

Датчик тока представляет собой промежуточный малогабаритный трансформатор тока или трансреактор (трансформатор тока с воздушным зазором сердечника), а датчик напряжения – промежуточный трансформатор напряжения с регулируемым коэффициентом трансформации.

Принципиальные схемы датчиков тока и напряжения приведены на рис. 3.6.

Характерной особенностью для всех датчиков является применение электростатического экрана, устраняющего паразитную емкость между обмотками трансформатора, а также включение варистора RV во вторичную обмотку трансформатора. Эти меры предназначены для защиты от перенапряжений.

В датчиках тока на основе промежуточных трансформаторов тока TAL (рис. 3.6, а, б) преобразование величины входного тока в пропорциональное напряжение производится с помощью резистора R.

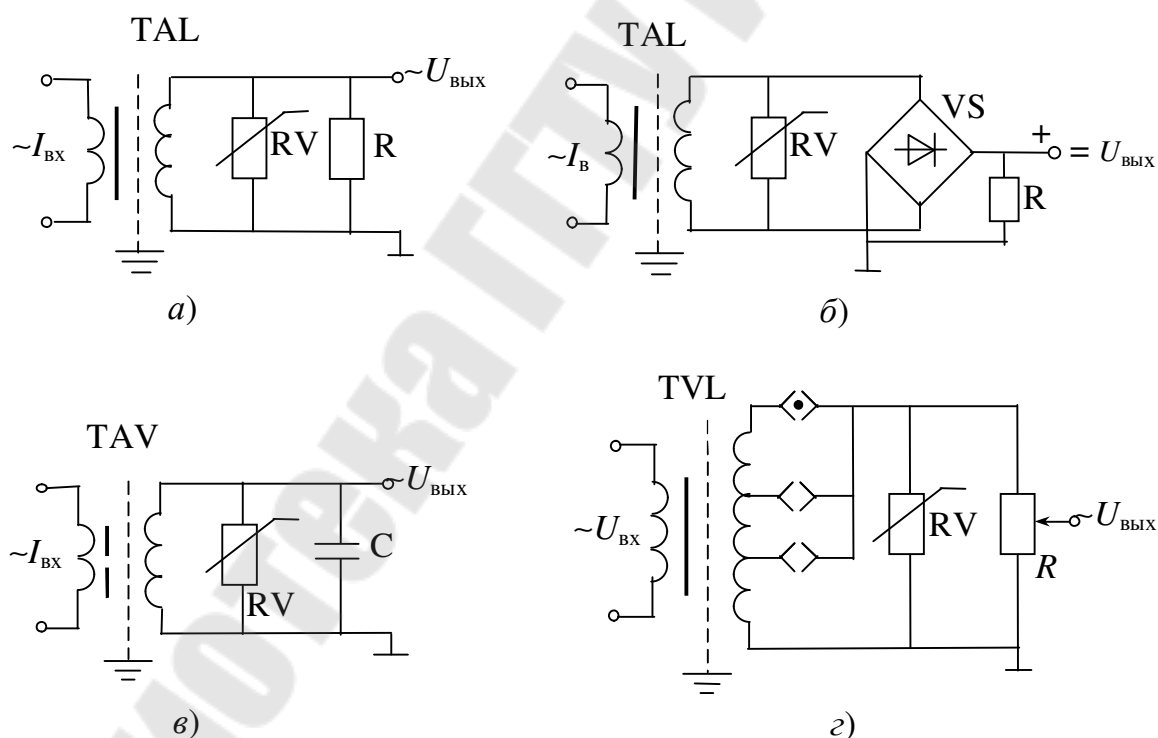


Рис.3.6. Схемы входных преобразователей аналоговых сигналов

На линейном участке характеристики намагничивания магнитопровода справедливо равенство:

$$U_{\text{ВЫХ}} = I_{\text{ВХ}} \cdot R / K_{\text{T}},$$

где K_{T} – коэффициент трансформации промежуточного трансформатора тока $K_{\text{T}} = W_1/W_2$, причем, чем меньше принято сопротивление R , тем большему значению тока соответствует линейный участок характеристики намагничивания трансформатора. В схеме датчика (рис. 3.6, б) на резисторе R выделяет выпрямленное постоянное напряжение $U_{\text{ВЫХ}}$ за счет применения диодного моста VS.

В датчике тока с трансреактором ТАВ (рис. 3.6, в) преобразование тока в напряжение близко к операции дифференцирования:

$$U_{\text{ВЫХ}} = z_{\mu} \cdot K_{\text{T}} \frac{di_{\text{ВХ}}}{dt},$$

где z_{μ} – магнитное сопротивление, зависящее от величины воздушного зазора в магнитопроводе.

В данном датчике вектор выходного напряжения опережает на 90° вектор тока. За счет дифференцирования трансреактор не пропускает аperiodическую составляющую входного тока, но зато усиливает составляющие высших гармоник, которые частично подавляются емкостью C .

Массогабаритные показатели трансреактора значительно выше трансформатора тока, поэтому трансреактор используется в сложных защитах. В цифровых реле датчик тока применяется исключительно по схеме (рис. 3.6, а).

Датчик напряжения TVL (см. рис. 3.6, г) представляет собой обычный малогабаритный трансформатор напряжения. Регулирование вторичного напряжения осуществляется отпайками (грубое) и резисторным делителем R (точное).

Входные преобразователи дискретных сигналов применяются с целью гальванической развязки цепей ЭУ от цепей оперативного тока подстанции. Входной дискретный сигнал используется как для разрешения, так и для блокирования работы электронного устройства. Задачей дискретных преобразователей, кроме гальванического разделения цепей, является преобразование логического (дискретного) сигнала, поступающего от контактов или переключателей исполни-

тельного механизма в логический сигнал с необходимым уровнем напряжения.

В отдельных реле или несложной комплектной аппаратуре на микроэлектронике в качестве дискретных преобразователей применяют герконы как повторители входного дискретного сигнала. Время срабатывания геркона около 2 мс. В сложных защитах и цифровых реле с большим количеством входных дискретных преобразователей применяют оптроны (светодиод-фотоприемник). Схема такого преобразователя приведена на рис. 3.7.

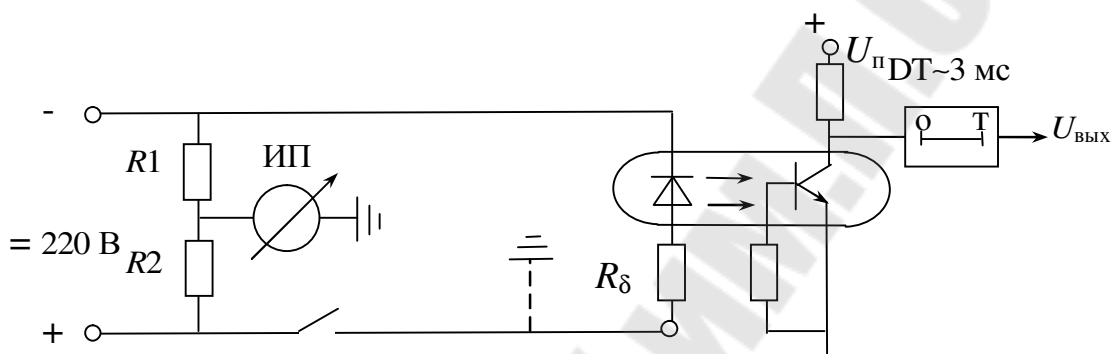


Рис. 3.7. Схема входного преобразователя дискретных сигналов на базе оптрона

Оптроны (оптопара) характеризуются высоким быстродействием в доли микросекунд и малым входным током. Малый ток оптрона, с одной стороны, является благом, так как приводит к снижению мощности, потребляемой преобразователем, решает проблему рассеивания тепла балластным резистором R_{δ} и уменьшает нагрузку на управляющий контакт K внешней цепи, но, с другой стороны, преобразователь на оптроне может ложно сработать при замыкании на землю линии связи оптрона с коммутируемым контактом, поскольку входной ток преобразователя соизмерим с током цепи контроля изоляции сети оперативного тока (измерительный прибор ИП в схеме). Для исключения этого порог переключения преобразователя устанавливают на уровне 60–70 % от номинального напряжения оперативного тока. Кроме того, с целью повышения помехозащищенности к высокочастотным помехам на выходе оптрона предусматривают выдержку времени срабатывания преобразователя на величину около 3 мс.

4. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Информационные сигналы, поступающие от датчиков тока или напряжения в измерительные органы электронных устройств, как правило, требуют предварительной обработки: частотную фильтрацию, сдвиг по фазе токов и напряжений, выделение наибольшей величины из фазных токов трехфазной сети или наименьшей величины из линейных напряжений, выделение симметричных составляющих и др. Эти функции выполняют информационные преобразовательские элементы, размещенные преимущественно во входных преобразователях аналоговых сигналов. В цифровых реле после входных преобразователей аналоговых сигналов применяют тракт аналого-цифрового преобразования мгновенных значений аналоговой величины в цифровую величину с шагом дискретизации около 1 мс. И далее вышеперечисленные функции выполняются программным способом.

Рассмотрим преобразовательные элементы, применяемые в аналоговых электронных устройствах.

4.1. Частотные фильтры

Информационный сигнал состоит из смеси полезного сигнала и помехи в виде апериодической и высокочастотной составляющих. Для выделения полезного сигнала применяют полосно-пропускающий фильтр. В некоторых случаях требуется подавление только высокочастотных составляющих, тогда применяют фильтр нижних частот. В токовых отсечках, действующих без выдержки времени, частотная фильтрация вообще не применяется, поскольку частотные фильтры всегда увеличивают инерционность реле.

В высокочувствительных защитах, действующих, как правило, с выдержкой времени, наибольшего распространения получил полосно-пропускающий фильтр, схема которого и амплитудно-частотная характеристика приведены на рис. 4.1.

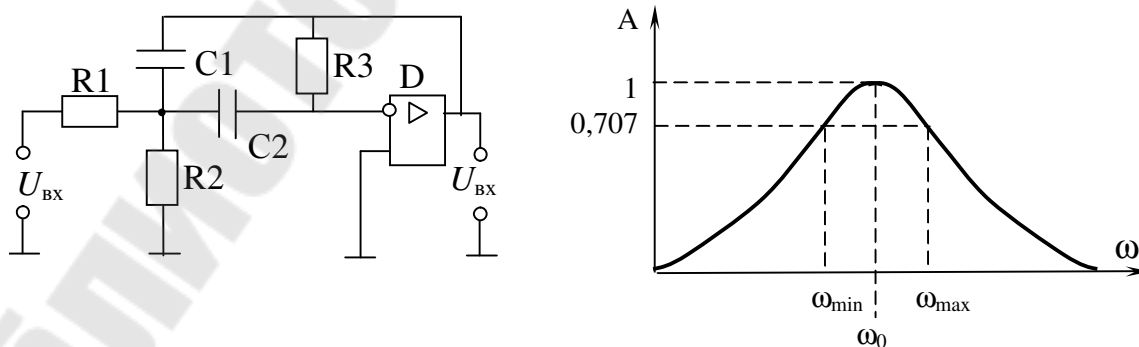


Рис. 4.1. Схема полосового фильтра второго порядка и амплитудно-частотная характеристика

Данный фильтр называется активным, т. к. основным элементом его является операционный усилитель ДА (питание ДА напряжением ± 15 В на схемах обычно не показывается). В отрицательную обратную связь ДА включены две цепочки: интегрирующая R1C1, подавляющая верхние частоты информационного сигнала и дифференцирующая C2R3 – нижние частоты. В результате фильтр пропускает с максимальным усилением резонансную частоту ω_0 в полосе частот от ω_{\min} до ω_{\max} . Значение ω_0 зависит от параметров элементов схемы и рассчитывается по выражению:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{R_3 \cdot C_1 \cdot C_2} \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)}.$$

Время затухания собственных переходных процессов (инерционность) фильтра определяется по формуле

$$t_{\text{пер}} \approx 6Q/\omega_0,$$

где $Q = \omega_0 / (\omega_{\max} - \omega_{\min})$ называется добротностью фильтра.

Чем выше добротность, т. е. уже полоса пропускания, тем больше инерционность фильтра. Например, время задержки пропускания полосового фильтра с добротностью $Q = 5$ будет составлять около 0,1 с, так как

$$t_{\text{пер}} = 6 \cdot 5 / 314 = 0,1 \text{ с.}$$

Для быстродействующих защит это достаточно много, поэтому принимают компромиссное решение: либо отказываются от частотного фильтра, либо применяют фильтр с низкой добротностью.

В сложных дистанционных защитах линий (комплекты ШДЭ-2802 и ПДЭ-2001) применяются полосно-пропускающие фильтры с двойным

T-образным мостом в цепи обратной связи ДА [3]. Преимущество такого фильтра в том, что его можно одновременно использовать как суммирующий усилитель нескольких информационных сигналов.

Схема фильтра нижних частот отличается от приведенной тем, что в ней заменены конденсаторы C1 и C2 на резисторы, а резисторы R2R3 – на конденсаторы. В этом случае фильтр превращается в двухзвенный интегрирующий усилитель. Такой фильтр применяют в дифференциальных реле (см. п. 5.3).

4.2. Макси- и мини-селекторы

Для защиты трехфазной электроустановки от токов КЗ необходимо контролировать токи в трех или, как минимум, в двух фазах. Для этого требуется 2 или 3 фазных датчика тока и такое же количество измерительных органов (ИО). Так выполняются защиты, состоящие из отдельных реле. В комплектной аппаратуре можно число ИО сократить до одного, применив макси-селектор, который будет выделять наибольшее значение фазного тока и подавать его на измерительный орган.

На рис. 4.2 изображена схема макси-селектора, выделяющего наибольший модуль из двух мгновенных значений фазных токов I_A и I_C .

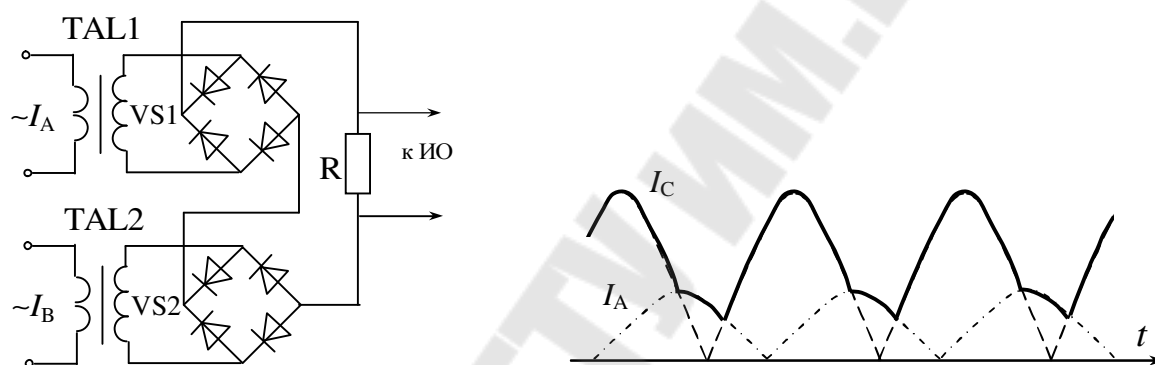


Рис. 4.2. Схема макси-селектора на два фазных тока

Выходы выпрямительных мостов включены последовательно. Через резистор R протекает вторичный ток датчика тока с наибольшим в данный момент мгновенным значением тока. Например, при коротком замыкании в сети между фазами BC наибольший ток будет выдавать датчик тока TAL2. Следовательно, напряжение на выходе выпрямительного моста VS2 будет тоже наибольшим. Это приведет к принудительному открытию всех диодов моста VS1 другой фазы. В результате происходит закорачивание вторичной обмотки датчика тока TAL1 и ее ток будет циркулировать только через диоды открытого моста VS1, не попадая во внешнюю цепь. Таким образом, на резисторе R будет выделяться напряжение, пропорциональное наибольшему в данный момент току.

Для выделения наибольшего значения из трех постоянных напряжений U_2 , U_1 , U_3 , применяется макси-селектор в виде логического элемента ИЛИ на диодах (рис. 4.3, а). Принцип действия его не нуждается в пояснениях.

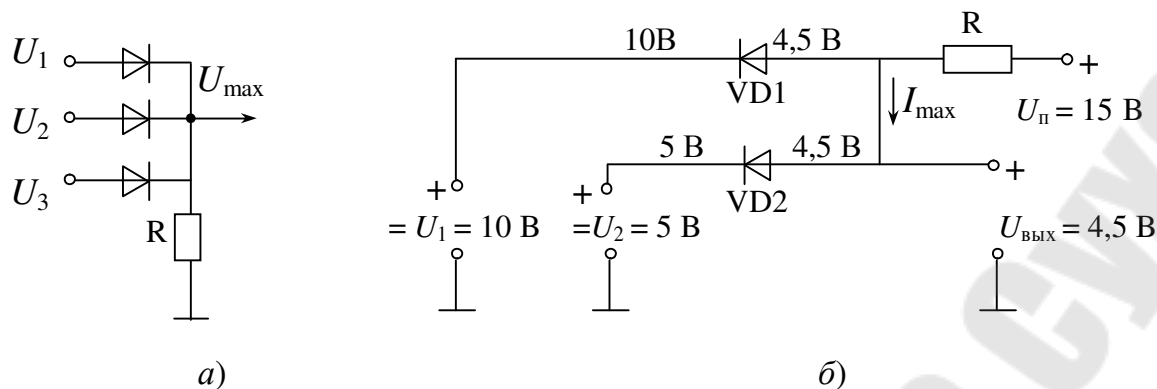


Рис. 4.3. Схемы диодных макси селектора *a)* и мини-селектора *б)*

Мини-селекторы (рис. 4.3, *б)*) применяют, когда требуется выделить наименьшее значение из нескольких сравниваемых постоянных напряжений, поступающих от датчиков напряжения. Такое устройство применяют, например, в пусковых органах минимального напряжения максимальной токовой защиты трансформатора или в реле сопротивления дистанционной защиты линии 6(10) кВ типа ДЗ-10. На рис. 4.3, *б)* показано на конкретном примере распределение напряжений по диодам мини-селектора. В данном случае, поскольку $U_2 < U_1$, то максимальный ток I_{\max} будет проходить через открытый диод VD2 и за счет падения напряжения на диоде $\Delta U = 0,5\text{ В}$ на его аноде установится напряжение равное 4,5 В, которое передается на анод диода VD1. В тоже время на катод диода VD1 поступает напряжение 10 В от U_1 и он будет заперт обратным напряжением. Таким образом, на выходе мини-селектора установится напряжение равное $(U_{\min} - \Delta U)\text{ В}$.

В обеих схемах (рис. 4.3) входные сравниваемые напряжения должны быть постоянными. Для этого необходимо информационные сигналы, поступающие от датчиков тока и напряжения, предварительно выпрямить и сгладить с помощью конденсаторов.

4.3. Фазоповоротные цепи

Измерительные органы электронных устройств с двумя подведенными величинами, как правило, требуют предварительного сдвига по фазе на заданный угол вектора одной величины относительно вектора другой. К таким устройствам относятся реле направления мощности, направленное реле сопротивления, фильтровые реле, а также все виды защит в цифровых реле.

В аналоговых реле фазосдвигающую функцию обычно выполняют с помощью простейших RC-цепей. Для получения отстающего вектора применяют пассивный интегратор по схеме (рис. 4.4, а), а для опережающего – пассивный дифференциатор по схеме (рис. 4.4, б).

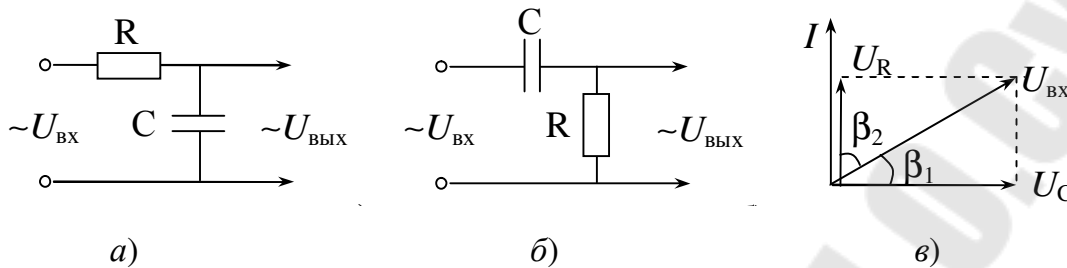


Рис. 4.4. Пассивные фазоповоротные цепи:

а) для отстающего вектора; б) для опережающего; в) векторная диаграмма

Векторная диаграмма (рис. 4.4, в) подходит для обеих схем. В схеме «а» выходное напряжение снимается с емкости C и, следовательно, $U_{\text{ВЫХ}} = U_C$, а в схеме «б» $U_{\text{ВЫХ}} = U_R$.

Передаточный коэффициент преобразования для схемы «а» вычисляется по формуле

$$\operatorname{tg}\beta_1 = \frac{U_R}{U_C} = \frac{IR}{I/\omega C} = \omega RC$$

Углы сдвига фаз относительно вектора $U_{\text{ВХ}}$ для схемы «а» $\beta_1 = \operatorname{arctg}(\omega RC)$, для схемы «б» $\beta_2 = \operatorname{arctg}(\omega RC) - \pi/2$;

Модуль выходного напряжения для схемы «а» $U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}} \cdot \cos\beta_1$, для схемы «б» $U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}} \cdot \sin\beta_1$. Таким образом, в первой схеме угол β_1 положительный, следовательно, вектор $U_{\text{ВЫХ}}$ отстает от вектора $U_{\text{ВХ}}$, а во второй схеме угол β_2 отрицательный – вектор $U_{\text{ВЫХ}}$ опережает вектор $U_{\text{ВХ}}$. Предельное значение угла сдвига фаз для пассивных фазоповоротных цепей не превышает 80° при промышленной частоте $\omega = 314$.

