

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Амурский государственный университет»

Н.С. Бодруг

ЭЛЕМЕНТЫ АВТОМАТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

Учебное пособие

Благовещенск
Издательство АмГУ
2013

Разработаны в рамках реализации гранта «Подготовка высококвалифицированных кадров в сфере электроэнергетики и горно-металлургической отрасли для предприятий Амурской области» по заказу предприятия-партнера ОАО «Гидроэлектромонтаж»

Рецензенты:

Воякин Сергей Николаевич, канд. техн. наук, доцент, декан энергетического факультета ФГБОУ ВПО «Дальневосточный государственный аграрный университет»

Татьяна Юрьевна Ильченко, инженер ПТО ОАО «Гидроэлектромонтаж»

Бодруг Н.С.

Э45 Элементы автоматических устройств: учебное пособие / сост.: Н.С. Бодруг. – Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2013. – 111 с.

Учебное пособие содержит теоретические сведения по общему курсу «Элементы автоматических устройств». Рассмотрены функциональные элементы устройств автоматического и автоматизированного управления в электроэнергетике, их характеристики, предъявляемым к ним требования. После каждой темы указаны задания для усвоения материала, его закрепления и проверка остаточных знаний. Каждый модуль закрывается тестовыми вопросами.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению 140400.62 «Электроэнергетика и электротехника» для профиля «Релейная защита и автоматика энергетических систем» изучающих дисциплину: «Элементы автоматических устройств».

В авторской редакции.

ББК31.27-05Я73

ПРЕДИСЛОВИЕ

Дисциплина «Элементы автоматических устройств» предназначена для студентов, обучающихся по направлению 140400.62 «Электроэнергетика и электротехника» профиля «Релейная защита и автоматика энергетических систем».

Дисциплина преподается на четвертом курсе, в седьмом семестре. Запланировано 14 часов лекций, 28 часов практических занятий, 14 часов лабораторных занятий, 16 часов отведено на самостоятельную работу студента, 36 часов на курсовую работу, общая трудоемкость дисциплины 108 часов (3 зет).

Цель преподавания дисциплины является изучение автоматических устройств, функционирующих на основе переработки и использования информации о состоянии электроэнергетических управляемых объектов, о возмущающих воздействиях на них и о состоянии процесса производства, передачи и распределения энергии.

Задачами дисциплины является изучение вопросов применения современных технических средств автоматического управления и защиты электроэнергетических систем.

Дисциплина «Элементы автоматических устройств» входит в профессиональный цикл, базовую часть – Б.3.В.ДВ.6.1.

В лекционном курсе в целостной форме обобщаются полученные ранее знания по математике, физике, теоретическим основам электротехники, промышленной электронике, теории автоматического управления (регулирования). На базе этого рассматриваются принципы действия схем и характеристики функциональных элементов автоматических устройств сбора, передачи, отображения и ввода в цифровые управляющие ЭВМ информации и автоматических устройств управления и защиты электроэнергетических систем.

В результате освоения дисциплины обучающийся должен демонстрировать следующие результаты образования:

1) Знать: структуры схем автоматики, современную и перспективную элементную базу устройств релейной защиты и автоматики (ПК-9, ПК-11).

2) Уметь: применять, эксплуатировать схемы автоматики; производить выбор элементной базы устройств автоматики (ПК-15).

3) Владеть: методами анализа и синтеза систем автоматического и автоматизированного управления электроэнергетическими системами; методами построения и анализа численных и аналоговых моделей САУ и контроля (ПК-15, ПК-39).

В процессе освоения данной дисциплины студент формирует и демонстрирует следующие профессиональные компетенции:

ПК-9 - способность разрабатывать простые конструкции электроэнергетических и электротехнических объектов.

ПК-11 – способность использовать методы анализа и моделирования линейных и нелинейных электрических цепей постоянного и переменного тока.

ПК-15 – способность рассчитывать схемы и элементы основного оборудования, вторичных цепей, устройств защиты и автоматики электроэнергетических объектов.