Расчет параметров схемы при заданном угле β производится следующим образом.

Например, при заданном угле $\beta_1 = 45^\circ$ передаточный коэффициент $\operatorname{tg}\beta_1 = 1$, следовательно, $RC = 1/\omega$ или $R = 1/\omega C$. Задаваясь значением емкости $C = 0,33$ мкФ, получим $R = 10^6 / (314 \cdot 0,33) = 9,6$ кОм.

Значение выходного напряжения составит $U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}} \cdot \cos 45^\circ = 0,707 U_{\text{ВХ}}$.

Если к входному напряжению $U_{вх}$ одновременно подключить обе схемы, то на выходе схемы «а» получим косинусную составляющую входного напряжения U_c , а на выходе схемы «б» – синусную составляющую U_s . Такой способ преобразования называется разложением входного напряжения на ортогональные составляющие. По мгновенным значениям ортогональных составляющих, измеренных в любой момент синусоидального входного напряжения, можно вычислить его амплитуду по формуле

$$U_{вх} = \sqrt{U_s^2 + U_c^2}.$$

Указанный способ вычисления амплитуды информационного сигнала применяется в цифровых реле.

Следует отметить, что при изменении частоты ω в небольших пределах, угол между ортогональными составляющими не изменяется? так как

$$\psi = \beta_1 - \beta_2 = \arctg(\omega RC) - \left[\arctg(\omega RC) - \frac{\pi}{2} \right] = \frac{\pi}{2} = 90^\circ.$$

Основные недостатки фазоповоротных схем на пассивных элементах следующие: низкая нагрузочная способность (приходится увеличивать C и уменьшать R , в результате возрастают потери), уменьшенное выходное напряжение и невозможность получить угол $\beta = 90^\circ$. Таких недостатков не имеют фазоповоротные схемы на активных элементах, в частности, на операционных усилителях (рис. 4.5).

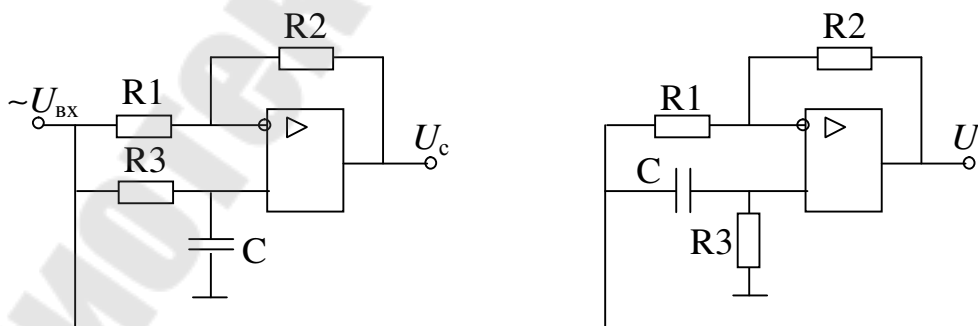


Рис. 4.5. Схема формирователя ортогональных составляющих на активных элементах

В данном формирователе операционные усилители включены по схеме вычитающих усилителей. Поскольку параметры элементов в

обоих усилителях одинаковы, то достигается равноволновая фазоразностная характеристика такого формирователя.

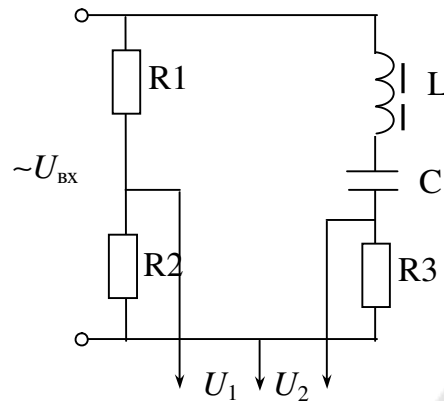


Рис. 4.6

Общей особенностью отдельных фазоповоротных схем является нелинейная зависимость угла сдвига фаз от частоты входного напряжения. В статическом реле понижение частоты типа РЧ-1 применяется линеализированный на начальном участке преобразователь изменений частоты в изменения фазы (рис. 4.6.). Данный преобразователь при изменении частоты входного напряжения в диапазоне от 40 до 52 Гц пропорционально изменяет угол сдвига фаз между векторами выходных напряжений U_1 и U_2 . Схема состоит из частотнозависимой цепочки L, C, R3 и частотннезависимой – делитель напряжения на резисторах R1 и R2.

Напряжение U_1 , снимаемое с делителя R1, R2, совпадает по фазе с входным напряжением U_{BX} . Напряжение U_2 может опережать или отставать от U_{BX} на угол φ , величина которого зависит от соотношения

$$\operatorname{tg}\varphi = \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) / R_3 .$$

Цепь LCR3 настраивается в резонанс токов на частоте 50 Гц, при этом индуктивное сопротивление X_L равно емкостному X_C и угол $\varphi = 0$. С понижением частоты X_L уменьшается, а X_C увеличивается, в результате угол φ становится отрицательным и вектор U_2 опережает вектор U_1 .

Параметры элементов схемы выбраны так, что при изменении частоты на 0,1 Гц угол φ изменяется на $0,4^\circ$. Далее две электрические величины U_1 и U_2 поступают на фазочувствительный измерительный орган реле (см. п. 6.1).

4.4. Фильтры симметричных составляющих

При несимметричных коротких замыканиях (КЗ) в трехфазной электрической сети появляются симметричные составляющие прямой, обратной и нулевой последовательностей в различных соотношениях в зависимости от вида КЗ и расстояния до места повреждения. Реле защиты, реагирующие на указанные составляющие, называются фильтрами. Такие реле имеют односистемное исполнение, так как фильтр из трех входных величин формирует одну электрическую величину, которая поступает на измерительный орган.

Фильтр тока нулевой последовательности имеет самое простое исполнение в виде суммирующего усилителя, но он применяется редко, так как такие фильтры собираются на первичных измерительных трансформаторах тока или напряжения, например, разомкнутый треугольник вторичной обмотки трансформатора НТМИ формирует $3U_0$. Особый интерес представляет фильтр напряжения обратной последовательности (ФНОП), который, при использовании на входе датчиков тока, превращается в фильтр токов обратной последовательности. Кроме того, если изменить фазировку подключения ФНОП, то он превращается в фильтр напряжения прямой последовательности.

В основе фильтрации напряжения обратной последовательности U_2 лежат известные соотношения, например:

$$U_2 = U_{AB} + U_{BC} \cdot e^{j60}; \quad (4.1)$$

$$U_2 = U_{AB} + U_{CA} \cdot e^{-j60}, \quad (4.2)$$

где U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} – междуфазные напряжения;

e^{j60} и e^{-j60} – операторы, показывающие поворот вектора напряжения на 60° в сторону отставания и опережения соответственно.

Можно написать аналогичные соотношения и для других междуфазных напряжений.

Рассмотрим векторные диаграммы напряжений, иллюстрирующие работу фильтра, реализованного по (4.1), при подаче на него симметричных составляющих обратной последовательности (рис. 4.7, а) и прямой последовательности (рис. 4.7, б). На диаграммах, повернутый на 60° в сторону отставания вектор $U_{BC} \cdot e^{j60}$, обозначен U'_{BC} .

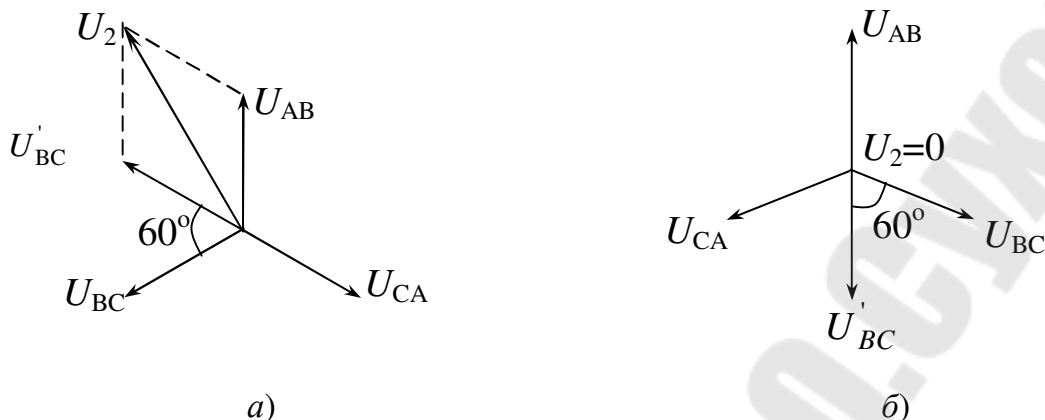


Рис. 4.7. Векторные диаграммы ФНОП:
а) при обратном; б) при прямом чередовании фаз

При обратной последовательности на выходе фильтра появляется напряжение $U_2 = \sqrt{3} \cdot U_{AB}$, а при прямой последовательности $U_2 = 0$.

Из выражения (4.1) следует, что для реализации ФНОП необходимо применить два функциональных элемента – фазоповоротную схему R2, C1 и суммирующий усилитель R3, R4, R5, DA (рис. 4.8).

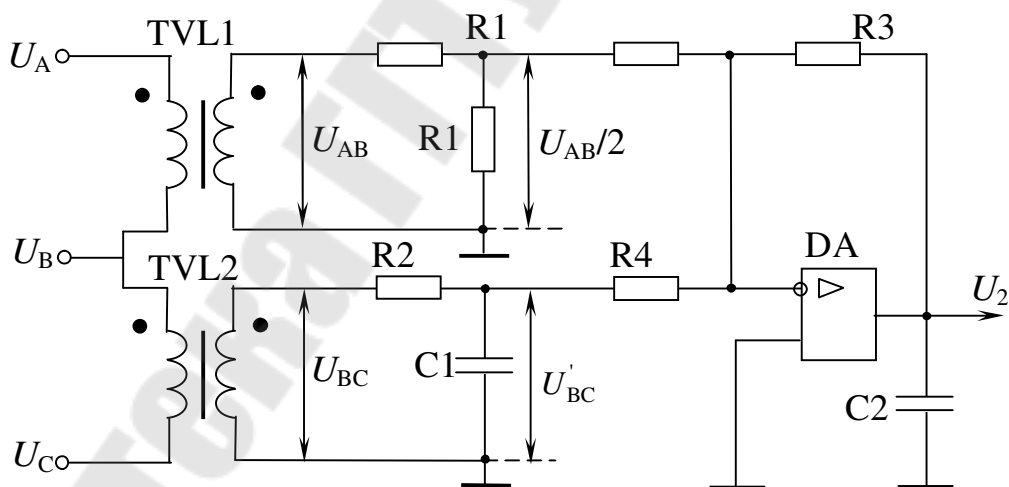


Рис. 4.8. Схема ФНОП на операционном усилителе

С выхода пассивного интегратора снимается напряжение сдвинутое по фазе на 60° и уменьшенное на величину $U'_{BC} = U_{BC} \cdot \cos 60^\circ = U_{BC} / 2$. Поэтому при выравнивании напряжений U'_{BC} и U_{AB} , последнее необходимо уменьшить в два раза. Для этого предназначен резистивный делитель R1.

Соотношение параметров схемы должно быть таково:

$$C_1 \cdot R_2 = \sqrt{3} / \omega; \quad R_3 = R_4 \geq 10 \cdot R_2; \quad R_5 = k \cdot R_3,$$

где k – заданный коэффициент усиления суммирующего усилителя.

Для реализации ФНОП по выражению (4.2) применяют пассивный дифференциатор. Для этого в схеме меняют местами R_2 и C_1 .

При наличии высших гармоник во входных напряжениях резко увеличивается небаланс на выходе фильтра. Для их частичного подавления включают конденсатор C_2 емкостью 0,1 мкФ. Следует отметить, что в серийном реле напряжения обратной последовательности типа РСН-13 применяют совмещенную схему сумматора и полосно-пропускающего частотного фильтра с двойным Т-образным мостом, который включается параллельно резистору R_5 (рис. 6.6).

5. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ С ОДНОЙ ПОДВЕДЕННОЙ ВЕЛИЧИНОЙ

На измерительный орган (ИО) электронного устройства поступает информация от преобразователей информационных сигналов или непосредственно от датчика тока (напряжения) в виде одной воздействующей электрической величины E_1 . Назначением ИО являются преобразование этой величины в удобную для измерения форму, сравнение с пороговой величиной $U_{\text{ср}}$ (заранее выставленной уставкой реле) и выдача управляющего воздействия либо на выходной орган реле, либо в логическую часть защиты. Величина $U_{\text{ср}}$ задается в эквиваленте действующему значению тока (напряжения) промышленной частоты. В быстродействующих защитах, например, токовой отсечки, величина E_1 , снимаемая с датчика тока, может содержать импульсную помеху, высокочастотные и апериодические составляющие. Возникает вопрос – сколько времени требуется наблюдать входной сигнал, чтобы принять правильное решение о срабатывании или несрабатывании. Очевидно, что минимальное время наблюдения должно быть не менее одного периода промышленной частоты, причем в обоих смежных полупериодах должно выполняться условие срабатывания $E_1 \geq U_{\text{ср}}$.

В небыстродействующих защитах, например, в защитах нулевой последовательности, имеющих полосовой частотный фильтр на входе, время наблюдения можно уменьшить до полупериода.

В токовых отсечках, срабатывающих при близких КЗ без выдержки времени, нельзя применять частотную фильтрацию. Это объясняется следующим.

Часто от шин 6 (10) кВ мощных подстанций с током КЗ, превышающим 10 кА, питается линия с маломощным потребителем на конце и, следовательно, с малыми номинальными токами измерительных трансформаторов тока (ТТ), например, 50/5 А. При близких КЗ происходит глубокое насыщение ТТ, так как через них проходит 200-кратный ток. В этих условиях погрешность ТТ превышает 50 %, а форма вторичного тока имеет явно несинусоидальный характер (рис. 5.1).

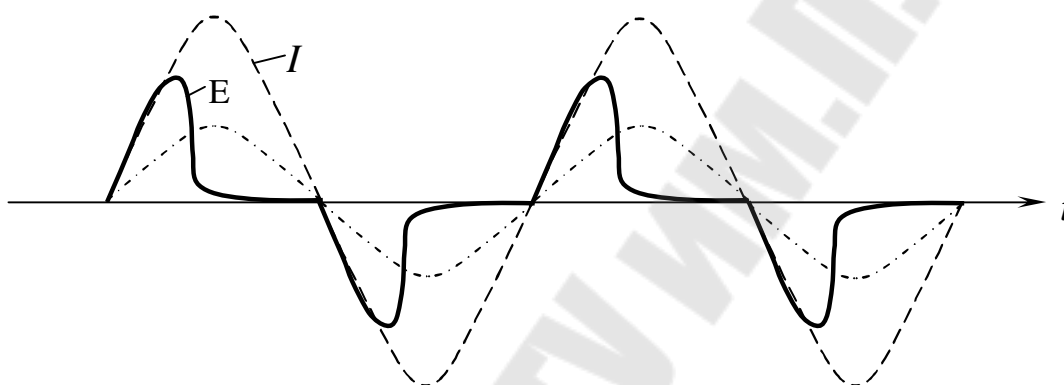


Рис. 5.1. Форма вторичного тока при глубоком насыщении трансформатора тока

В таких условиях выходное напряжение частотного фильтра будет заниженным и может оказаться меньше уставки реле. Поэтому измерительный орган простых токовых реле должен реагировать и на импульсную форму входной воздействующей величины при условии, что длительность импульса на пороге срабатывания реле составляет не менее $1/6$ полупериода, т. е. $t_{\text{и}} \geq 1,7$ мс.

Из большого числа принципов выполнения измерительных органов с одной подведенной величиной выделились два наиболее употребительных:

- сравнение выпрямленного и сглаженного напряжения с уставкой реле при помощи порогового элемента с петлей гистерезиса;
- сравнение времени превышения мгновенным напряжением пороговой величины с временем, когда мгновенное напряжение ниже пороговой (времяимпульсный способ сравнения).

5.1. Реализация простых измерительных органов релейного действия

Прежде чем рассматривать измерительные органы, необходимо пояснить принцип действия порогового элемента с петлей гистерезиса, который применяется в ИО релейного действия.

На рис. 5.2 изображены пороговые элементы на базе триггера Шмитта с операционным усилителем (ОУ).

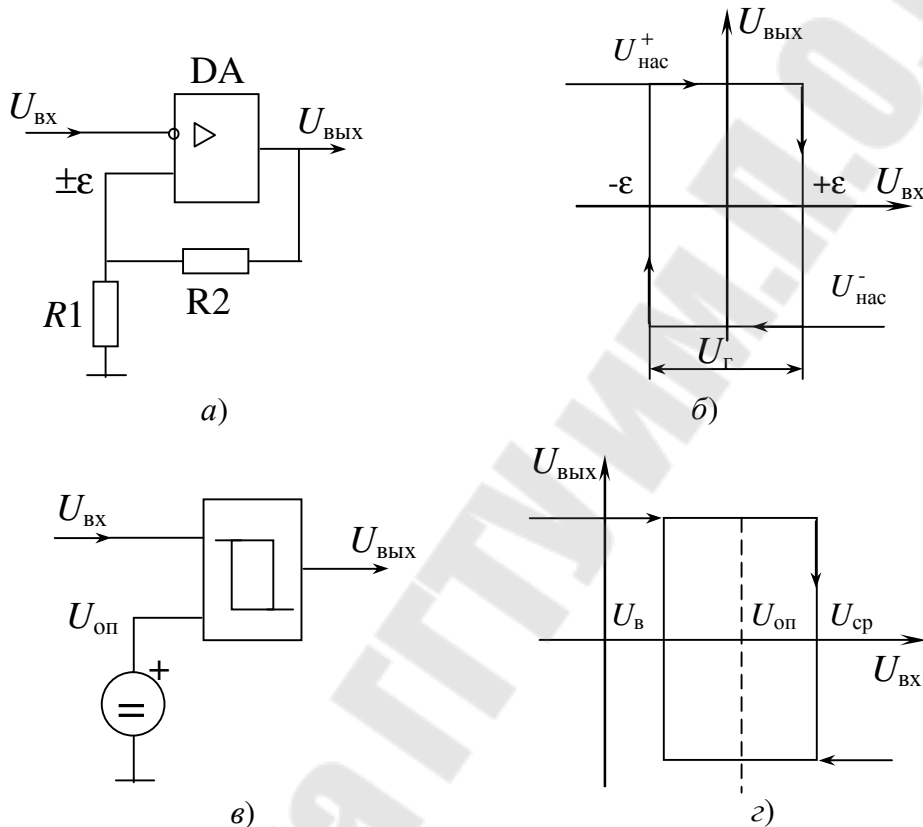


Рис. 5.2. Схемы и передаточные характеристики пороговых элементов с петлей гистерезиса

На рис. 5.2, а, б изображена схема типового триггера Шмитта (ТШ) и его передаточная характеристика.

Предположим на выходе ТШ установилось $U_{\text{нас}}^+$ максимальное положительное напряжение насыщения ОУ ($U_{\text{нас}} \approx 12 \text{ В}$), тогда по цепи положительной обратной связи через делитель R_1, R_2 на неинвертирующий вход ОУ подается напряжение величиной $+\epsilon = \beta U_{\text{нас}}^+$, где $\beta = R_1 / (R_1 + R_2)$ — коэффициент передачи положительной обратной связи. Для того, чтобы ТШ переключился в положение $U_{\text{нас}}^-$, необходимо на вход ОУ подать напряжение, превышающее $+\epsilon$ на несколько десятков милливольт ($U_{\text{ВХ}} \geq +\epsilon$). В этом случае на выходе

ОУ появиться напряжение $U_{\text{нас}}^-$, а на неинвертирующем его входе – напряжение $-\varepsilon = \beta U_{\text{нас}}^-$. Для возврата ТШ на вход ОУ необходимо подать напряжение $U_{\text{вх}} \leq -\varepsilon$. Таким образом, ТШ имеет разные уровни напряжений срабатывания и возврата $+\varepsilon$ и $-\varepsilon$, а ширина петли гистерезиса равна $U_{\text{г}} = 2|\varepsilon| = 2R_1 / (R_1 + R_2) |U_{\text{нас}}^-|$.

Триггер Шмитта графически изображается прямоугольником с петлей гистерезиса (см. рис. 5.2, в). Если подключить резистор R1 не к нулю, а к опорному напряжению $U_{\text{оп}}$ (рис. 5.2, в), то ТШ будет иметь заданные значения напряжений срабатывания и возврата (рис. 5.2, г). Значения напряжения срабатывания $U_{\text{ср}} = U_{\text{оп}} + \varepsilon$, а напряжение возврата $U_{\text{в}} = U_{\text{оп}} - \varepsilon$. Коэффициент возврата $K_{\text{в}} = U_{\text{в}} / U_{\text{ср}}$ для максимальных токовых реле должен находиться в пределах $0,8 \div 0,95$.

Основным достоинством ТШ является то, что у него отсутствует «дребезг» – неустойчивое состояние на границе срабатывания, что характерно для компараторов (устройства для сравнения двух напряжений). В схеме компаратора отсутствует обратная связь, т. е. нет резистора R2 ($R_2 = \infty$), следовательно, и нет петли гистерезиса ($U_{\text{г}} = 0$ и $U_{\text{ср}} = U_{\text{оп}}$).

Рассмотрим схему и диаграмму напряжений простого реле тока или напряжения с измерительным органом, построенным по 1-му способу (рис. 5.3).