ПК-39 – с готовностью изучать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования.

ВВЕДЕНИЕ

Курс «Элементы автоматических устройств» является одним из важнейших. Его влияние на студента очень велико. Дисциплина «Элементы автоматических устройств» занимает важное место в учебном процессе.

Современные энергетические системы относятся к наиболее сложным большим автоматизированным системам, созданным человеком.

Задачи производства, распределения электроэнергии, надежность электроснабжения решаются комплексом автоматических устройств, функционирующих на основе переработки и использования информации о состоянии электроэнергетических управляемых объектов, о возмущающих воздействиях на них и о состоянии процесса производства, передачи и распределения электроэнергии в целом. Несмотря на большое их разнообразие они функционируют на общих принципах как информационные технические средства. Поэтому изучение дисциплины «Элементы автоматических устройств» целесообразно для специальности «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем».

Материал в учебном пособии расположен по тематическому принципу с выделением модулей и тем, в которых раскрыто содержание каждой из них. После каждой темы включены задания для усвоения материала, его закрепления и проверка остаточных знаний. Модуль закрывается тестовыми вопросами.

В курсе большое внимание уделено функциональным элементам устройств автоматического и автоматизированного управления в электроэнергетике, их характеристикам: предъявляемым к ним требованиям; пассивным и активным преобразователям параметров режима электроэнергетической системы; элементам измерительной логической части устройств релейной защиты и автоматики электроэнергетических систем.

МОДУЛЬ 1

«СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА ЭЛЕМЕНТОВ АВТОМАТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ»

Тема 1.1. Автоматические системы, устройства и функциональные элементы

План.

1. Автоматическое управление производством и распределением электроэнергии.
2. Автоматическое управление как информационный процесс.
3. Сигналы автоматических устройств.
4. Функциональные части и элементы автоматических устройств.

1. Автоматическое управление производством и распределением электроэнергии.

Технологический процесс производства и распределения электроэнергии представляет собой упорядоченное взаимодействие совокупности энергетических объектов: турбо- и гидрогенераторов, линий электропередачи, трансформаторов и других машин и аппаратов. Процесс характеризуется определенным *алгоритмом функционирования*. Выполнение алгоритма функционирования обеспечивается путем организующего воздействия на них извне, направленного на выработку и распределение электроэнергии надлежащего качества при наименьшей ее себестоимости. Такое целенаправленное воздействие представляет собой управление процессом производства и распределения электроэнергии.

Взаимодействующие энергетические объекты, подвергающиеся целенаправленным воздействиям, называются *управляемыми объектами*. Целенаправленные воздействия на управляемые объекты определяются *алгоритмом управления*. Управление, осуществляемое без непосредственного участия человека и сознательно направленное на выполнение алгоритма

управления, называется *автоматическим управлением*. При автоматическом управлении процессом производства воздействия на управляемые объекты OU , направленные на выполнение алгоритма управления, осуществляет *автоматическая управляющая система АУС* (рис. 1.1.1). Роль человека (оператора Op) сводится к предопределению порядка действия, наладке, включению, наблюдению за правильностью работы управляющей системы [1].

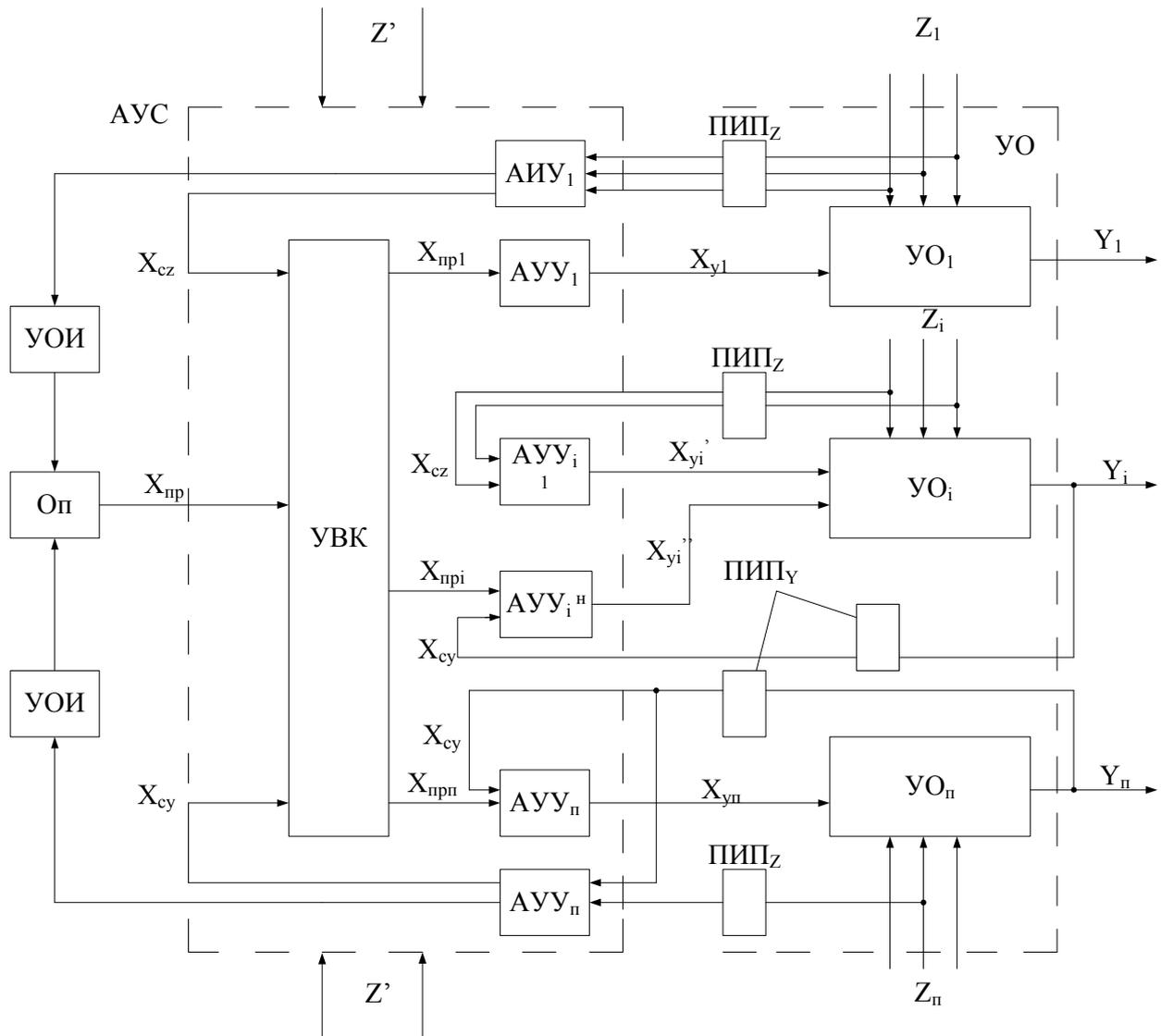


Рис 1.1.1. Структурная схема автоматической системы управления производством и распределением электроэнергии

Воздействия X_y , оказываемые управляющей системой на управляемые объекты, называют *управляющими воздействиями*.

От управляемых объектов на управляющую систему поступают *контрольные воздействия*. Такие воздействия являются внутренними. Автоматическая управляющая система и управляемые объекты подвергаются внешним воздействиям. Воздействия $X_{пр}$ на вход управляющей системы, например со стороны человека, могут быть названы входными *программными воздействиями*. Воздействия Z внешней среды на управляемые объекты и управляющую систему, непредвиденные (случайные), мешающие выполнению алгоритмов управления и функционирования, представляют собой *возмущающие воздействия*.

Назначение автоматической управляющей системы - обеспечить технически правильное и экономически целесообразное протекание процесса производства при наличии возмущающих воздействий. Основными задачами автоматического управления являются: управление отдельными производственными операциями и отдельными управляемыми объектами, координирование производственных операций в сложном процессе производства и распределения электроэнергии, обеспечение технической и экономической оптимизации процесса производства и распределения электроэнергии [2].