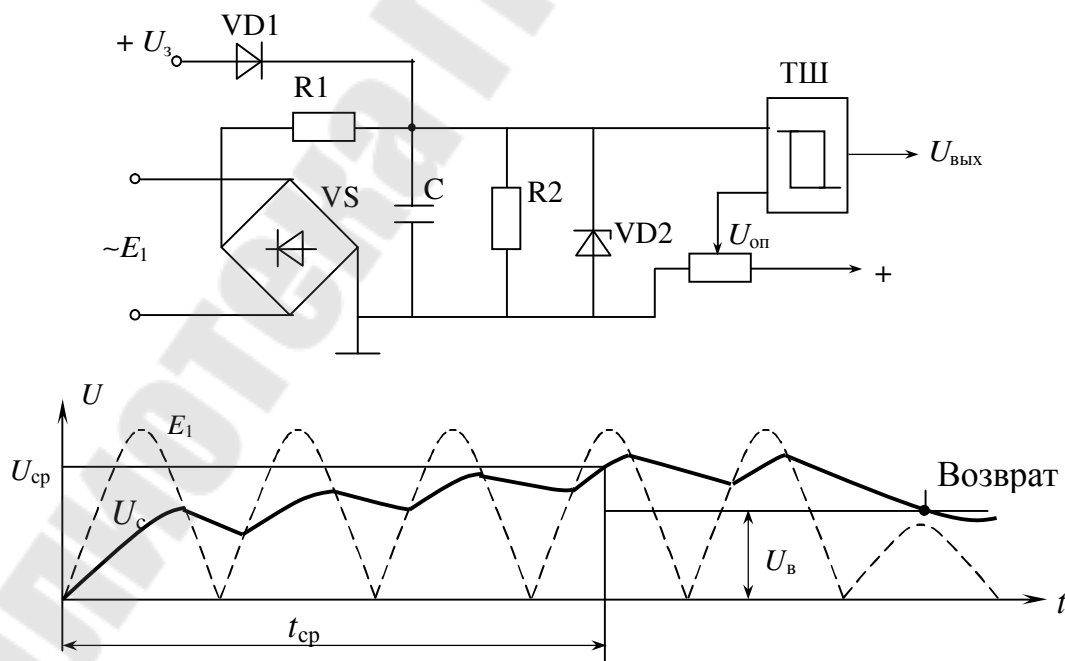


Рис. 5.3. Измерительный орган, реагирующий на выпрямленное и сглаженное напряжение и его диаграмма

Воздействующее на ИО напряжение E_1 (рис. 5.3) выпрямляется мостом VS, сглаживается Г-образным фильтром CR1 и подается на вход триггера Шмитта, имеющего уставки U_{cp} и U_B . При скачкообразном увеличении величины E_1 на емкости C напряжение U_c возрастает по экспоненциальному закону в цикле заряда с постоянной времени $\tau_z = CR_1$ и разряда – $\tau_p = CR_2$. Обычно принимают $\tau_z = \tau_p$, причем величина R_1 включает в себя внутреннее сопротивление входного преобразователя. При достижении напряжения U_c порога срабатывания ТШ, т. е. $U_c = U_{cp}$, последний переключается, выдавая разрешающий сигнал на срабатывание выходного органа реле. Для исключения дребезга ТШ на границе срабатывания, пульсания напряжения на конденсаторе ΔU_c не должна быть больше разности напряжений $\Delta U_c \leq U_{cp} - U_B$. Поскольку значение U_B связано с U_{cp} коэффициентом возврата ($K_B \geq 0,8$), то необходимо выбрать постоянную времени сглаживающего контура величиной не менее, чем на порядок превышающую период основной гармоники выпрямленного напряжения, т. е. $\tau \geq 10 \cdot 0,01 \geq 0,1$ с. Однако с увеличением τ возрастает время срабатывания реле, которое определяется по выражению:

$$t_{cp} = 0,5\tau \cdot \ln \frac{K}{K-1},$$

где $K = E_1/U_{cp}$ – кратность входной величины по отношению к уставке реле.

Основные недостатки ИО, реагирующего на выпрямленное и сглаженное напряжение – большое время срабатывания, низкий коэффициент возврата, возможность отказа при импульсной форме входной воздействующей величины (рис. 5.1).

Для уменьшения времени срабатывания ИО конденсатор C предварительно заряжают через диод VD1 от источника питания до напряжения $U_3 \approx 0,8 U_B$, а для уменьшения времени возврата ограничивают напряжение на конденсаторе на уровне $1,3U_{cp}$ при помощи стабилитрона VD2.

Данный ИО в силу своих недостатков в настоящее время редко используется. Он применялся в токовых реле устаревшей серии «Логика Т», причем триггер Шмитта собирался на дискретных полупроводниковых приборах (транзисторы, диоды и т. д.).

5.2. Унифицированный измерительный орган статических реле тока и напряжения

Данный ИО построен по 2-му времяимпульсному способу сравнения и применяется во всех современных аналоговых реле.

Входной сигнал E синусоидальной формы можно измерить по длительности импульса, соответствующему времени превышения его мгновенного значения опорной величины $U_{оп}$ (рис. 5.4).

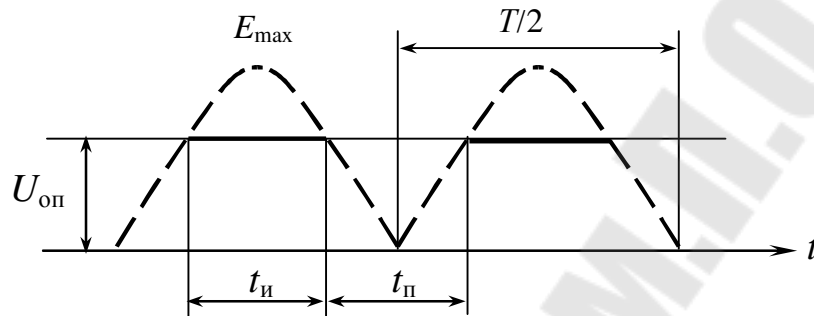


Рис. 5.4. Времяимпульсный способ измерения E

Время продолжительности импульса $t_{и}$ определяется по выражению:

$$t_{и} = \frac{2}{\omega} \arccos \frac{U_{оп}}{E_{max}}. \quad (5.1)$$

Данный способ измерения E имеет большую погрешность при возможных колебаниях частоты напряжения ω . Поэтому в ИО применяют способ измерения, основанный на сравнении длительности импульса $t_{и}$ с длительностью паузы $t_{п} = \frac{T}{2} - t_{и}$ и отношение $t_{и}/t_{п} \geq K_c$ является условием срабатывания ИО, где K_c – заданный коэффициент сравнения.

Если принять $K_c = 1$, то ИО будет реагировать на среднее значение входного сигнала и, следовательно, он будет отстроен от всех видов помех при условии выполнения данного неравенства, как минимум, в двух полупериодах. Однако в этом случае ИО будет медленно действующим и откажет в срабатывании при глубоком насыщении трансформаторов тока и искажении формы кривой воздействующего сигнала (рис. 5.1).

Исследованиями установлено, что значение K_c следует принять равным 0,25, что при частоте 50 Гц составит $t_{и} = 2$ мс и $t_{п} = 8$ мс.

На рис. 5.5 приведена схема унифицированного ИО.

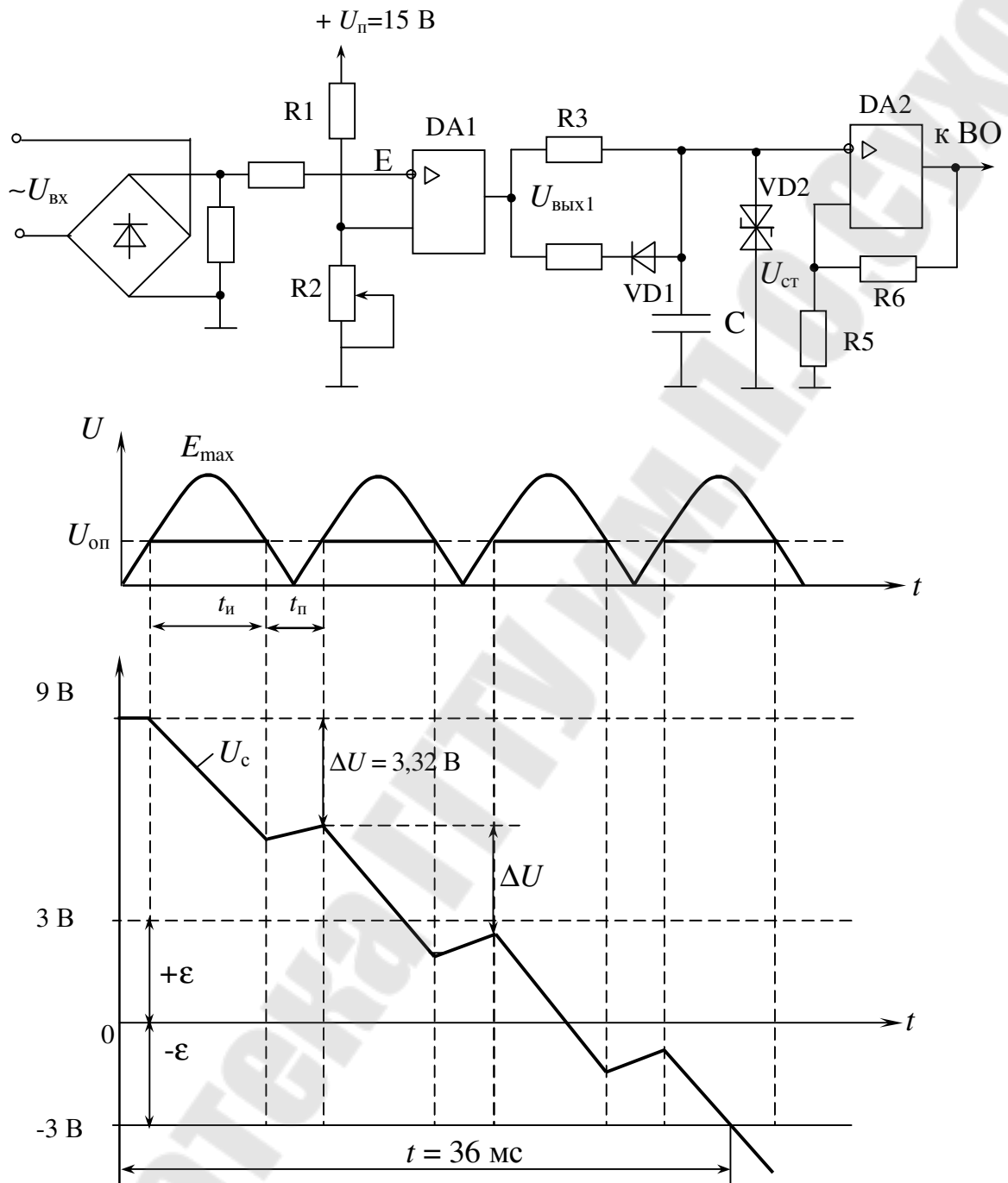


Рис. 5.5. Схема и времяимпульсная диаграмма унифицированного измерительного органа реле тока и напряжения

Измерительный орган состоит из компаратора на операционном усилителе $DA1$, пассивного интегратора на конденсаторе C , резисторах $R3$, $R4$ и диода $VD1$, двустороннего стабилитрона $VD2$ и триггера Шмитта – $DA2$.

На инвертирующий вход компаратора подается выпрямленное, но несглаженное напряжение E , которое сравнивается с опорным напряжением $U_{оп}$, снимаемое с делителей R1, R2, причем регулирование уставки ИО ($U_{оп}$) производится изменением сопротивления резистора R2 с помощью специальных переключателей. Схема работает следующим образом.

При $E > U_{оп}$ на выходе DA1 формируются прямоугольные импульсы $t_{и}$ и $t_{п}$, амплитуда напряжений которых равна: при импульсе $U_{нас}^- = -12$ В, при паузе $U_{нас}^+ = +12$ В. Конденсатор С до этого заряженный до напряжения стабилизации стабилитрона VD2 ($U_{ст} = 9$ В) периодически разряжается во время импульса и заряжается во время паузы. В цикле разряд–заряд суммарное напряжение конденсатора U_c постепенно снижается. В момент времени, когда напряжение U_c достигает порога срабатывания триггера Шмитта, последний переключается и воздействует на выходной орган реле.

Постоянные времени разряда и заряда конденсатора С приняты разными. При разряде открывается диод VD1 и резисторы R3, R4 включаются параллельно, а при заряде остается один резистор R3. На конкретном примере определим время срабатывания ИО и построим времяимпульсную диаграмму напряжений (рис. 5.5).

ЗАДАЧА

Определить время срабатывания ИО при двухкратном токе КЗ для типового реле тока РСТ13, имеющего следующие параметры (см. приложение, рис. П1):

$$R_3 = 237 \text{ кОм}, R_4 = 95,3 \text{ кОм}, C = 0,1 \text{ мкФ}, R_5 = 20,5 \text{ кОм}, \\ R_6 = 61,8 \text{ кОм}.$$

Решение

1. Из (5.1) определим $U_{оп}$ при длительности импульса $t_{и} = 0,002$ с, соответствующей уставки реле:

$$U_{оп} = E_{max} \cdot \cos(t_{и} \cdot \omega/2) = E_{max} \cdot \cos(0,002 \cdot 314/2) = 0,951 E_{max}.$$

Определим $t_{и}$ при двухкратном входном токе ($K_p = 2$):

$$t_{и(2)} = \frac{2}{\omega} \arccos \frac{0,951 E_{max}}{2 E_{max}} = 0,0068 \text{ с}.$$

3. Постоянные времени разряда и заряда конденсатора С:

$$\tau_p = \frac{R_3 \cdot R_4}{R_3 + R_4} \cdot C = \frac{237 \cdot 95,3}{237 + 95,3} \cdot 0,1 \cdot 10^{-3} = 0,0068 \text{ с.}$$

$$\tau_3 = R_3 \cdot C = 237 \cdot 0,1 \cdot 10^{-3} = 0,0237 \text{ с.}$$

4. Коэффициент a , характеризующий ускорение цепи разряда конденсатора:

$$a = 1 / \sin \left[0,5 \cdot \pi / \left(\frac{\tau_p}{\tau_3} + 1 \right) \right] = 1 / \sin \left[0,5 \cdot 3,14 / \left(\frac{0,0068}{0,0237} + 1 \right) \right] = 1,065.$$

5. Определим ступень приращения напряжения ΔU на конденсаторе в цикле разряд – заряд за каждый полупериод промышленной частоты. Для этого предварительно рассчитаем вспомогательные коэффициенты:

$$K_1 = U_{\text{нас}} / \tau_p = 12 / 0,0068 = 1765; K_2 = U_{\text{нас}} / \tau_3 = 12 / 0,0237 = 506.$$

$$\begin{aligned} \Delta U &= 10^{-3} \left[K_1 \pi - 2(K_1 + K_2) \arcsin 1 / (a \cdot K_p) \right] = \\ &= 10^{-3} \left[1765 \cdot 3,14 - 2(1765 + 506) \arcsin 1 / (1,065 \cdot 2) \right] = 3,32 \text{ В.} \end{aligned}$$

6. Значение напряжения порога срабатывания триггера Шмитта:

$$\varepsilon = U_{\text{нас}} \cdot R_5 / (R_5 + R_6) = 12 \cdot 20,5 / (20,5 + 61,8) = 3 \text{ В.}$$

7. Величина размаха напряжения на конденсаторе С при его циклическом разряде до момента срабатывания ТШ:

$$U_c = U_{\text{ст}} + \varepsilon = 9 + 3 = 12 \text{ В,}$$

где $U_{\text{ст}} = 9 \text{ В}$ – напряжение стабилизации стабилитрона.

8. Число полупериодов и время, в течение которого напряжение на конденсаторе уменьшается до значения напряжения срабатывания ТШ:

$$n = U_c / \Delta U = 12 / 3,32 = 3,6;$$

$$t_{\text{ср}} = n \cdot 10^{-2} = 0,036 \text{ с.}$$

Таким образом, время срабатывания ИО при двухкратном токе КЗ составит 36 мс (рис. 5.5).

В типовых реле вместо показанного на схеме переменного резистора R2 последовательно соединено 4-5 калиброванных сопротивлений, зашунтированных переключателями, головки которых выведены на лицевую панель. Для выставления уставки токового реле пользуются формулой

$$\sum(-) = \frac{4I_{уст}}{N} - 1,$$

где $\sum(-)$ – сумма чисел, нанесенных под переключателями (0,1; 0,2; 0,4; 0,8; 1,6);

$I_{уст}$ – значение тока уставки;

N – второе число в условном обозначении реле:

($N = 0,4; 0,9; 1,4; 1,9; 2,4; 2,9; 3,2$).

Например, требуется выставить уставку $I_{уст} = 10,5$ А в реле тока типа РСТ13-19:

$$\sum(-) = \frac{4 \cdot 10,5}{19} - 1 = 1,2; \quad \sum(-) = 0,8 + 0,4.$$

Таким образом, риски на торцах головок переключателей поворачивают в сторону выбранных чисел 0,4 и 0,8.

Аналогичную схему измерительного органа имеет реле тока нулевой последовательности типа РТЗ-51. Поскольку это реле реагирует на небольшой по величине ток, но со значительной долей высших гармоник, возникающих при дуговых замыканиях на землю, то в нем применяют полосно-пропускающий фильтр (см. рис. 4.1). Напряжение, снимаемое с фильтра, не выпрямляется, а подается на компаратор и сравнивается с постоянным опорным напряжением. В результате этого суммарное время импульса и паузы составляет не 10 мс, как в предыдущем случае, а 20 мс и, следовательно, соотношение между постоянными времени разряда и заряда конденсатора принимается значительно большее.

5.3. Измерительный орган дифференциального реле тока

Дифференциальное реле серии РСТ-15 (аналог реле РНТ-565) применяется в защитах трансформаторов и мощных электродвигате-

лей. Схема включения реле в дифференциальную защиту трансформатора показана на рис. 5.6, а.

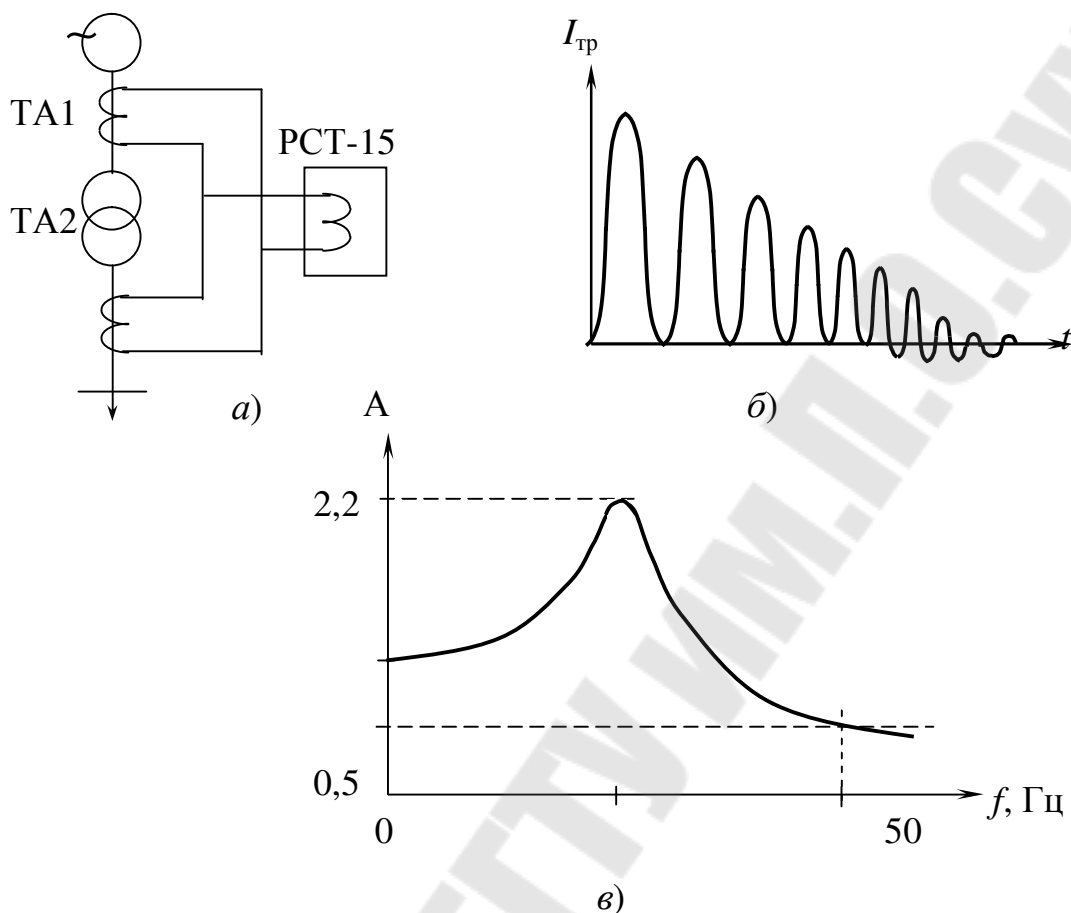
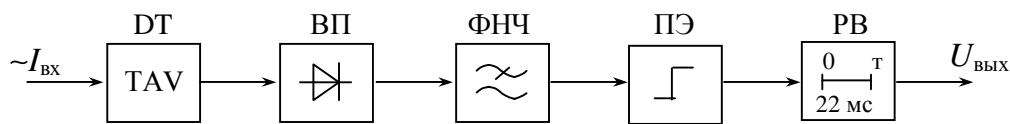
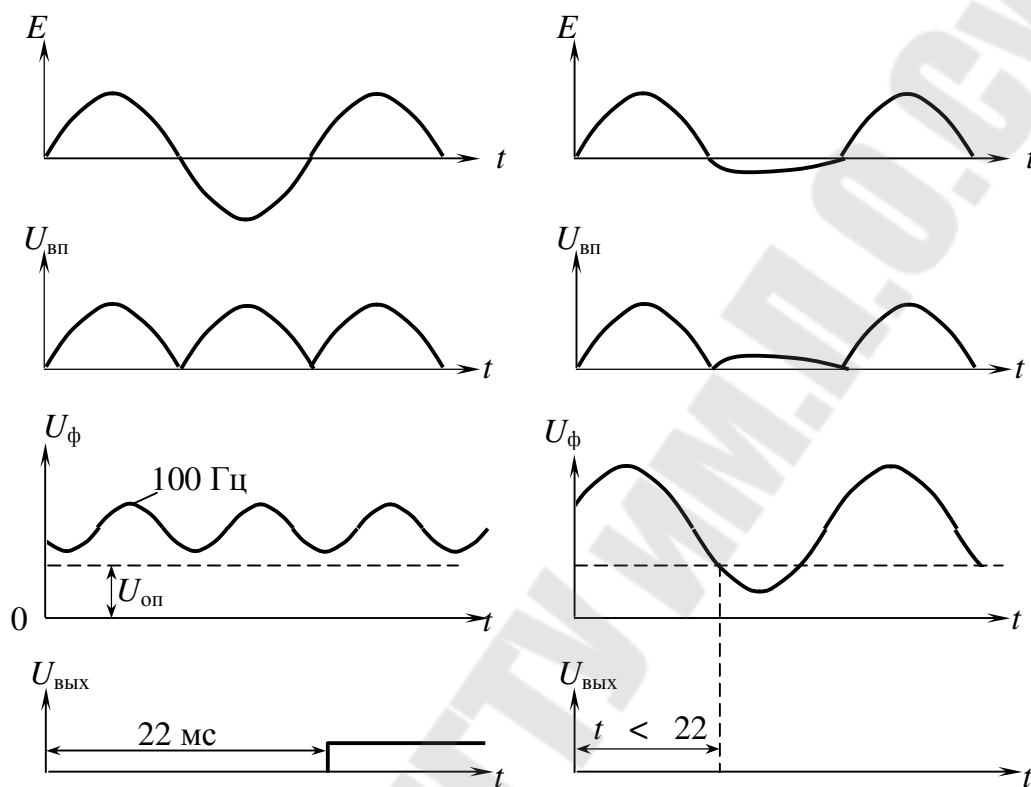


Рис. 5.6. Схема включения реле и поясняющие диаграммы напряжения

Трансформаторы тока ТА1 и ТА2 включены на разность токов, поэтому при внешних КЗ через реле протекает относительно небольшой ток небаланса, а при внутренних повреждениях трансформатора – вторичный ток КЗ только от одного трансформатора тока ТА1. Ток срабатывания реле выбирается по условию отстройки от тока небаланса. Однако при включении трансформатора под напряжение в его первичной обмотке возникает резкий бросок тока намагничивания, имеющий апериодический затухающий характер (рис. 5.6, б). Максимальное значение этого тока соизмерима с током КЗ и реле может ложно отключить трансформатор. Для отстройки от бросков тока намагничивания в статическом реле РСТ-15 применяется блокировка по 2-й гармонике дифференциального тока. Структурная схема измерительного органа дифференциального реле показана на рис. 5.7, а.