Для осуществления автоматического управления необходим комплекс автоматических управляющих устройств. Под *автоматическим управляющим устройством* понимается устройство, управляющее без непосредственного участия человека отдельной операцией или отдельным управляемым объектом процесса производства, например устройства $AУУ_1$ и $AУУ_n$ управляющие объектами $УО_1$ и $УО_n$ соответственно. Автоматические управляющие устройства следует рассматривать, как составные части *автоматической управляющей системы*. Автоматическая управляющая система обеспечивает необходимое взаимодействие управляемых объектов в сложном процессе производства и распределения электроэнергии. На управляющую систему возлагается и задача определения наилучшего (оптимального) в техническом и экономическом отношении протекания процесса производства и

распределения электроэнергии. Поэтому автоматическая управляющая система в целом осуществляется на основе управляющего вычислительного комплекса УВК, управляющего автоматизированными объектами, т.е. управляемыми объектами вместе с их управляющими устройствами. Выходные управляющие воздействия УВК являются программными $X_{прi}$ воздействиями автоматических управляющих устройств, например входное воздействие $X_{пр1}$ устройства $AУУ_1$ [1].

2. Автоматическое управление как информационный процесс.

Общие принципы управления техническими процессами составляют предмет специальной науки - *технической кибернетики*, включающей общую математическую теорию управления техническими объектами на основе *получения, передачи, переработки и использования информации*. Информация как обобщенное понятие получения сведений о состоянии объектов материального мира, упорядоченного отражения объективных причинно-следственных связей объективно существующей реальности рассматривается как один из аспектов материи. Получение и передача информации возможны только путем энергетического взаимодействия между ее источниками, измерительными преобразователями и другими элементами информационных устройств.

Названные воздействия в автоматической управляющей системе (программное, контрольное, управляющее) могут рассматриваться как носители соответствующих сигналов. Поэтому можно говорить, что контрольные воздействия являются носителями *измерительной информации* о состоянии управляемого объекта. Программное и управляющее воздействия представляются носителями соответственно *программной* и *командной информации* [2].

Для функционирования автоматического управляющего устройства необходима измерительная информация только об управляемом объекте. Для функционирования автоматической управляющей системы в целом, для выработки программной информации для автоматических управляющих

устройств необходима информация о протекании процесса производства и распределения электроэнергии в целом. Поэтому в автоматическую управляющую систему входят *автоматические информационные устройства АИУ* (см. рис. 1.1.1). Передаваемая ими информация вводится в управляющий вычислительный комплекс или через устройства отображения информации *УОИ* доводится до сознания человека (оператора). Взаимодействующая совокупность автоматических информационных устройств, входящих в автоматическую управляющую систему, может быть названа *автоматической информационной системой*.

Информация об управляемых объектах, состояние которых характеризуется их выходными величинами $Y_1 - Y_n$ и определяется возмущающими воздействиями $Z_1 - Z_n$, поступает в автоматические устройства *АУУ*, *АИУ* в виде сигналов X_{cY} , X_{cZ} от первичных измерительных преобразователей *ПИП_Y*, *ПИП_Z* управляемых объектов.

Возмущающие воздействия Z^1 на автоматическую управляющую систему *АУС* являются источниками *помех*, искажающих *сигналы*. Поэтому на входе и выходе автоматических устройств всегда имеет место смесь сигналов и помех. Главной задачей технических устройств автоматической управляющей системы является достаточно точное обеспечение требуемого соответствия между входным и выходным сигналами при наличии помех. Названная главная задача определяет специфику технических устройств автоматического управления. Если для технических устройств, являющихся управляемыми объектами, первостепенное значение имеет *энергетическая сторона* происходящих в них процессов, то для технических устройств автоматического управления первостепенное значение имеет *информационная сторона* процессов. При прохождении сигналов через автоматические устройства может меняться форма или физическая природа сигналов, но *должна сохраняться информация*. Управляющие воздействия X_y на объекты должны соответствовать информации об их состояниях и программной информации [8].