а)



б)

в)

Рис. 5.7. Измерительный орган дифференциального реле тока:
 а) структурная схема; б) времяимпульсная диаграмма при КЗ;
 в) при броске тока намагничивания

На рис. 5.7, а обозначены: ДТ – датчик тока в виде трансреактора ТАВ; ВП – двухполупериодный выпрямитель; ФНЧ – фильтр нижних частот; ПЭ – пороговый элемент; РВ – элемент задержки на срабатывания с уставкой 22 мс.

Основным функциональным элементом ИО является активный фильтр нижних частот второго порядка (фильтр Чебышева). Его амплитудно-частотная характеристика приведена на рис. 5.6, в. Параметры резисторов и конденсаторов, входящих в схему фильтра, подобраны так, что для постоянной слагающей входного сигнала коэффициент усиления фильтра равен 1. При промышленной частоте

50 Гц его коэффициент равен 2,2, а при частоте второй гармоники 100 Гц он понижается до 0,5.

Форма сигнала U_{ϕ} на выходе фильтра резко различается в зависимости от того, является он током установившегося короткого замыкания или током включения трансформатора. На рис. 5.7, б и в изображены диаграммы напряжений, поясняющие работу ИО при разных формах сигнала входного тока.

При КЗ (рис. 5.7, б) симметричная синусоида сигнала E после ее выпрямления содержит постоянную составляющую и переменную с частотой 100 Гц. Фильтр частично подавляет вторую гармонику и кривая его выходного напряжения, поступающего на пороговый элемент (компаратор), всеми точками будет располагаться выше опорного напряжения ($U_{оп}$) компаратора. Последний срабатывает и через выдержку времени, равную 22 мс, выдает сигнал на выходное реле.

В случае включения трансформатора (рис. 5.7, в) выпрямленное напряжение, поступающее на вход фильтра ФНЧ, содержит постоянную составляющую и переменную с частотой 50 Гц. Фильтр постоянную составляющую пропускает без изменения, а переменную усиливает более чем в два раза. В результате при сравнении пульсирующего напряжения с опорным, компаратор будет выдавать на элемент задержки РВ не непрерывный сигнал, как в первом случае, а прерывистый с длительностью импульса меньшей 20 мс. Следовательно, элемент задержки с уставкой 22 мс не пропустит такой сигнал и реле не сработает. Принципиальная схема реле РСТ-15 приведена в Приложении (рис. П.2.1).

В комплектной защите типа ЯРЭ-2201 применяется дифференциальное реле с торможением (аналог реле ДЗТ-11). Измерительный орган такого реле дополнительно содержит суммирующий усилитель (см. рис. рис. 4.4). В структурной схеме ИО (рис. 5.7), а суммирующий усилитель (СУ) включается между ФНЧ и ПЭ. На первый вход СУ подается сигнал от ФНЧ, а на второй вход – тормозной сигнал от отдельного входного преобразователя, содержащего датчик тока и выпрямитель с сглаживающим фильтром. Первичная обмотка указанного датчика тока подключается к трансформатору тока стороны низкого напряжения трансформатора ТА2 (рис. 5.6, а). Напряжение, поступающее на СУ от этого преобразователя, имеет противоположную

полярность напряжению от ФНЧ. В результате выходное напряжение суммирующего усилителя фактически равно разности между напряжением от ФНЧ и тормозным напряжением. Таким образом, при внешних КЗ реле автоматически увеличивает свою уставку (ток срабатывания) и дифференциальная защита трансформатора загрубляется, т. е. приобретает улучшенную отстроенность от токов небаланса.

Основным преимуществом статических дифференциальных реле является возможность выбрать ток срабатывания дифференциальной защиты трансформатора, равным 0,5 номинального тока трансформатора, что существенно повышает чувствительность защиты. Для сравнения в дифференциальных защитах с электромеханическими реле $I_{с.з} = (1,3 - 1,5)I_{ном}$.

В дифференциальных защитах мощных трансформаторов применяются электронные реле типа ДЗТ-21, у которых используется другой способ отстройки от броска тока намагничивания трансформатора. В структурной схеме этого реле частотный фильтр не применяется (см. рис. 5.7, а) а сразу за выпрямителем устанавливается формирователь прямоугольных импульсов с порогом чувствительности, а также элемент задержки при возврате с уставкой по времени $t_{уст} = 5 - 7$ мс. Формирователь импульсов представляет собой такой же компаратор, но опорное напряжение у него принимается немного большим нуля. Время-импульсные диаграммы реле типа ДЗТ-21 приведены на рис. 5.8.

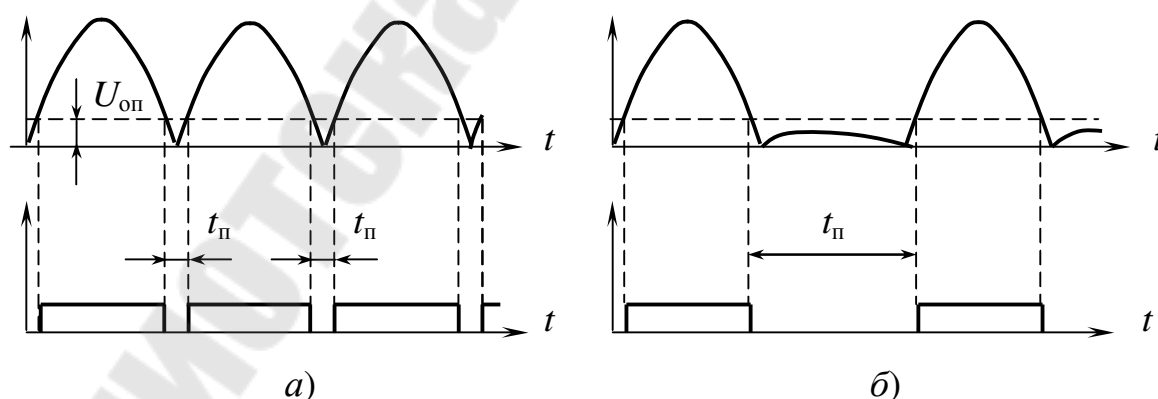


Рис. 5.8. Времяимпульсные диаграммы, поясняющие принцип действия дифференциального реле типа ДЗТ-21: а) при КЗ; б) при броске тока намагничивания

Времяимпульсный принцип основывается на анализе длительности пауз между импульсами формирователя. В первом случае (рис. 5.8, *a*) длительность пауз $t_{п}$ меньше уставки элемента задержки при возврате и, следовательно, с выхода этого элемента снимается непрерывный сигнал и измерительный орган через выдержку времени 22 мс выдает сигнал на срабатывание реле. Во втором случае (рис. 5.8, *б*) $t_{п} > t_{уст}$ и сигнал, снимаемый с элемента задержки при возврате, будет прерывистый, что не позволит набрать выдержку времени 22 мс, и реле не срабатывает.

Реле ДЗТ-21 начали выпускать более 30 лет назад и поэтому все элементы его измерительного органа выполнены на дискретных полупроводниковых приборах.

6. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ С ДВУМЯ ПОДВЕДЕННЫМИ ВЕЛИЧИНАМИ

Подавать на измерительный орган две электрические величины необходимо в том случае, когда требуется измерить не только амплитуды, но и фазовый угол между этими величинами. Такая потребность возникает в направленных защитах с реле направления мощности или реле сопротивления.

На входные преобразователи указанных реле подаются две контролируемые величины: ток I_p и напряжение U_p защищаемого объекта. Из них формируется две (иногда и больше) электрические величины E_1 и E_2 , которые связаны с I_p и U_p линейными зависимостями:

$$\begin{aligned} E_1 &= K_1 U_p + K_2 I_p; \\ E_2 &= K_3 U_p + K_4 I_p, \end{aligned} \tag{6.1}$$

где $K_1 - K_4$ – в общем случае комплексные коэффициенты передачи.

Сформировать электрическую величину E_1 или E_2 можно электромагнитным способом, соединив последовательно вторичные обмотки датчика тока и датчика напряжения. В этом случае снимаемое с них напряжение будет пропорционально геометрической сумме векторов напряжений U_p и I_p . Такой способ применяется, например, в реле сопротивления дистанционных защит типа ЭПЗ-1636. В микроэлектронных реле формирование электрической величины производят с помощью фазосдвигающих цепочек и суммирующего усилителя. Для сравнения электрических величин E_1 и E_2 применяют два метода: либо сравнивают их по абсолютным значениям, либо – по фазе. В

электронных реле преимущественно используют второй метод сравнения.

В основе его лежит времяимпульсный способ сравнения времени совпадения (t_c) с временем несовпадения ($t_{нс}$) знаков полувольт синусоидальных напряжений величин E_1 и E_2 (рис. 6.1).

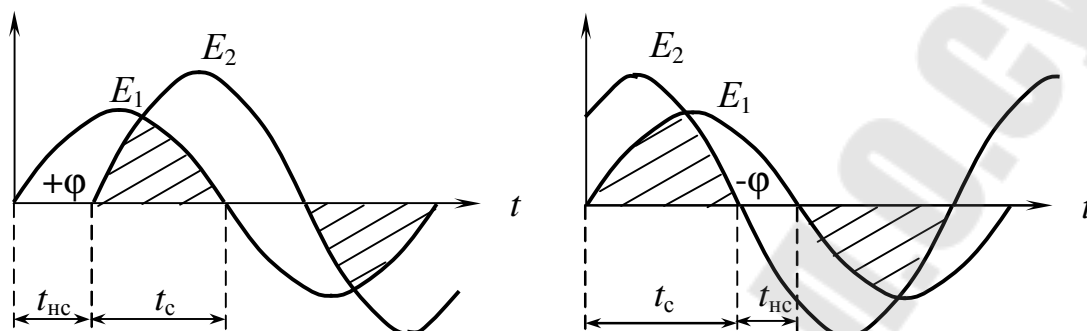


Рис. 6.1. Времяимпульсный способ сравнения фаз

Если за условие срабатывания измерительного органа принять $t_c \geq t_{нс}$, то он срабатывает при значениях угла φ между величинами E_1 и E_2 в пределах

$$-\frac{\pi}{2} \leq \varphi_{ср} \leq \frac{\pi}{2}, \quad (6.2)$$

имея в виду, что сумма $t_c + t_{нс} = \pi$.

В полярной системе координат зона срабатывания (незаштрихованная область) и несрабатывания измерительного органа изображены на рис. 6.2.

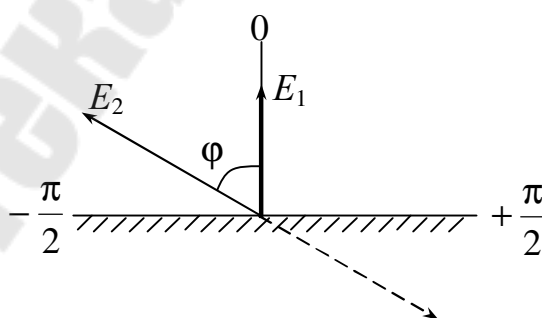


Рис. 6.2

За базовую величину принят вектор E_1 . Если вектор E_2 будет находиться в незаштрихованной зоне, то измерительный орган сработает, а если в заштрихованной – то не сработает.

6.1. Электронное реле направления мощности в комплектных защитах

В современных реле направления мощности комплектных защит применяют измерительный орган, выполненный на базе операционных усилителей DA (рис. 6.3).

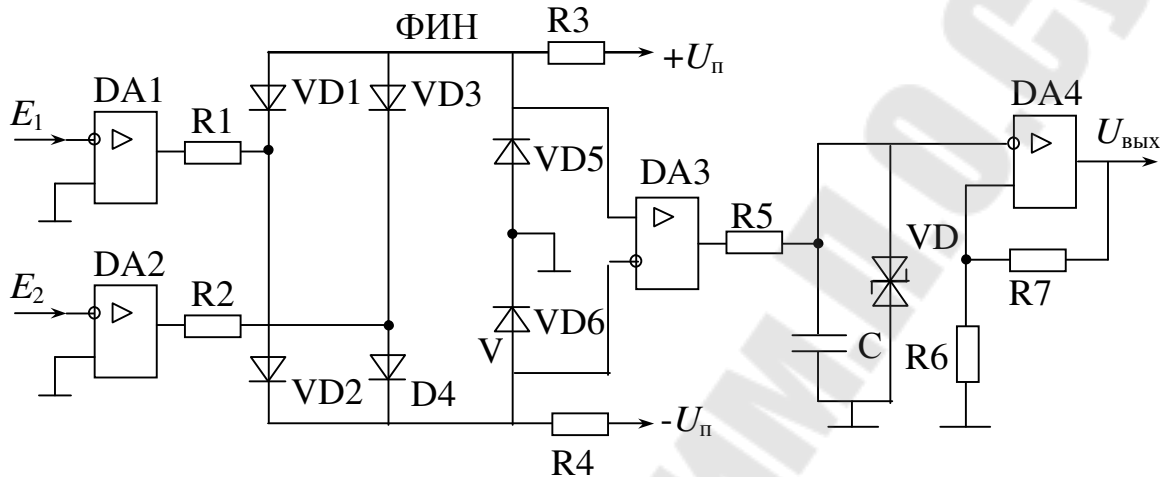


Рис. 6.3. Схема измерительного органа реле направления мощности комплектных защит

Измерительный орган состоит из 4-х функциональных элементов: нуль-органов (DA1 и DA2), формирователя импульсов несовпадения на DA3 (ФИН), пассивного интегратора (CR5) и триггера Шмитта (DA4).

Поскольку в реле направления мощности не требуется измерения модулей векторных величин E_1 и E_2 , а только фазу между ними, то система уравнений (6.1) приобретает вид:

$$E_1 = K_1 U_p; \quad E_2 = K_4 I_p,$$

где K_1 и K_4 – вещественные коэффициенты.

Следовательно, на входы DA1 и DA2 можно подавать напряжения непосредственно от датчиков напряжения и тока. Нуль-органы на операционных усилителях DA1 и DA2 формируют прямоугольные импульсы из синусоидальных напряжений E_1 и E_2 при переходе их через нуль.

Для формирования импульса несовпадения знаков сравниваемых напряжений применяется схема, состоящая из диодов VD1–VD6, резисторов R1–R4 и операционного усилителя DA3, причем при выборе параметров резисторов должны быть соблюдены условия:

$$R_1 = R_2; \quad R_3 = R_4; \quad R_1 \approx 0,5 \cdot R_3.$$

Схема ФИН работает следующим образом. Предположим, что на диодный мост VD1, VD2, VD3, VD4 входные напряжения от DA1 и DA2 не поступают. Тогда все диоды моста будут открыты прямым током от источника питания $U_{п}$, проходящего через резисторы R3 и R4. Диоды VD5 и VD6 при этом будут закрыты обратным напряжением. Напряжение между входами DA3 равно удвоенному прямому падению напряжения диода моста, с плюсом на неинвертирующем входе, выходное напряжение DA3 установится равным $U_{нас}^+$. Функционирование выпрямительного моста как источника напряжения может быть только в том случае, если на его входы от DA1 и DA2 будут поданы разнополярные напряжения. В этом случае на выходах моста установится напряжение с полярностью, обратной первоначальному режиму. Ток, созданный этим напряжением, будет проходить через открывшиеся диоды VD5 и VD6. Следовательно, на входах DA3 изменится полярность напряжения и он переключится в положение $U_{нас}^-$. При однополярных напряжениях на входах моста откроется только один из диодов VD5 или VD6, но этого будет недостаточно для изменения полярности входных напряжений DA3.

Таким образом, выходное напряжение операционного усилителя DA3 будет иметь знак минус при разнополярных напряжениях E_1 и E_2 и знак плюс при однополярных напряжениях. Так формируются импульсы совпадения t_c и несовпадения $t_{нс}$. По существу рассмотренный формирователь работает по такому же алгоритму, как известный в промышленной электронике логический элемент «Исключающее ИЛИ».

Для сравнения длительностей импульсов $t_{нс}$ и t_c применяется интегрирующая цепочка CR5 и триггер Шмитта, принцип действия которых рассмотрен в п. 5.2.

В отличие от схемы на рис. 5.5 в данном интеграторе применяется одно сопротивление R5, и постоянные времени разряда и заряда конденсатора C равны между собой. На границе срабатывания ИО длительности импульсов t_c и $t_{нс}$ будут одинаковыми и, следовательно, в цикле заряд – разряд результирующее напряжение U_c на конденсаторе не изменится.

В исходном режиме между векторами напряжений E_1 и E_2 угол φ предположим больше 90° . Тогда на выходах нуль-органов будут сформированы импульсы, длительность совпадения знаков которых t_c будет больше $t_{нс}$, имея в виду, что DA1 формирует инверсный сигнал

по отношению к DA2. В этом случае выходное напряжение DA3 имеет форму разнополярных импульсов с преобладанием по длительности знака плюс и конденсатор С заряжен до напряжения стабилизации стабилитрона VD7.

В случае внезапного изменения направления вектора тока I_p , угол φ установится в зоне действия защиты и выполнится условие срабатывания реле $t_{nc} > t_c$. На интегрирующий элемент CR5 воздействуют импульсы с преобладанием по длительности отрицательного знака. В цикле разряд – заряд результирующее напряжение на конденсаторе С постепенно уменьшается и когда оно станет равным порогу срабатывания триггера Шмита, произойдет срабатывание реле.

Очевидно, что скорость снижения результирующего напряжения на конденсаторе зависит от соотношения между t_{nc} и t_c . Максимальное быстродействие реле будет иметь при $t_c = 0$ и $t_{nc} = 10$ мс. В этом случае на выходе DA3 установится непрерывное отрицательное напряжение и конденсатор безостановочно разрядится до напряжения срабатывания реле.

Угол φ между E1 и E2, соответствующий указанному режиму, называется углом максимальной чувствительности реле ($\varphi_{м.ч}$). Для приведенной (см. рис. 6.2) характеристики срабатывания угол $\varphi_{м.ч} = 0$.

В направленных защитах от междуфазных замыканий принимают угол $\varphi_{м.ч} = -45^\circ$. Для этого с помощью фазоповоротной схемы (RC) напряжение E_1 сдвигают на 45° в сторону отставания. При этом граница зоны действия реле на характеристике срабатывания повернется против часовой стрелки на угол 45° (см. рис. 6.2).

При анализе поведения реле направления мощности строят векторные диаграммы напряжений и токов, и на них накладывает характеристика срабатывания реле. При этом необходимо помнить, что реле направления мощности подключается к измерительным трансформаторам тока и напряжения по так называемой 90° -й схеме. Например, ток I_p берется от фазы А, а напряжение U_p – от линейного напряжения между фазами В и С.

Серийное статическое реле направления мощности типа РМ-11(12) построено также на основе временимпульсного способа сравнения двух величин по фазе, но выполнено оно на базе дискретных полупроводниковых приборов, так как выпускается оно уже давно (более 35 лет назад). Принцип его действия подобен рассмотренному и подробно изложен в [7], а принципиальная схема приведена в Приложении (рис. П. 3.1).

6.2. Направленное реле защиты нулевой последовательности в сетях с малым током замыкания на землю

При однофазном замыкании на землю в электрической сети, работающей с изолированной нейтралью (6–35) кВ, ток нулевой последовательности $3I_0$ появляется во всех линиях гальванически связанных с данной сетью. По величине тока $3I_0$ различить поврежденную и неповрежденные линии в слаборазветвленных сетях порой бывает невозможно. В этом случае применяют направленные защиты, которые определяют направления протекания тока $3I_0$ в линии. В неповрежденных линиях этот ток опережает на 90° вектор напряжения нулевой последовательности $3U_0$, так как ток $3I_0$ чисто емкостной и его значение зависит только от длины и сечения проводов линии.

В поврежденной линии ток $3I_0$ состоит из суммы токов всех неповрежденных линий и направлен он в противоположную сторону, т. е. ток $3I_0$ отстает на 90° от напряжения $3U_0$. Отсюда следует, что направленное реле должно иметь угол $\varphi_{м.ч} = +90^\circ$.

Значение тока $3I_0$ в неповрежденной линии малой длины может составлять около 0,03 А. Электромеханические реле направления мощности не способны его измерить. Поэтому направленные защиты от замыкания на землю в сетях (6–35) кВ можно было выполнить только благодаря появлению чувствительных полупроводниковых приборов.

Направленная защита типа ЗЗП, выполненная на дискретных полупроводниках, появилась в середине 50-х годов и до сих пор принимается в электросетях. Только в конце 80-х годов взамен ЗЗП стали выпускаться реле типа ЗЗН на микроэлектронной элементной базе.

Схема измерительного органа реле ЗЗП аналогична рассмотренной (см. рис. 6.3), но в отличие от нее электрическая величина E_2 (от датчика тока) перед подачей на вход ИО фильтруется с помощью полосно-пропускающего фильтра, настроенного на чистоту 50 Гц.

В связи с тем, что реле типа ЗЗП-1М хотя и устарело, но именно оно в основном применяется в эксплуатации, рассмотрим принцип его действия по упрощенной схеме (рис. 6.4).

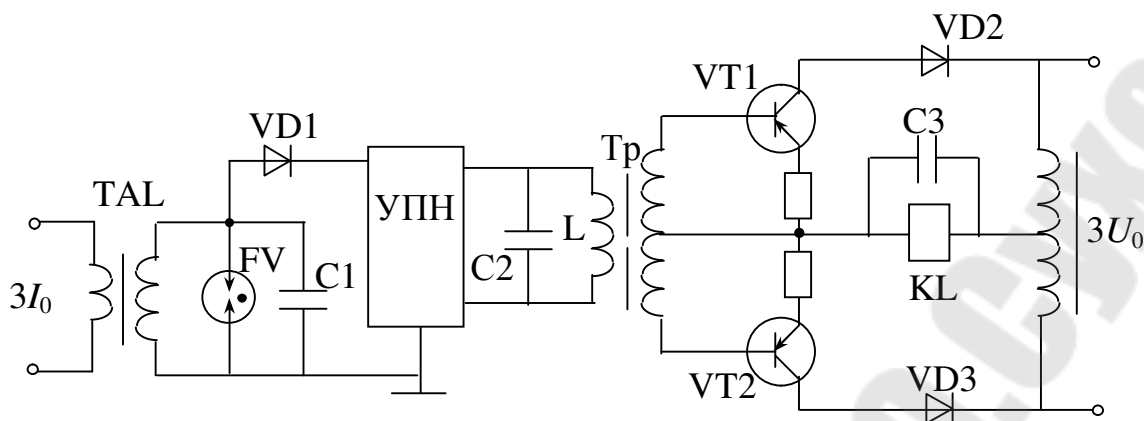


Рис. 6.4. Упрощенная схема направленной защиты типа 33П-1М

На первичную обмотку датчика тока TAL подается ток $3I_0$ от трансформатора тока нулевой последовательности типа ТЗЛ, который выполнен в виде тороидального сердечника, а через его отверстие проходит кабель защищаемой линии. На фазочувствительный орган поступает напряжение $3U_0$, полученное от фильтра напряжения нулевой последовательности – разомкнутый треугольник вторичной обмотки трансформатора напряжения типа НТМИ.

Датчик тока преобразует ток $3I_0$ в пропорциональное напряжение, которое появляется на конденсаторе $C1$, служащем одновременно фазоповоротным средством, обеспечивающим угол $\varphi_{м.ч} = 90^\circ$. Для защиты реле от перенапряжений применяют газовый разрядник FV .

Напряжение от датчика тока после однополупериодного выпрямителя на диоде $VD1$ поступает на двухкаскадный усилитель переменного напряжения УПН. Выходной каскад этого усилителя связан с первичной обмоткой промежуточного трансформатора Tr , к которой подключен конденсатор $C2$. Емкость $C2$ и индуктивность L подобраны так, что в контуре CL резонанс токов наступает при частоте 50 Гц и, следовательно, УПН одновременно выполняет роль полосно-пропускающего фильтра.

Фазочувствительный и выходной органы выполнены на транзисторах $VT1$, $VT2$ и выходном реле KL . Параллельно катушки реле включен сглаживающий конденсатор $C3$. Фазочувствительный орган выполнен по принципу двухтактного формирователя импульсов совпадения знаков сравниваемых напряжений $3U_0$ и УПН. Транзисторы поочередно (в разные полупериоды) открываются, если на их базу и коллектор одновременно поступают напряжения отрицательного знака. При этом в цепи эмиттера появляется ток, приводящий к срабатыванию реле. Реле срабатывает при выполнении условия $t_c \geq t_{нс}$, при

этом угол максимальной чувствительности схемы сравнения равен нулю ($t_{nc} = 0$, $t_c = 10$ мс). Однако, учитывая фазоповоротные свойства конденсатора С1, для защиты в целом $\varphi_{мч} = +90^\circ$, а зона ее действия находится в диапазоне углов

$$0^\circ \leq \varphi \leq \pi.$$

Фактически границы зоны действия реле размыты. Четкое срабатывание реле происходит в диапазоне углов $30^\circ \leq \varphi \leq 150^\circ$.

Первичный ток срабатывания защиты $3I_{о.ср}$ регулируется ступенчато отпайками от вторичной обмотки трансформатора ТАЛ и может принимать значения 0,07; 0,5 и 2 А $\pm 30\%$.

6.3. Реле сопротивления и принципы его построения на микроэлектронной элементной базе

Реле сопротивления (РС) применяют в дистанционных защитах линий напряжением от 110 до 750 кВ. РС реагирует на отношение вектора напряжения, подводимого к реле, к вектору тока реле $\underline{U}_p / \underline{I}_p = \underline{Z}_p$, т. е. – на сопротивление петли короткого замыкания, которое так же является векторной величиной. Условие срабатывания реле: $\underline{Z}_p \leq \underline{Z}_{уст}$.

Характеристики срабатывания РС в комплексной плоскости сопротивлений имеют вид окружности или многоугольника, смещенных в первый квадрант с целью придания реле свойства направленности действия (рис. 6.5, а, в).

Для получения окружности формируются две электрические величины согласно системы уравнений (6.1), и если в ней принять $K_1 = K_3$, получим:

$$E_1 = K_1 U + K_2 I; \quad E_2 = K_1 U + K_4 I, \quad (6.3)$$

где K_1 – вещественный коэффициент;

K_2, K_4 – комплексные коэффициенты передачи.

Вынеся за скобки величину $K_1 I$ и с учетом того, что $Z = \frac{U}{I}$, получим:

$$E_1 = K_1 I \left(\frac{U}{I} + \frac{K_2}{K_1} \right) = K_1 I (Z - Z_1);$$

$$E_2 = K_1 I \left(\frac{U}{I} + \frac{K_4}{K_1} \right) = K_1 I (Z - Z_2).$$

Здесь принято, что $Z_1 = -\frac{K_2}{K_1}$, $Z_2 = -\frac{K_4}{K_1}$.

Сопротивления Z_1 и Z_2 являются постоянными комплексными величинами (уставками), определяющие диаметр окружности и ее расположение в плоскости сопротивлений, а величина Z – сопротивление петли КЗ, измеренное РС. Концы векторов Z_1 и Z_2 , расположенные на диаметре окружности, принято называть особыми точками 1 и 2.

На рис. 6.5, а изображена характеристика срабатывания РС в виде окружности и показано два случая: первый – вектор Z (конец его – точка «а») расположен внутри окружности и второй – вне окружности (точка «а1»).

Определить конец вектора Z можно по пересечению двух разностных векторов $Z - Z_1$ и $Z - Z_2$. По величине угла сдвига ψ между указанными векторами определяют, где находится вектор Z – внутри окружности или вне ее. Если внутри, то $\psi > 90^\circ$, если вне, то $\psi < 90^\circ$, а $\psi = 90^\circ$ – граница срабатывания реле. При расположении вектора Z внутри окружности реле сопротивления должно срабатывать. Таким образом, условие срабатывания реле имеет вид

$$\frac{\pi}{2} \leq \arg \frac{Z - Z_1}{Z - Z_2} \leq -\frac{\pi}{2}.$$

Сравнив данное условие с (6.2), убедимся, что они идентичны, следовательно, орган сравнения по фазе (ОСФ) в реле сопротивления можно применить такой же, как и в реле направления мощности (см. рис. 6.3).

Для формирования электрических величин E_1 и E_2 в соответствии с выражениями (6.3) применяют специальный преобразователь, состоящий из фазопоротных цепей и суммирующих усилителей (рис. 6.5, в).

Напряжение U от датчика напряжения TVL подается на один из входов суммирующих усилителей DA1 и DA2 с масштабным коэффициентом K_n , который устанавливается переменным резистором R_n .

Это напряжение создает ток с передаточным коэффициентом $K_1 = K_{\#}/R_1$, который совпадает по фазе с напряжением U . Фазосдвигающие цепи на конденсаторах C_1, C_2 определяют комплексные коэффициенты K_2, K_4 . Разнополярные напряжения $\pm U_i$, снимаемые с датчика тока ТАЛ, создают токи K_2I и K_4I . Вектор тока K_2I опережает напряжение $+U_i$ на угол, определяемый соотношением параметров емкостной цепи R_2C_1 . Аналогично ток K_4I опережает напряжение $-U_i$.

На рис. 6.5, б приведена векторная диаграмма с изображенными на ней вышеназванными токами. Операционные усилители DA1, DA2 включены по схеме суммирующих усилителей. Выходные напряжения этих сумматоров E_1, E_2 пропорциональны геометрической сумме векторных величин входящих токов. Из векторной диаграммы следует:

$$E_1 = K_1U + K_2I; \quad E_2 = K_1U + K_4I.$$

Значение угла ψ между векторами E_1 и E_2 оценивается с помощью органа сравнения по фазе (ОСФ). Как видно из векторной диаграммы, при резком увеличении тока I и снижении напряжения U , например, в случае коротких замыканий в защищаемой линии, угол ψ возрастает и если его значение превысит 90° , то ОСФ срабатывает.

Таким образом, в ИО реле сопротивления (в отличие от реле направления мощности) фазовый угол между напряжениями E_1 и E_2 изменяется не только с изменением угла ψ , но и с изменением модулей входных воздействующих величин U_p и I_p .

В дистанционных защитах типа ШДЭ–2801(2), ПДЭ–2001 и др. применяют реле сопротивления с четырехугольной характеристикой срабатывания (рис. 6.5, в). Такие характеристики лучше отстроены от сопротивления максимального нагрузочного режима. Для ее получения из двух входных величин U_p и I_p формируют четыре электрические величины $E_1–E_4$ по такому же принципу. Характеристика имеет четыре особых точек 1, 2, 3, 4, из которых к концу вектора Z проводят разностные векторы: $Z - Z_1; Z - Z_2; Z - Z_3$ и $Z - Z_4$. Если максимальный угол ψ между крайними векторами больше π (180°), то это свидетельствует о том, что вектор сопротивления KZ (точка «а») находится внутри четырехугольника и реле срабатывает, а если $\psi < \pi$ (точка «а1»), то не срабатывает. Для реализации указанного алгоритма при-

меняют формирователь импульсов несовпадения (ФИН) на четыре входных величины. Для этого в схеме ФИН (см. рис. 6.3) по аналогии с E_1 и E_2 добавляют по два диода для каждой величины E_3 и E_4 , а на выходе ФИН включают элемент задержки на срабатывание с уставкой 13–15 мс.

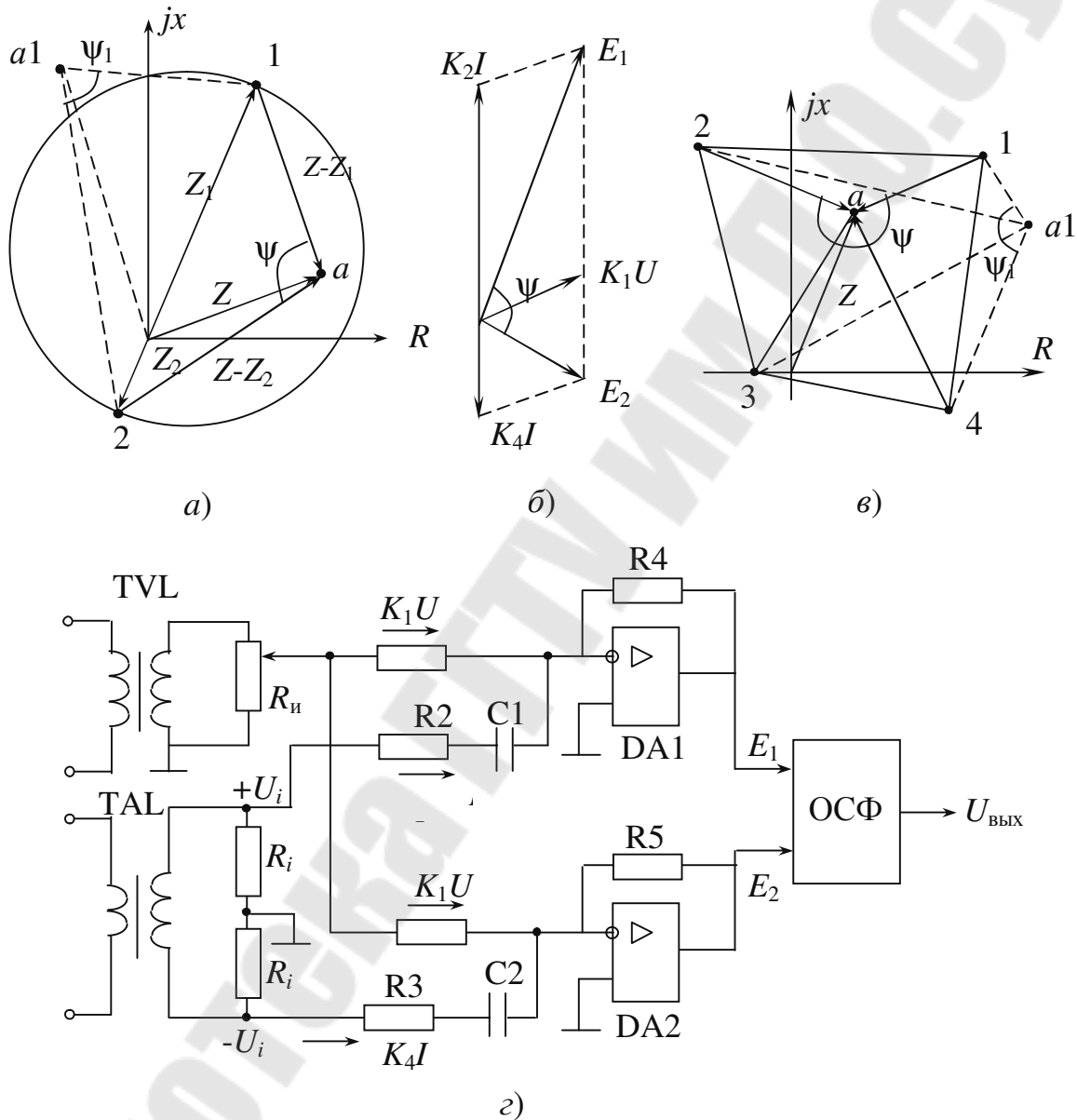


Рис. 6.5. Реле сопротивления: а, в) характеристики срабатывания; б) векторная диаграмма; г) схема измерительного органа

Интервалу времени угла $\psi = \pi$ при $f = 50$ Гц соответствует время 10 мс, следовательно, если в течение этого времени не произойдет совпадение знаков мгновенных величин E_1 – E_4 , то на элемент задержки поступит непрерывный сигнал и он через 15 мс сработает. Если

угол $\psi < \pi$, то в какой-то момент в интервале времени 10 мс произойдет совпадение знаков и на элемент задержки будет воздействовать прерывистый сигнал и он, не набрав своей уставки, не сработает.

Таким образом, на микроэлектронной элементной базе без особых усложнений можно выполнить реле защиты с любыми характеристиками срабатывания. Для сравнения, чтобы выполнить четырехугольную характеристику на электромеханической элементной базе, необходимо применить четыре реле направления мощности, работающих по логической схеме совпадения И. Принципиальная схема реле сопротивления с характеристикой в виде окружности приведена в Приложении (рис. П.5.1).

6.4. Устройство блокировки дистанционных защит при качаниях в энергосистеме

Качания в энергосистеме появляются из-за несинхронного включения генераторов или линий в цикле АПВ, а так же при КЗ вблизи шин электростанций и при других возмущениях. Они сопровождаются большими уравнительными токами и изменениями напряжения с частотой биения до 5 Гц. Дистанционные защиты качания воспринимают как режим короткого замыкания и ложно срабатывают. Поэтому дистанционные защиты снабжаются устройством блокировки при качаниях. При коротком замыкании блокировка вводит в действие защиту на время, достаточное для ее срабатывания, и, если срабатывание защиты не произошло, блокирует ее. Режим КЗ всегда сопровождается появлением несимметрии. Даже при трехфазном замыкании за счет разновременности перекрытия изоляции линии кратковременно возникает несимметричное КЗ, которое характеризуется появлением составляющих токов обратной последовательности (I_2). Устройство блокировки реагирует на приращение вектора тока ΔI_2 и срабатывает за время не более 10 мс, после чего становится на самоподхват на время ввода в действие защиты (0,5÷3) с.

Рассмотрим схему пускового органа, формирующего величину, пропорциональную приращению вектора тока I_2 (рис. 6.6).

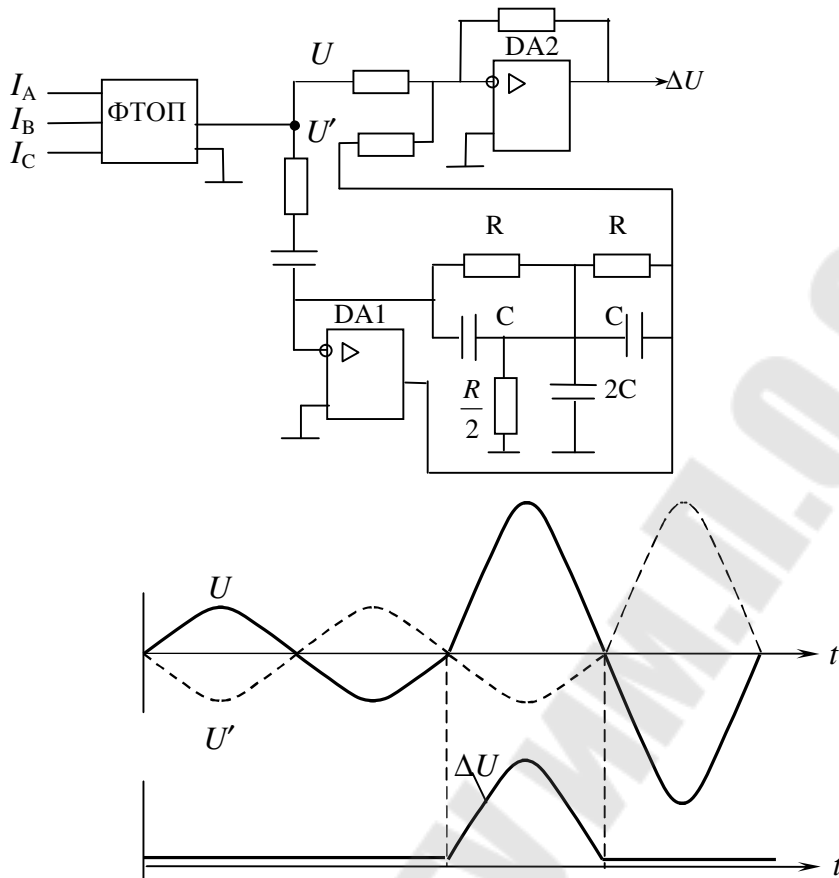


Рис. 6.6. Схема и диаграмма напряжений пускового органа устройства блокировки при качаниях

С выхода фильтра токов обратной последовательности (ФТОП) снимается напряжение U , пропорциональное току I_2 , которое подается на первый вход сумматора напряжений на операционном усилителе DA2. На второй вход сумматора подается напряжение U' с линии задержки, в качестве которой используется инвертирующий полосно-пропускающий фильтр (DA1), настроенный на промышленную частоту 50 Гц. В цепи обратной связи DA1 применяется двойной T-образный мост RC. За счет своей фазочастотной характеристики выходное напряжение U' фильтра отстает от входного U на 180° и равно ему по модулю. Причем, вследствие инерционности RC-звеньев, фильтр выполняет роль контура памяти, т. е. выходное напряжение повторяет входное с отставанием во времени на полпериода промышленной частоты. Выходное напряжение сумматора равно $\Delta U = U + U'$, но поскольку эти напряжения находятся в противофазе, то в установившемся режиме, в том числе и при появлении тока небаланса, напряжение $\Delta U = 0$.

При КЗ скачком возрастают ток I_2 и напряжение U , а напряжение U' полпериода сохраняется прежним. Поэтому ΔU резко возрастает только на время переходного процесса.