3. Сигналы автоматических устройств.

Вид сигналов. В автоматических устройствах управления производством и распределением электроэнергии используются электрические сигналы. В соответствии с природой информации *электрический сигнал* должен рассматриваться как *электромагнитный процесс со случайно изменяющимися параметрами* (случайный электромагнитный процесс). *Информация появляется и передается при случайных изменениях параметров электромагнитного процесса, которым ставится в соответствие определенный смысл.* Электромагнитный процесс с неизменяющимися параметрами служит несущим процессом; *Изменяющиеся параметры* процесса называются *информационными*, или представляющими сигнал, параметрами. Характерным электрическим сигналом является случайно изменяющийся постоянный ток (рис. 1.1.2, а) или переменный, в частности синусоидальный ток с изменяющейся амплитудой, фазой или частотой (рис. 1.1.3). Значение постоянного тока, амплитуда, фаза и частота синусоидального тока и являются информационными параметрами несущих процессов - постоянного и синусоидального токов.

Используемое иногда понятие регулярного сигнала в виде детерминированного процесса с заранее известными математическим описанием его параметров и временем их изменения всегда условно, поскольку детерминированный процесс информации не содержит.

Электрические помехи в общем случае тоже представляют собой случайные электромагнитные процессы, однако такие, изменение параметров которых не связывается с каким-либо определенным смыслом. Поэтому они всегда вносят дезинформацию [2].

Различаются *непрерывнозначный случайный процесс* и *случайная последовательность*, *дискретный случайный процесс* и *дискретная случайная последовательность*. Области значений параметров первых двух процессов являются непрерывными множествами (континуумами), а области значений параметров двух остальных процессов - дискретными множествами.

Таким образом, по характеру изменений значений параметров случайные процессы делятся на два вида - непрерывные и дискретные. Две разновидности в каждом из этих двух видов определяются непрерывностью или дискретностью времени.

Соответственно целесообразно различать сигналы: *непрерывный* (рис. 1.1.2, а) и *дискретно-непрерывный* (дискретизованный только по времени, рис. 1.1.2, б), *непрерывно-дискретный* (дискретизованный только по значению информационного параметра, т.е. по уровню, рис. 1.1.2, в) и *дискретный* (дискретизованный и по времени, и по уровню, рис. 1.1.2, г) [9].