Далее напряжение ΔU выпрямляют, сравнивают с опорным и если выполняется условие $\Delta U \geq U_{оп}$, то запускается элемент задержки при возрастании и на это время вводят в действие дистанционную защиту. Рассмотренный пусковой орган имеет очень высокую чувствительность $\Delta I_2 \geq 0,04 I_{ном}$. Он отстроен от качаний с частотой 5 Гц при токе до $4 I_{ном}$, а при неполнофазном режиме – до $I_{ном}$. Такой пусковой орган применяется в комплектных защитах типа ШДЭ-2802 и ПДЭ-2001.

7. ТОКОВОЕ РЕЛЕ ЗАЩИТЫ С ОБРАТНОЗАВИСИМОЙ ОТ ТОКА ХАРАКТЕРИСТИКОЙ СРАБАТЫВАНИЯ

В комплектных защитах типа ЯРЭ-2201 применяются токовые реле с зависимой выдержкой времени срабатывания. Такие реле являются аналогами индукционных реле типа РТ-80.

Например, для защиты электродвигателей ЭД от перегрузки применяются реле РТ-82, главным недостатком которого является то, что выдержка времени его срабатывания одинакова, независимо от того холодный двигатель находится в режиме перегрузки или горячий (после его пуска). В электронных реле температура двигателя косвенно отслеживается как в рабочем состоянии двигателя, так и в отключенном. Память о температуре двигателя в электронных аналоговых реле хранится на конденсаторе, а в цифровых реле – программно.

Процесс нагрева обмотки двигателя происходит по адиабатическому закону, согласно которому количество выделенного тепла пропорционально квадрату тока. Выдержка времени срабатывания защиты от перегрузки определяется по выражению:

$$t_{с.з} = \frac{A}{(I_*^2 - 1)},$$

где A – величина, зависящая от постоянной времени нагрева двигателя;

I_* – кратность тока относительно номинального тока двигателя.

Для двигателей небольшой мощности, допускающих нахождение ЭД в течение 2-х минут в режиме перегрузки 1,5-кратным током (ГОСТ 183-74), величина $A = 120/(1,5^2 - 1) = 150$ с.

Охлаждение двигателя происходит по экспоненциальному закону с постоянной времени в 2-3 раза большей постоянной времени нагрева. Это объясняется отсутствием вентиляции остановленного ЭД.

Упрощенная схема измерительного органа защиты ЭД от перегрузки комплекта ЯРЭ-2201 приведена на рис. 7.1.

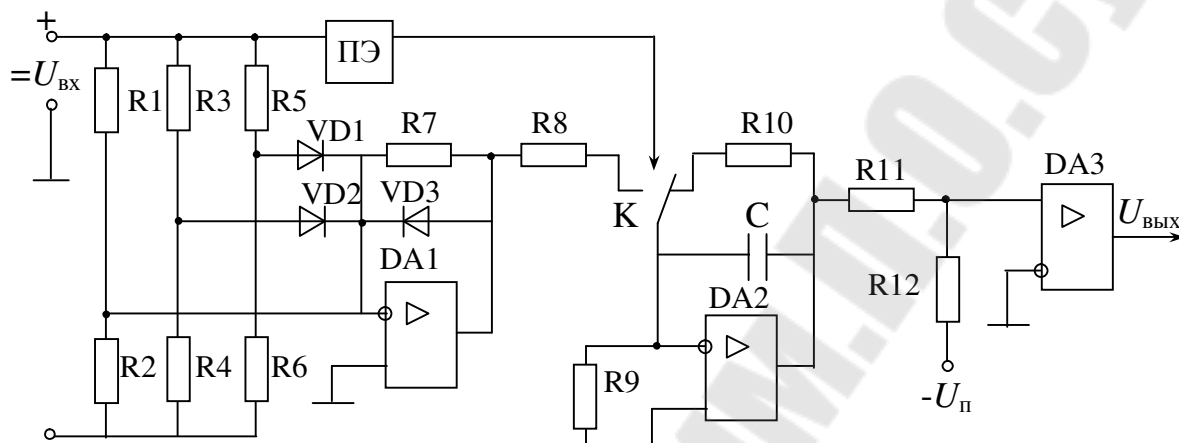


Рис. 7.1. Схема измерительного органа реле тока с зависимой характеристикой срабатывания

Измерительный орган состоит из функционального преобразователя (квадратора), выполненного на операционном усилителе DA1, активного интегратора на базе DA2, компаратора DA3, собранного по схеме сравнения токов, и порогового элемента ПЭ, выполненного по схеме (см. рис. 5.3).

Прежде рассмотрим работу компаратора DA3. На его инвертирующий вход подан нуль, следовательно, компаратор переключится в момент появления нуля на неинвертирующем входе.

На резистивный делитель R11, R12, с одной стороны, подается входное положительное напряжение $U_{\text{вх}}$ от DA2, а с другой, – отрицательное напряжение источника питания $-U_{\text{п}}$. Выходное напряжение делителя станет равным нулю при выполнении условия: $+U_{\text{вх}} \cdot R_{12} = -U_{\text{п}} \cdot R_{11}$. Отсюда, порог срабатывания компаратора определяется по формуле $+U_{\text{сп}} = -U_{\text{п}} \cdot R_{11}/R_{12}$.

Аналогичные делители напряжения установлены на входе функционального преобразователя (ФП). ФП выполнен на основе инвертирующего усилителя DA1. Выходное напряжение усилителя должно быть пропорционально квадрату входного напряжения.

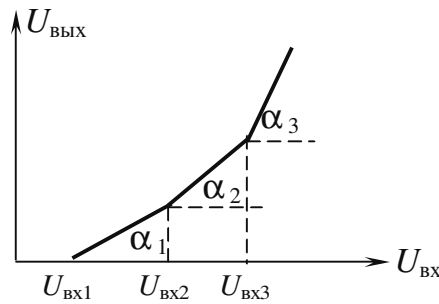


Рис. 7.2

Для этой цели квадратичную зависимость, изображенную на рис. 7.2, аппроксимируют тремя отрезками прямых линий, тангенс угла наклона которых ($\operatorname{tg}\alpha$) равен коэффициенту усиления инвертирующего усилителя: $\operatorname{tg}\alpha = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{R_7}{R_{\text{ВХ}}}$, где входное сопротивление

$R_{\text{ВХ}}$ определяется параметрами резисторов R1, R3, R5. Принцип действия ФП следующий.

Предположим на вход схемы (рис. 7.1) подается $U_{\text{ВХ}} = 0$. Тогда на инвертирующий вход DA1 поступает отрицательное напряжение от резистивного делителя R1, R2. На выходе DA1 должно было бы установиться положительное напряжение. Однако за счет отрицательной обратной связи, осуществляемой открывшимся диодом VD3, напряжение на выходе DA1 установится равным падению напряжения на диоде $\Delta U_{\text{д}} = 0,3 - 0,5$ В. Для упрощения примем $\Delta U_{\text{д}} = 0$. При увеличении положительного напряжения на входе схемы до значения $U_{\text{ВХ1}} = -U_{\text{п}} \cdot \frac{R_1}{R_2}$ на выходе делителя R1, R2 установится напряжение, равное нулю. С этого момента диод VD3 закрывается и коэффициент усиления инвертирующего усилителя станет равным $\operatorname{tg}\alpha_1 = \frac{R_7}{R_1}$. При

значении входного напряжения $U_{\text{ВХ2}} = -U_{\text{п}} \cdot \frac{R_3}{R_4}$ на выходе делителя

R3, R4 установится напряжение равное нулю, диод VD2 открывается и резисторы R1 и R2 включаются параллельно. С этого момента

$\operatorname{tg}\alpha_2 = \frac{R_7}{R_1 \parallel R_3}$, т. е. коэффициент усиления DA1 возрастает. По анало-

гии при значении $U_{\text{ВХ3}} = -U_{\text{П}} \cdot \frac{R_5}{R_6}$, $\operatorname{tg}\alpha_3 = \frac{R_7}{R_1 \parallel R_3 \parallel R_5}$.

Таким образом, выходное напряжение DA1 будет пропорционально квадрату входного, причем значение $U_{\text{ВХ1}}$ принимается равным (в эквиваленте) номинальному току двигателя. Обозначив величину $U_{\text{ВХ}}$ в относительных единицах, получим следующую формулу

$$U_{\text{ВЫХ}} = \operatorname{tg}\alpha_1 (U_*^2 - 1) = R_7 (U_*^2 - 1) / R_1. \quad (7.1)$$

Интегрирующий усилитель DA2 предназначен для преобразования входного напряжения в пропорциональный временной интервал. Если на его вход через переключатель К будет подано постоянное напряжение $U_{\text{ВХ}}$, то выходное напряжение интегратора будет во времени возрастать по линейному закону

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{CR_8} \cdot t,$$

где t – текущее время.

Выходное напряжение интегратора сравнивается с уставкой ($U_{\text{ср}}$) компаратора DA3 и при равенстве этих напряжений компаратор срабатывает. В данную формулу, подставив значение $U_{\text{ср}}$, получим следующее уравнение:

$$U_{\text{П}} \cdot \frac{R_{11}}{R_{12}} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{CR_8} \cdot t_{\text{с.з.}}$$

Подставив вместо напряжения $U_{\text{ВХ}}$ выходное напряжение ФП из (7.1) и решив данное уравнение, получим зависимость времени срабатывания реле от кратности входного напряжения (тока):

$$t_{\text{с.з.}} = \frac{U_{\text{П}} \cdot R_{11} \cdot CR_8 \cdot R_1}{R_{12} \cdot R_7 (U_*^2 - 1)} = \frac{A}{U_*^2 - 1}.$$

В целом ИО работает следующим образом (см. рис. 7.1). В исходном состоянии переключатель К находится в положении замкнут на резистор R_{10} . В качестве переключателя К применяются бескон-

тактные ключи на КМОП-транзисторах. Выходные напряжения DA1 и DA2 равны нулю, конденсатор С разряжен, а компаратор DA3 находится в положении $U_{нас}^-$.

При перегрузке двигателя его ток возрастает и достигает уставки срабатывания порогового элемента ПЭ ($I_{ср} = 1,2I_{ном.дв.}$). Последний, действуя на переключатель К, подключает вход интегратора DA2 к функциональному преобразователю DA1, на выходе которого к этому моменту уже установилось напряжение, пропорциональное квадрату тока. Конденсатор С заряжается с выдержкой времени и при достижении напряжения срабатывания компаратора DA3 выдается сигнал дежурному персоналу о факте перегрузки (по ПУЭ защита от перегрузки должна действовать на сигнал или разгрузку двигателя). Конденсатор при этом продолжает заряжаться и величина напряжения на нем отображает температуру двигателя. С прекращением перегрузки двигателя, ПЭ возвращается в исходное положение и резистор R10 подключается параллельно конденсатору С. Начинается процесс разряда конденсатора по экспоненциальному закону с постоянной времени, равной CR_{10} . Таким образом моделируется процесс остывания двигателя. Если горячий двигатель снова попадет в режим перегрузки, то выдержка времени заряда конденсатора до момента срабатывания защиты станет меньше, чем в первом случае. При отключении двигателя после перегрузки повторный пуск его будет разрешен по истечении времени разряда конденсатора до величины порога возврата компаратора DA3. Если к компаратору подключить положительную обратную связь, т. е. дополнительный резистор подключить между выходом и неинвертирующим входом DA3, то коэффициент возврата защиты уменьшится до величины 0,05. В этом случае, пока конденсатор полностью не разрядится, защита будет находиться в режиме запрета повторного пуска перегретого двигателя. Большинство двигателей выше 1000 В допускают два пуска с холодного состояния и один – с горячего.

Фирмой SIEMENS серийно выпускаются реле защиты двигателей от перегрузки типа 7SK2. Интегрирующим элементом этого реле является реверсивный двоичный счетчик импульсов. Прямой счет импульсов происходит при перегрузке и нагреве двигателя, а обратный при его охлаждении. Таким образом, число импульсов, зафиксированных счетчиком в любой момент времени, отображает температуру двигателя и при достижении предельно допустимой величины реле срабатывает.

8. СТАТИЧЕСКОЕ РЕЛЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОВТОРНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ

Автоматическое повторное включение (АПВ) применяется на линиях, трансформаторах и электродвигателях. Электромеханическими аналогами таких реле являются РПВ-58 – однократное АПВ и РПВ-258 – двухкратное. В микроэлектронном варианте серийно выпускаются реле типа РПВ-01 и РПВ-02, а также в комплектных защитах ЯРЭ-2201.

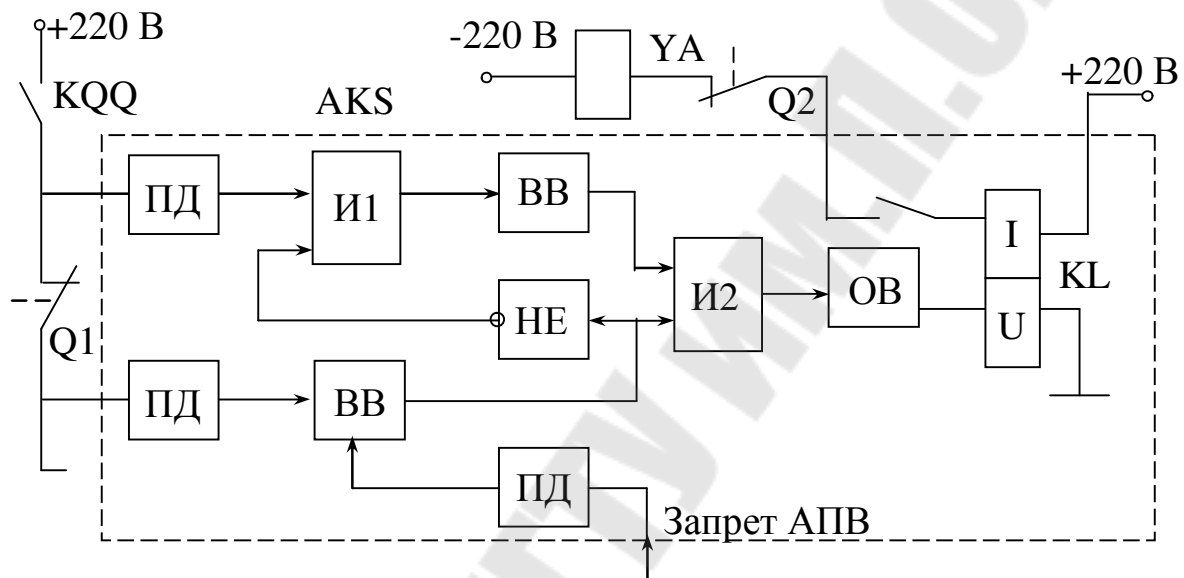


Рис. 8.1. Структурная схема реле АПВ и его подключение к цепям оперативного тока

На рис. 8.1 изображена блок-схема реле АПВ однократного действия (АКС) и схема привязки его к цепям оперативного тока подстанции. Все блоки реле АПВ выполнены на цифровых интегральных микросхемах. За основу принята серия К176 на КМОП-структуре, обладающая малым электропотреблением.

Состав и назначение блоков реле следующее:

ПД1–ПД3 – входные преобразователи дискретных сигналов, выполненные на герконовых реле (п. 3.3);

ВВ1, ВВ2 – элементы выдержек времени при срабатывании (сокращенно – реле времени);

ОВ – одновибратор;

И, НЕ – логические элементы;

KL – выходное двухобмоточное реле.

Выходное реле KL срабатывает от кратковременного импульса напряжения, поданного на его напряженческую катушку и удерживается в сработанном состоянии током, проходящим через токовую катушку I до тех пор, пока не произойдет включение выключателя (УАС – катушка включения выключателя).

Таким образом обеспечивается блокировка от многократного включения выключателя в случае его включения на устойчивое КЗ (блокировка от «прыгания»).

Внешние управляющие цепи устройства АПВ состоят из размыкающих блок-контактов Q1, Q2 выключателя (они замкнуты при отключенном положении выключателя) и замыкающего контакта реле фиксации команды включения КQQ.

Реле фиксации постоянно находится в сработанном состоянии если на выключатель была подана оперативным персоналом команда «включить» ключом управления. Оно отпадает только при подаче от ключа управления команды «отключить».

Устройство АПВ работает следующим образом. При включении выключателя контакты КQQ замкнуты, а Q1 и Q2 разомкнуты. Через ПД1 на первый вход элемента И1 приходит логическая единица (1), на втором входе при этом уже присутствует (1) от элемента НЕ. Сигнал с выхода элемента И1 запускает реле времени ВВ1, время срабатывания которого составляет 15 или 30 с, обеспечивая, тем самым, задержку готовности реле к срабатыванию. Данная задержка готовности необходима для того, чтобы при оперативном включении выключателя на устойчивое КЗ не произошла повторная подача напряжения от АПВ.

По истечении времени готовности на первый вход элемента И2 подается (1) и реле переходит в состояние дежурства.

При аварийном отключении выключателя замыкаются его блок-контакты Q1 и Q2 и собирается цепь несоответствие положение выключателя и его ключа управления. На вход ПД2 поступает напряжение, геркон ПД2 срабатывает и логическая единица подается на вход реле времени ВВ2. Через заданную в виде уставки выдержку времени на выходе ВВ2 появляется (1), которая поступает на второй вход элемента И2. При этом одновременно через элемент НЕ на второй вход И1 поступает логический нуль (0). Таким образом кратковременно на время возврата ВВ1 собирается схема совпадения И2 и на вход ОВ поступает сигнал в виде короткого импульса. Одновибратор удлиняет

этот импульс до 0,2 с, достаточного для надежного срабатывания выходного реле KL. Возвратившееся в исходное состояние реле времени ВВ1 уже не позволит многократно (если это не задано) подавать импульс на включение выключателя, обеспечивая тем самым однократность (или двухкратность) срабатывания АПВ.

В случае, если выключатель будет отключен оперативно ключом управления, то контакты КQQ размыкаются и АПВ не произойдет.

Конструктивно в реле РПВ-01(02) элементы выдержек времени ВВ1 и ВВ2 выполнены на базе двоичного 15-разрядного счетчика импульсов (микросхема К176ИЕ5) и специально предусмотренного мультивибратора.

Регулирование уставок реле производится либо изменением частоты генерируемых импульсов мультивибратора, либо изменением разрядности счетчика.

В схеме реле предусмотрен вход «Запрет АПВ». При подаче внешнего сигнала на этот вход реле времени ВВ2 блокируется, а при его снятии с заданной выдержкой времени происходит АПВ. Такой алгоритм применяют в устройствах АПВ после АЧР или АПВ с ожиданием синхронизма.

9. ЭЛЕКТРОННЫЕ РЕЛЕ В АВТОМАТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ С ОЖИДАНИЕМ ИЛИ УЛАВЛИВАНИЕМ СИНХРОНИЗМА

Такие устройства применяются в системной автоматике в случае рассинхронизации разделившихся частей энергосистемы или при включении синхронного генератора в сеть на параллельную работу.

9.1. Реле сдвига фаз в устройствах АПВ с ожиданием синхронизма

На линиях, осуществляющих межсистемную связь, устройства АПВ устанавливаются с двух концов линии. С одного конца АПВ происходит по факту отсутствия напряжения на линии, а с другого – АПВ с ожиданием синхронизма, поскольку при несинхронном включении линии появляются большие уравнивающие токи.

Серийное реле сдвига фаз типа РСФ-11 выполняет функцию контроля сдвига фаз между напряжением линии и напряжением подстанции, к которой подключается данная линия и если угол сдвига δ

одноименных фаз не превышает допустимую величину ($\delta_{\text{доп}} \leq 30 \div 40$), то реле снимает сигнал запрета с устройства АПВ.

На рис. 9.1 изображена упрощенная схема и векторная диаграмма напряжений реле сдвига фаз типа РСФ-11.

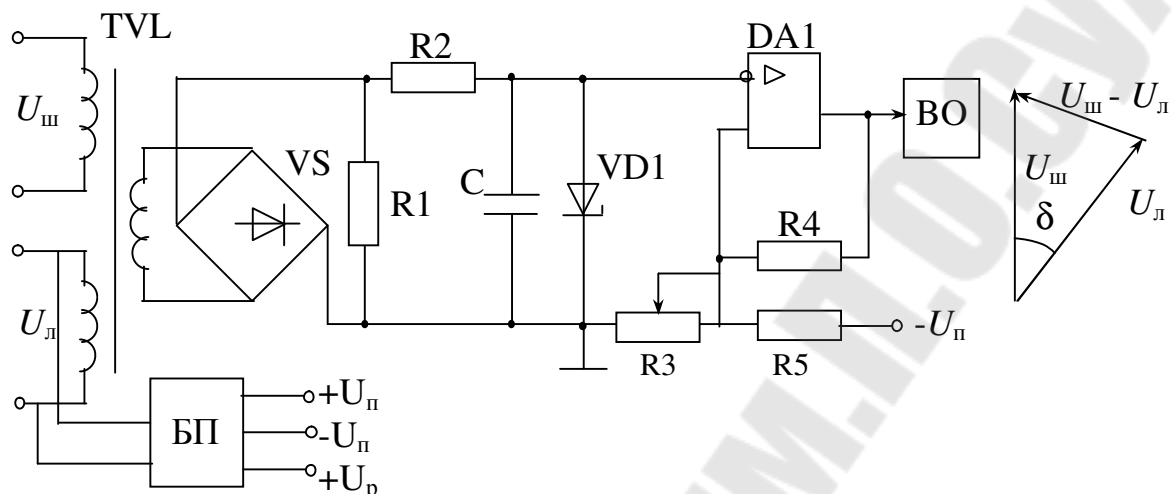


Рис. 9.1. Схема реле типа РСФ-11 и его векторная диаграмма напряжений

Реле сдвига фаз подключается к измерительным трансформаторам напряжения шин подстанции $U_{\text{ш}}$ и линии $U_{\text{л}}$ (на линии может быть использовано устройство отбора напряжения от конденсатора связи высокочастотного канала).

Для питания измерительной части реле и выходного органа ВО применяется встроенный блок питания БП, который одновременно контролирует наличие напряжения на линии (или на шинах).

Две первичные обмотки трансформатора TVL подключаются разнополярно к одноименным фазам $U_{\text{ш}}$ и $U_{\text{л}}$. С вторичной обмотки снимается напряжение, пропорциональное геометрической разности векторов $U_{\text{ш}}$ и $U_{\text{л}}$. При этом значение модуля разности векторов $U_{\text{ш}} - U_{\text{л}}$ прямопропорционально углу δ (см. рис. 9.1).

Измерительный орган реле выполнен по принципу сравнения выпрямленного и сглаженного напряжения с опорной величиной (уставкой), т. к. высокого быстродействия здесь не требуется. В качестве порогового элемента используется триггер Шмитта на операционном усилителе DA1. Принцип действия такого ИО не нуждается в дополнительных пояснениях, поскольку он подробно изложен в п. 5.1 (см. рис. 5.3).

Регулирование уставки реле выполняется ступенчатым изменением сопротивления резистора R3. Реле обеспечивает дискретное изменение уставки величины угла δ через 5° в диапазоне $20\text{--}70^\circ$.

9.2. Измерительный орган улавливания синхронизма в автоматическом синхронизаторе типа СА-1

Автоматический синхронизатор применяется на электростанциях для включения на параллельную работу мощного генератора в сеть энергосистемы. В состав синхронизатора входят множество функциональных блоков, обеспечивающих регулирование частоты вращения генератора, поддержание напряжения на заданном уровне и различные блокирующие устройства. Главным функциональным узлом синхронизатора является измерительный орган, улавливающий синхронизм напряжений системы и генератора, причем момент срабатывания ИО должен происходить с опережением на время $t_{\text{оп}}$, равное собственному времени включения выключателя генератора. Узел опережения начинает действовать, если разность частот генератора и сети не превышает 1 Гц (частота скольжения). Угол δ между вектором напряжения генератора U_g и вектором напряжения сети U_c периодически изменяется от 0 до 2π со скоростью, равной частоте скольжения. В процессе регулирования частоты генератора изменяется величина скольжения, а, следовательно, и скорость изменения угла δ . Изменение скорости во времени называется ускорением (ускорение является первой производной скорости).

Согласно уравнению движения для определения времени опережения $t_{\text{оп}}$ достаточно из величины скорости изменения угла δ вычесть его ускорение δ' . На рис. 9.2 показана диаграмма эквивалентных напряжений величины угла δ и его ускорения δ' .

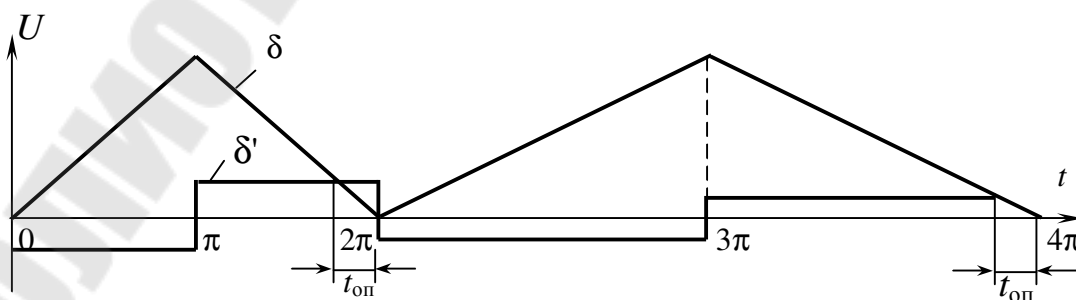


Рис. 9.2. Способ определения времени опережения

Из диаграммы видно, что в первый период изменения угла δ от 0 до 2π величина его углового ускорения $\delta' = \frac{d\delta}{dt}$ была больше, чем во втором периоде от 2 до 4π . Однако, искомое время опережения $t_{оп}$ в обоих случаях остается постоянной величиной.

Блок-схема узла опережения синхронизатора приведена на рис. 9.3.

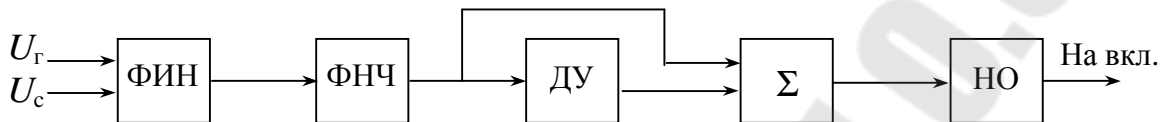


Рис. 9.3. Блок-схема узла опережения синхронизатора

На формирователь импульсов несовпадения (ФИН) (см. рис. 6.3) поступают напряжения от генератора и сети. Выходные прямоугольные импульсы несовпадения, длительность которых пропорциональна углу δ , с помощью фильтра нижних частот (ФНЧ) преобразуются в среднее напряжение, отображающее изменение угла δ во времени. Дифференцирующий усилитель (ДУ) дифференцирует это напряжение и на его выходе появляется напряжение, пропорциональное первой производной угла δ . Сумматор Σ , выполненный по типовой схеме суммирующего усилителя (см. рис. 4.8), производит фактически вычитание δ и δ' , так как дифференцирующий усилитель обладает свойством инвертирования сигнала. Появление нуля на выходе сумматора фиксируется нуль-органом (НО), который и выдает сигнал на включение генератора в сеть. Для построения схемы дифференцирующего усилителя необходимо в схеме интегрирующего усилителя поменять местами R8 и C (см. рис. 7.1). Остальные элементы блок-схемы в данной работе были рассмотрены.

9.3. Реле разности частот в устройствах включения генератора на параллельную работу методом самосинхронизации

Серийное реле разности частот типа РГР-11 применяется на генераторах малой мощности, включаемых в сеть методом самосинхронизации. Применение данного метода возможно при условии, что уравнивающий ток включения не превысит $3,5I_{ном.г.}$ Для выполнения

данного условия разность частот генератора и сети не должна превышать $\pm 0,5$ Гц.

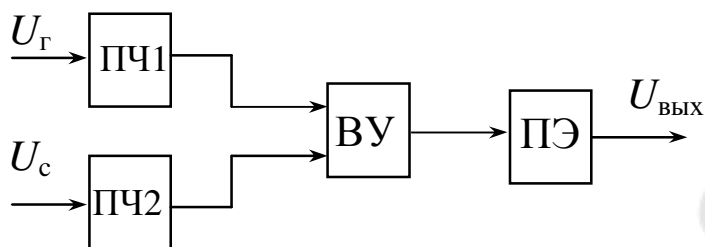


Рис. 9.4. Блок-схема измерительного органа реле разности частот: ПЧ1, ПЧ2 – преобразователи частоты в обратно пропорциональное напряжение; ВУ – вычитающий усилитель; ПЭ – пороговый элемент

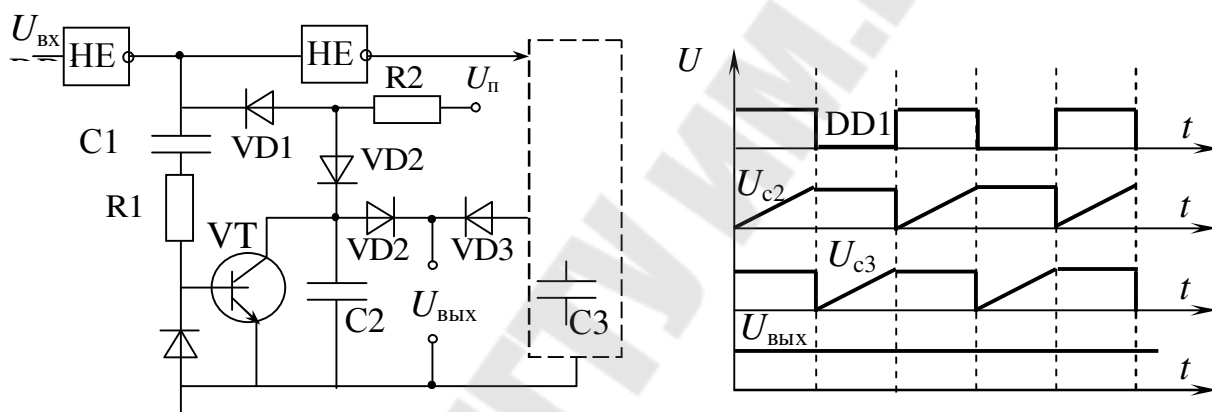


Рис. 9.5. Схема контура памяти преобразователя частоты и его времяимпульсная диаграмма

Преобразователь частоты состоит из двухтактного контура памяти, принципиальная схема одной половины которого приведена на рис. 9.5. На вход схемы через элемент HE подается контролируемое напряжение, преобразованное в прямоугольные импульсы. В момент фронта положительного импульса через дифференцирующую цепь $R1C1$ кратковременно проходит зарядный ток, открывающий транзисторный ключ VT1, и происходит быстрый разряд конденсатора C2. Затем транзистор закрывается и конденсатор заряжается от источника напряжения $+U_{\Pi}$ через резистор R2 и открытый диод VD2. При этом диод VD1 в течение длительности положительного полупериода закрыт обратным напряжением. По окончании положительной полуволны на выходе DD1 появляется нуль. Диод VD1 открывается, а VD2 закрывается обратным для него напряжением и конденсатор C2

переходит в режим хранения напряжения U_{c2} до поступления следующего положительного импульса. Вторая часть контура памяти, изображенная штрихпунктирными линиями, с конденсатором СЗ работает аналогично, но только в другой полупериод.

Диоды VD3 и VD4 образуют макси-селектор. Выходное напряжение ($U_{\text{вых}}$) макси-селектора в любой момент времени равно максимальному значению из двух сравниваемых напряжений U_{c2} и U_{c3} (см. рис. 9.5).

Если частота входного напряжения уменьшится, то длительности полупериодов возрастут и соответственно продолжительности времени заряда конденсаторов увеличатся и, как следствие, возрастет напряжение $U_{\text{вых}}$. Таким образом, величина выходного напряжения преобразователя находится в обратно пропорциональной зависимости от частоты.

Выходные напряжения от двух преобразователей ПЧ1 и ПЧ2 поступают на вычитающий усилитель ВУ (рис. 9.4). Схемы вычитающих усилителей, собранных на базе операционных усилителей, приведены на рис. 4.5. Для применения их в данном реле необходимо заменить конденсаторы на резисторы и разделить входы.

Выходное напряжение ВУ, пропорциональное разности частот, подается на пороговый элемент ПЭ и сравнивается с его уставкой. Если $\Delta f \leq \pm 0,5$ Гц, то ПЭ срабатывает и включает генератор.

10. ЛОГИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ ЭЛЕКТРОННЫХ АВТОМАТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

Логическая часть (ЛЧ) автоматического устройства (см. рис. 3.1) получает информацию, в общем случае, от нескольких измерительных органов в виде дискретных сигналов. Например, комплектная защита и автоматика линии 110 кВ имеет 2 вида защит: дистанционная и направленная токовая нулевой последовательности, причем каждая защита имеет по 3 или 4 ступени, а только одна ступень дистанционной защиты содержит 2–3 реле сопротивления. Кроме того, в комплект входит устройство АПВ, делительная автоматика, сигнализация и т. д. Сигналы от всех измерительных органов поступают в логическую часть, где выполняются по определенному алгоритму логические операции И, ИЛИ, НЕ, «Задержки» и «Памяти».

При выполнении защиты отдельными реле логические операции выполняются с помощью контактов нескольких промежуточных реле, реле времени и указательных реле.

В комплектных микроэлектронных защитах для этих целей применяются логические цифровые микросхемы (обычно высокопороговой серии типа К511), элементы задержки и RS-триггеры для сигнализации. Причем все измерительные органы защит не имеют выходных электромеханических реле, дискретные сигналы от них поступают в виде напряжений – логическая единица (1) или логический нуль (0). Выходной орган с электромеханическим реле применяется один или два на весь комплект защиты. При этом упрощается ЛЧ, уменьшаются массогабаритные показатели устройства и, что особенно важно, появляется возможность в условиях эксплуатации производить диагностический контроль исправности комплекта защиты в целом.

10.1. Элементы задержки при срабатывании и возврате

Элементы задержки сигналов на заданную выдержку времени (не более 4 с) применяются в измерительных органах защиты и ЛЧ. Они разделяются на элемент задержки при срабатывании и элемент задержки при возврате. На рис. 10.1 показаны времяимпульсные диаграммы напряжений и условные графические изображения элементов задержек.

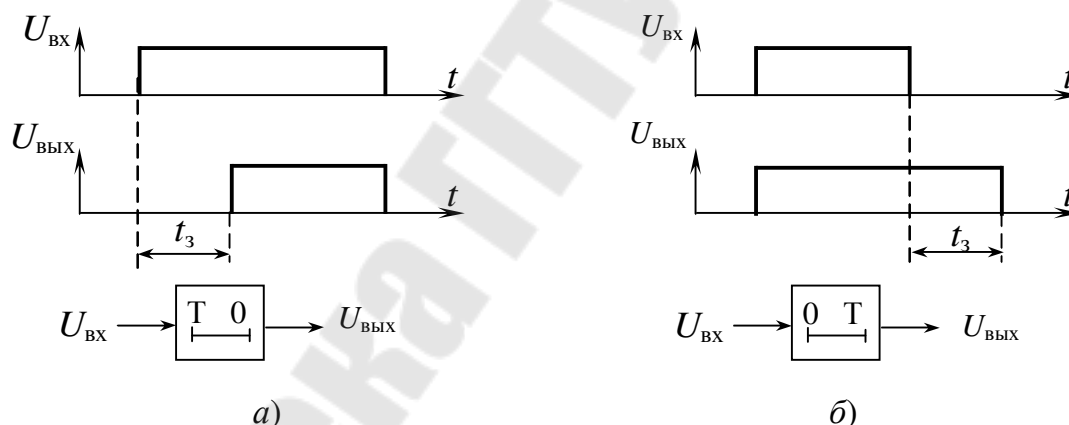


Рис. 10.1. Условные изображения и времяимпульсные диаграммы элементов задержек: а) при срабатывании; б) при возврате

Поскольку элементы задержки в основном применяются в комплектных защитах, они должны обеспечивать погрешность заданных выдержек времени не более $\pm 3\%$ в диапазоне температуры окружающей среды от 0 до $+40\text{ }^\circ\text{C}$ и при колебаниях питающего напряжения от 0,8 до $1,1U_{\text{ном}}$.

Рассмотрим принципиальные схемы наиболее часто применяемых элементов задержек (рис. 10.2).

Элемент задержки при срабатывании работает следующим образом (рис. 10.2, а).

На вход схемы ($U_{\text{вх}}$) поступает сигнал от ИО в виде разнополярных напряжений, например, триггера Шмитта. В исходном состоянии входное напряжение отрицательное $U_{\text{вх}} = U_{\text{нас}}^-$, диоды VD1 и VD2 при этом открыты, а конденсатор С полностью разряжен. На входы компаратора на операционном усилителе DA1 приходит положительное опорное напряжение $U_{\text{оп}}$, снимаемое с делителя R3, R4, и напряжение с конденсатора. На выходе DA1 напряжение близкое к нулю, поскольку питание операционного усилителя осуществляется напряжением $0 - (+U_{\text{п}})$. С помощью сопротивления R4 выставляют уставку по времени срабатывания.

При появлении на входе положительного напряжения $U_{\text{вх}} = U_{\text{нас}}^+$ оба диода закрываются и конденсатор начинает заряжаться от источника питания $+U_{\text{п}}$ с постоянной времени $\tau = CR_2$.

При достижении напряжения заряда на конденсаторе величины $U_{\text{оп}}$, компаратор срабатывает и на его выходе устанавливается напряжение $U_{\text{вых}} = U_{\text{нас}}^+$.

Значение выдержки времени определяется по выражению

$$t_3 = \tau \ln \frac{U_{\text{п}}}{U_{\text{п}} - U_{\text{оп}}}.$$

При колебаниях напряжения $U_{\text{п}}$ величина t_3 не изменяется, так как одновременно в пропорциональной зависимости изменяется $U_{\text{оп}}$.

При возврате элемента задержки ($U_{\text{вх}} = U_{\text{нас}}^-$) конденсатор быстро разряжается через малое сопротивление R1 и устройство снова готово к действию.

На рис. 10.2, б изображена схема элемента задержки при возврате. Принцип действия ее аналогичен.

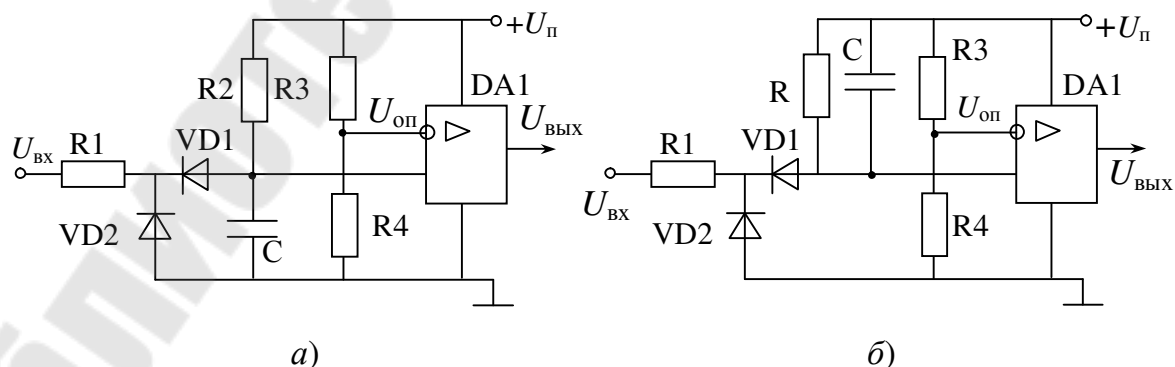


Рис. 10.2. Принципиальные схемы элементов задержек:
а) при срабатывании; б) при возврате

В исходном состоянии на вход схемы подается положительное напряжение $U_{\text{вх}} = U_{\text{нас}}^+$. Диоды VD1 и VD2 при этом закрыты, а конденсатор С разряжен и на его нижней обкладке присутствует напряжение практически равное $+U_{\text{п}}$. Компаратор DA1 находится в положении $U_{\text{вых}} \approx 0$.

При подаче на вход схемы отрицательного напряжения $U_{\text{вх}} = U_{\text{нас}}^-$, оба диода открываются, компаратор срабатывает и конденсатор быстро заряжается через малое сопротивление R1 до напряжения источника питания. При изменении знака входного напряжения $U_{\text{вх}} = U_{\text{нас}}^+$ диоды закрываются, но конденсатор остается заряженным и компаратор не изменяет своего положения. С этого момента начинается разряд конденсатора на сопротивление R2 и когда напряжение на нем сравнивается с $U_{\text{оп}}$ происходит возврат компаратора в исходное состояние. Таким образом, данный элемент мгновенно срабатывает при подаче сигнала на вход схемы и возвращается с заданной выдержкой времени после снятия сигнала. По существу этот элемент задержки не что иное, как одновибратор с перезапуском. Его можно использовать как расширитель импульса, например, в схеме (см. рис. 8.1) или как преобразователь периодических коротких импульсов в непрерывный сигнал.

Рассмотренные устройства задержки могут управляться логическим элементом цифровой микросхемы. Поскольку в этом случае отрицательное напряжение на вход не подается, то диоды VD2 в обеих схемах не нужны.

10.2. Электронные реле времени и промежуточные реле

Электронные реле времени типов РВ-01 и РВ-03 выпускаются в отдельных корпусах взамен реле времени с часовым механизмом серии

ЭВ-100 и ЭВ-200, соответственно. Кроме того выпускаются электронные промежуточные реле серии РП-18 взамен РП-250 с демпфирующими медными шайбами, предназначенными для замедления срабатывания или возврата.

Электронные блоки указанных реле выполнены по однотипным схемам, отличающимся диапазоном уставок и способом их регулирования: у реле РВ – дискретное с t_3 до 30 с, а у РП – плавное до 2 с.

Рассмотрим схему электронного блока реле с замедлением при срабатывании (рис. 10.3).

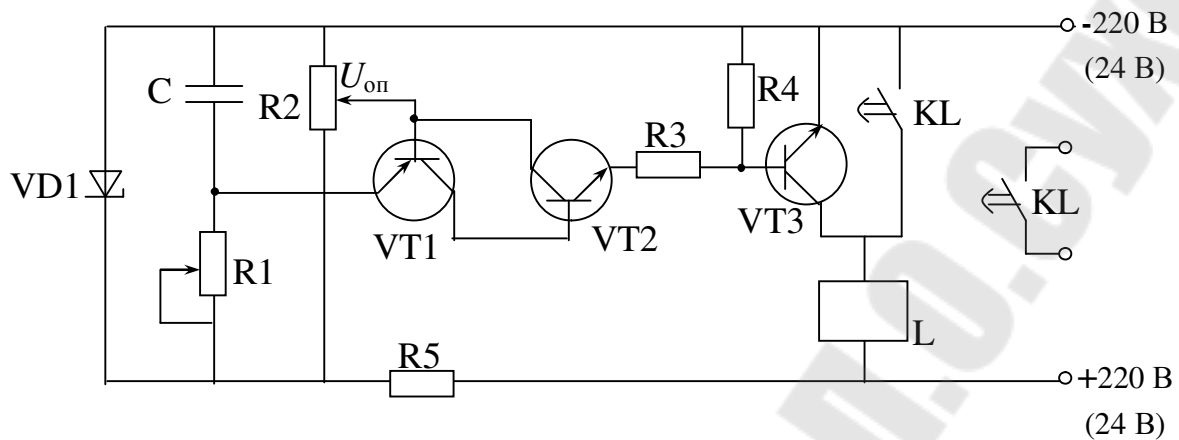


Рис. 10.3. Схема реле РВ-01 и РП-18-2 с замедлением при срабатывании

На транзисторах VT1 и VT2 собран аналог тиристора. При включении оперативного напряжения в первый момент конденсатор C разряжен, на р-п переход база-эмиттер VT1 подается обратное напряжение ($U_{оп} > U_c$) и в результате все транзисторы закрыты. Конденсатор начинает заряжаться через резистор R1 до напряжения стабилизации стабилитрона VD1. Через заданную выдержку времени t_3 напряжение U_c станет больше $U_{оп}$, транзистор VT1 откроется, током его коллектора открывается VT2, а VT1 удерживается в открытом состоянии током коллектора VT2 (взаимная подпитка). Конденсатор разряжается через R3 и переход база-эмиттер транзистора VT3. Последний открывается, срабатывает выходное реле KL типа РП-13 и своими контактами становится на самоподпитку. После отключения напряжения реле без дополнительного замедления возвращается, конденсатор полностью разряжается и реле готово к повторному срабатыванию с выдержкой времени, которое регулируется сопротивлением R1 (плавно или ступенчато).

Рассмотрим схему реле с замедлением при отключении, применяемую в реле РВ-03 (рис. 10.4).

Напряжение оперативного питания $U_{п}$ может быть как переменное, так и постоянное. В данной схеме применяется двухпозиционное реле KL, сердечник которого обладает высокой остаточной намагниченностью.

На выходах элементов схемы (см. рис. 10.5) показаны логические сигналы «1» или «0» без скобок в исходном состоянии, а в скобках для случая отказа реле КАЗ при КЗ в зоне действия реле КА2. В данном случае собирается схема совпадения И1, логическая «1» проходит через элемент ИЛИ1, срабатывают элемент памяти (RS-триггер) и реле КЛ1.

Ложное срабатывание любого из реле тока КА определяется с помощью элемента задержки при срабатывании ЗС, уставка которого равна максимальной длительности аварии на защищаемой линии. Поэтому, если длительность логической «1» на выходе элемента ИЛИ2 превышает уставку ЗС, то это свидетельствует о возникновении дефекта, приводящего к ложному срабатыванию реле тока.

Встроенный блок тестового контроля состоит из генератора гармонических колебаний с частотой 50 Гц, кнопки, с помощью которой подается сигнал от генератора на входные компараторы всех реле тока, а также дешифратора с сигнальными светодиодами. При нажатии кнопки срабатывают реле тока и по истечении установленных выдержек времени на дешифратор поступают сигналы в последовательности: в начале от 1-й, затем от 2-й и 3-й ступеней защит. При этом загорается светодиод «Тест исправен». В случае нарушения указанной последовательности или отсутствии одного из сигналов загорается светодиод «неисправность».

Дефектный измерительный орган или орган выдержки времени определяется по состоянию светодиодов, расположенных на лицевых панелях блоков реле. Ремонт и настройку блоков производят либо в лаборатории, либо на месте, используя осциллограф для измерения сигналов в контрольных точках.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гельфанд, Я. С. Релейная защита распределительных сетей / Я. С. Гельфанд – М. : Энергоатомиздат, 1987.
2. Лысенко, Е. В. Функциональные элементы релейных устройств на интегральных микросхемах / Е. В. Лысенко. – М. : Энергоатомиздат, 1990.
3. Линт, Г. Э. Серийные реле защиты, выполненные на интегральных микросхемах / Г. Э. Линт. – М. : Энергоатомиздат, 1990.
4. Андреев, В. А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения / В. А. Андреев. – М. : Высшая школа, 1991.
5. Шуляк, В. Г. Расчет измерительных органов релейной защиты энергосистем. – М. : Издательство МЭИ, 1991.
6. Овчаренко, Н. И. Элементы автоматических устройств энергосистем. – М. : Энергоатомиздат, 1995.
7. Чернобровов, Н. В. Релейная защита энергетических систем / Н. В. Чернобровов, В. А. Семенов. – М. : Энергоатомиздат, 1998.

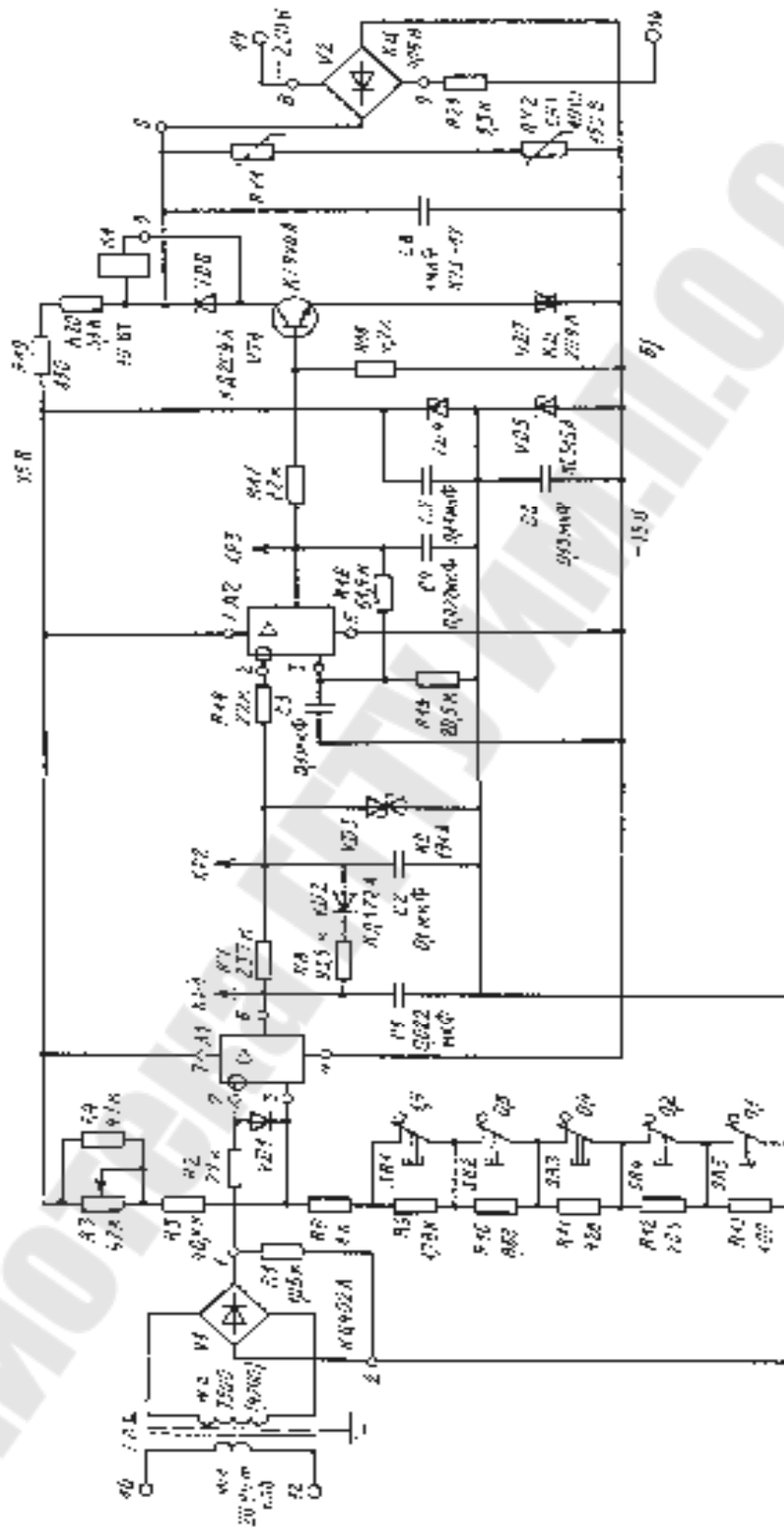


Рис. П.1.1. Принципиальная схема статического реле тока серии РСТ13

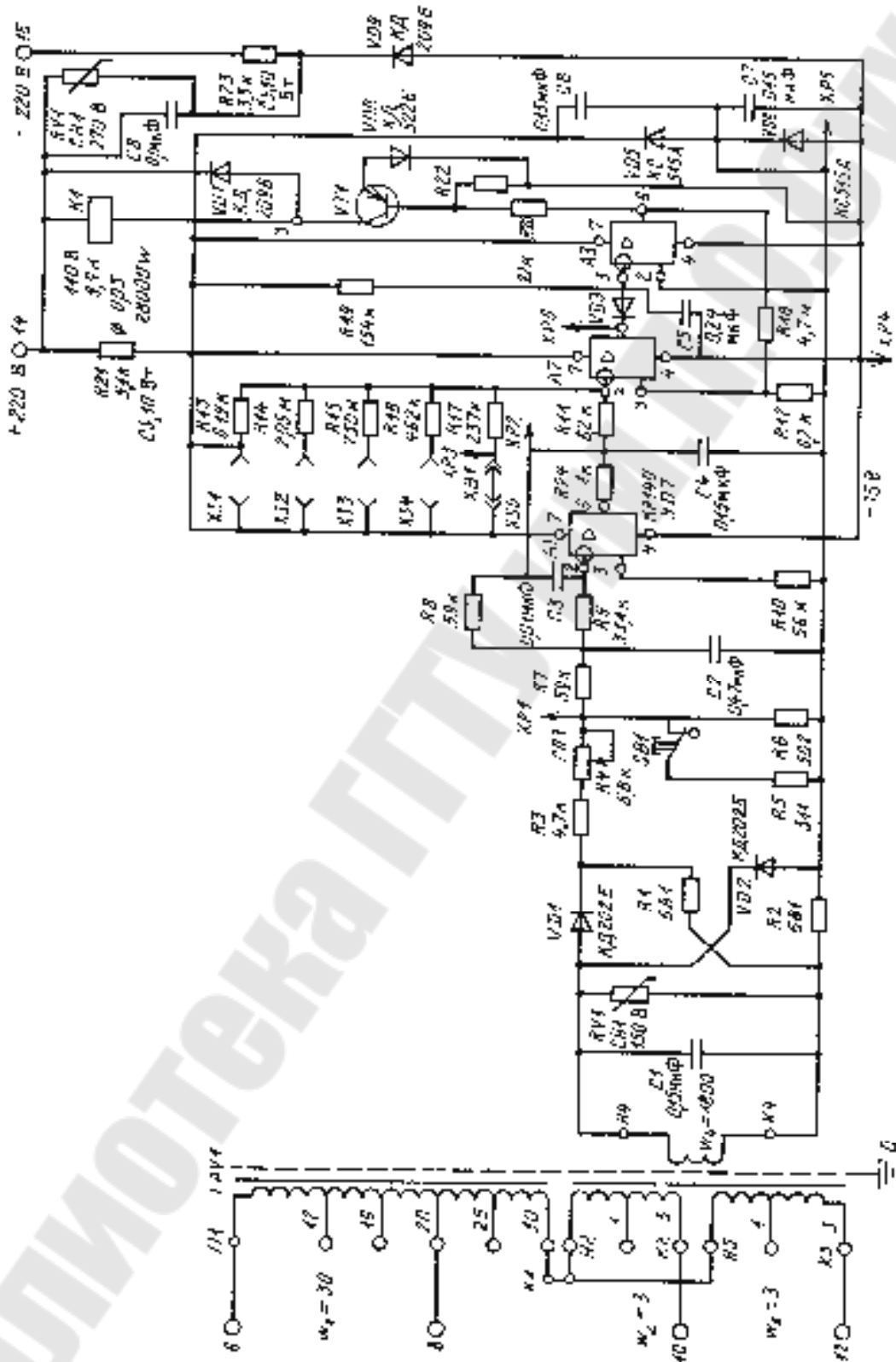


Рис. П.2.1. Принципиальная схема дифференциального реле тока серии РСТ-15

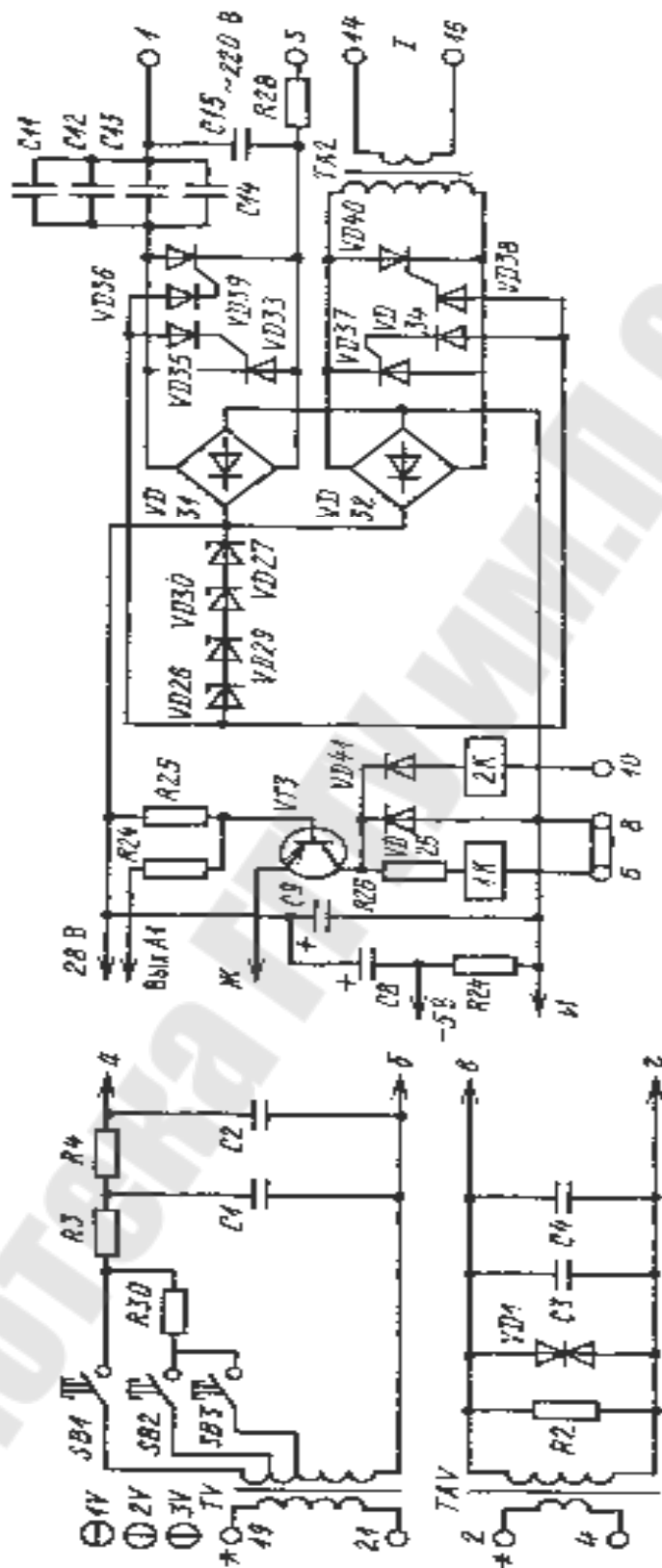


Рис. П.4.1. Схемы датчика тока (напряжения) и комбинированного блока питания реле РМ-11 переменным оперативным током

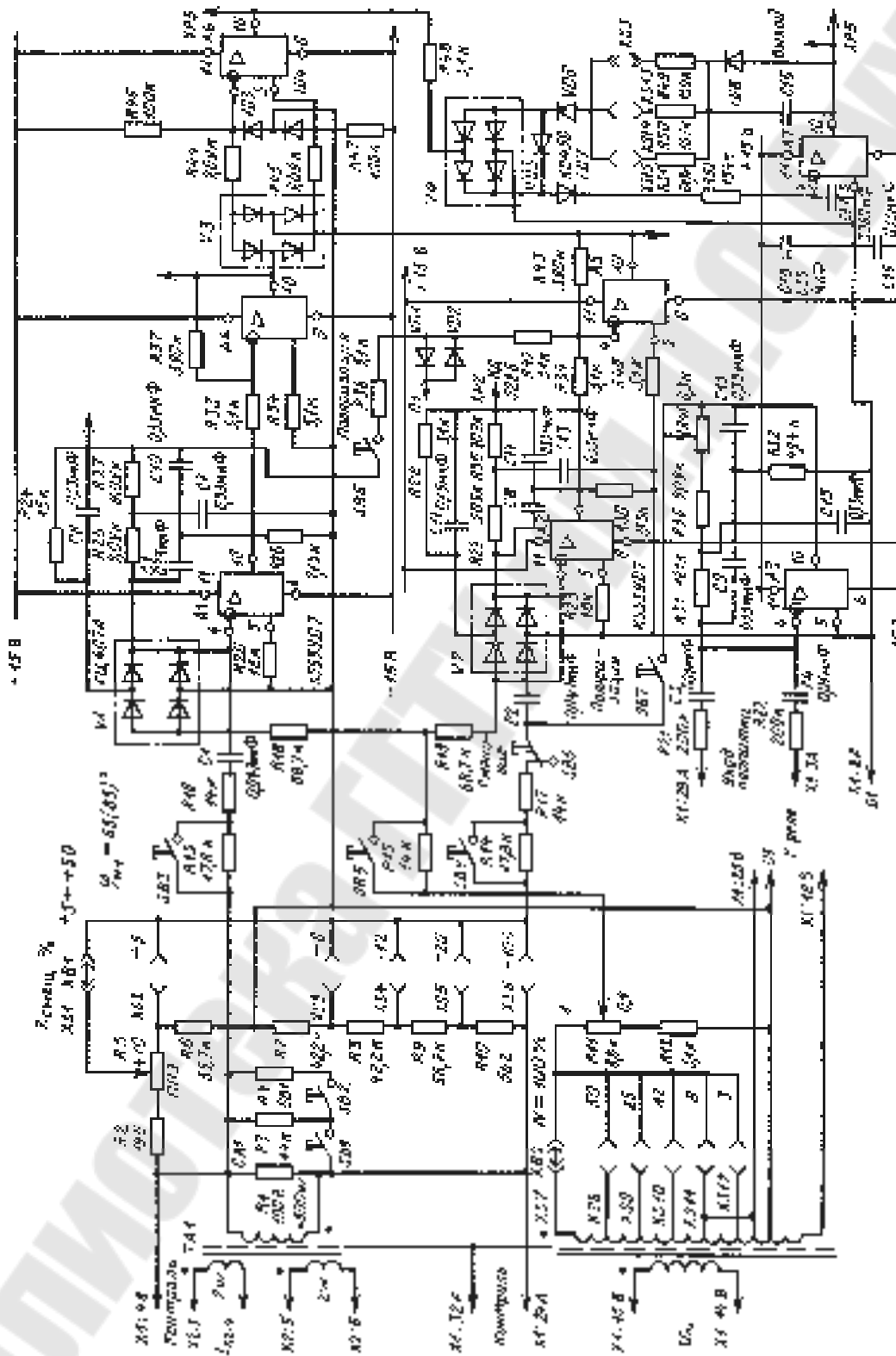


Рис. П.5.1. Принципиальная схема реле сопротивления типа БРЭ-2801

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
1. Краткая характеристика автоматических устройств систем электроснабжения	4
2. Влияние помех на электронные устройства и типовые испытания на помехозащищенность.....	7
3. Состав и назначение отдельных блоков электронных автоматических устройств.....	11
3.1. Блоки питания	12
3.2. Выходные релейные органы.....	16
3.3. Входные преобразователи аналоговых и дискретных сигналов	17
4. Преобразователи информационных сигналов электронных устройств	21
4.1. Частотные фильтры.....	21
4.2. Макси- и мини-селекторы	23
4.3. Фазоповоротные цепи.....	24
4.4. Фильтры симметричных составляющих.....	28
5. Принципы построения измерительных органов с одной подведенной величиной	30
5.1. Реализация простых измерительных органов релейного действия	32
5.2. Унифицированный измерительный орган статических реле тока и напряжения	35
5.3. Измерительный орган дифференциального реле тока.....	39
6. Принципы построения измерительных органов с двумя подведенными величинами.....	44
6.1. Электронное реле направления мощности в комплектных защитах.....	46
6.2. Направленное реле защиты нулевой последовательности в сетях с малым током замыкания на землю	49
6.3. Реле сопротивления и принципы его построения на микроэлектронной элементной базе.....	51
6.4. Устройство блокировки дистанционных защит при качаниях в энергосистеме	55

7. Токовое реле защиты с обратозависимой от тока характеристикой срабатывания	57
8. Статическое реле автоматического повторного включения	62
9. Электронные реле в автоматических устройствах с ожиданием или улавливанием синхронизма.....	64
9.1. Реле сдвига фаз в устройствах АПВ с ожиданием синхронизма	64
9.2. Измерительный орган улавливания синхронизма в автоматическом синхронизаторе типа СА-1	66
9.3. Реле разности частот в устройствах включения генератора на параллельную работу методом самосинхронизации.....	67
10. Логическая часть электронных автоматических устройств....	69
10.1. Элементы задержки при срабатывании и возврате.....	70
10.2. Электронные реле времени и промежуточные реле	72
10.3. Диагностический контроль исправности комплектных микроэлектронных защит	74
Литература.....	77
Приложение 2.....	79
Приложение 3.....	80
Приложение 4.....	81
Приложение 5.....	82

Учебное электронное издание комбинированного распространения

Учебное издание

ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

**Курс лекций
для студентов специальности 1-43 01 03
«Электроснабжение»
дневной и заочной форм обучения**

Автор-составитель: **Курганов Владимир Васильевич**

Редактор

Л. Ф. Теплякова

Компьютерная верстка

Н. В. Широглазова

Подписано в печать 13.09.06.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.

Ризография. Усл. печ. л. 5,10. Уч. - изд. л. 5,24.

Изд. № 96.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Издательский центр Учреждения образования

«Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого».

ЛИ № 02330/0133207 от 30.04.2004 г.

246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.

E-mail: ic@gstu.gomel.by

<http://www.gstu.gomel.by>