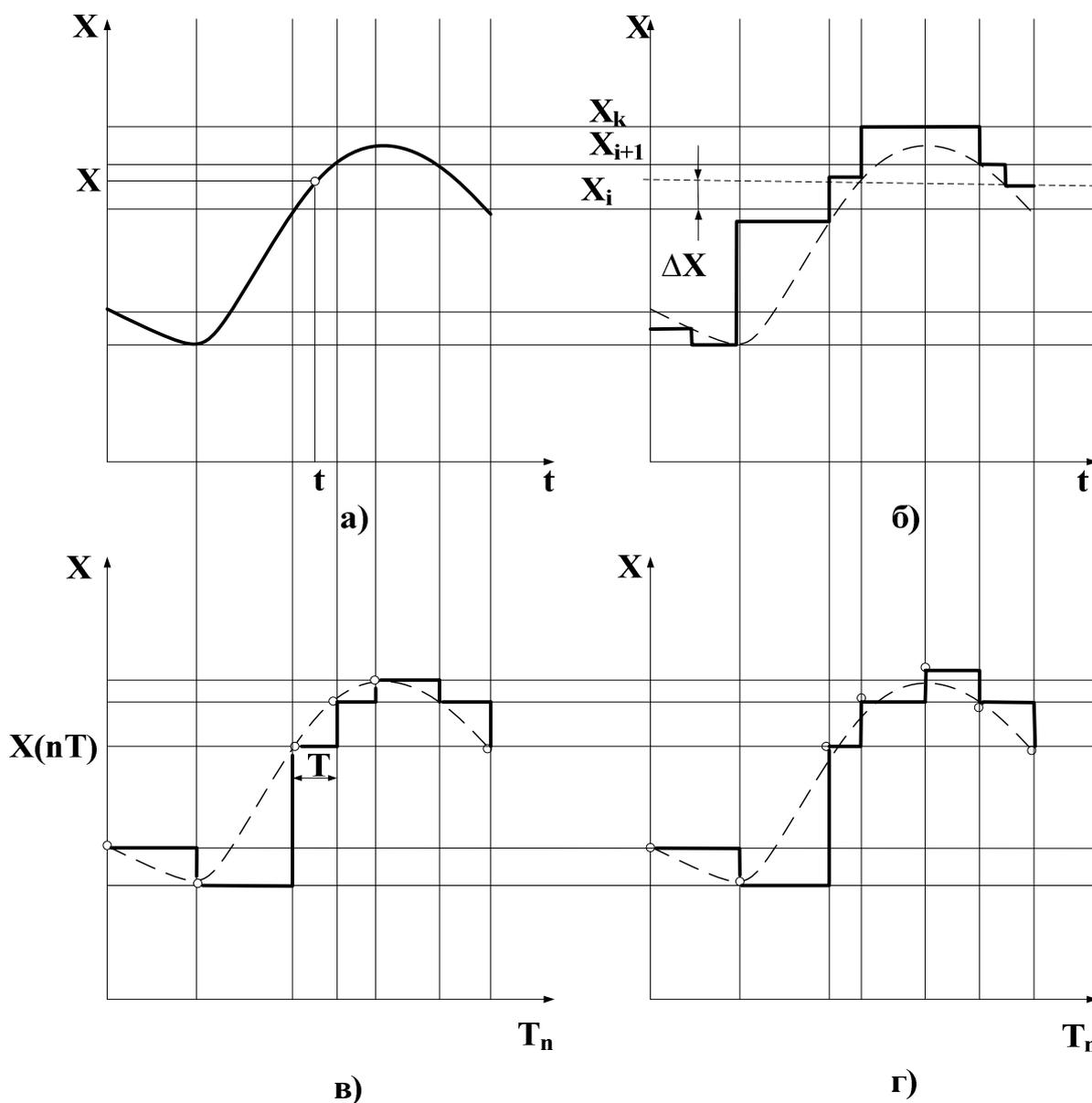


Рис. 1.1.2. Непрерывный (а), дискретно-непрерывный (б), непрерывно-дискретный (в), дискретный (г) сигналы

Сигнал является *непрерывным* или *дискретно-непрерывным*, если информационный параметр несущего процесса может быть любым в пределах возможного диапазона его изменения, т.е. образует непрерывное множество значений x , например постоянного тока (рис. 1.1.2, *а, б*).

Различие между непрерывным и дискретно-непрерывным сигналами определяется непрерывностью t и дискретностью T_n времени соответственно.

Сигнал является *непрерывно-дискретным* или *дискретным*, если информационный параметр может изменяться только скачкообразно и принимать только одно из ограниченного количества определенных значений, образующих дискретное (счетное) множество k значений X_i , различающихся на DX (рис. 1.1.2, *в, г*). Различие между непрерывно-дискретным и дискретным сигналами определяется непрерывностью t и дискретностью T_n времени соответственно. Как указывалось, характерным непрерывным сигналом является изменяющийся по значению постоянный ток. К непрерывному относится и сигнал в виде переменного периодического тока в пределах одного периода его изменения, информационным параметром которого является мгновенное значение.

Входные сигналы автоматических устройств. Входные сигналы X_{cy} , X_{cz} (см. рис. 1.1.1) автоматического устройства формируются первичными измерительными преобразователями $ППП_Y$, $ППП_Z$ соответственно изменениям выходной величины Y управляемого объекта и возмущающих воздействий Z . Выходные величины синхронных генераторов, трансформаторов и других управляемых объектов электрической части электроэнергетической системы являются электрическими величинами (например, напряжение синхронного генератора). Возмущающие воздействия на управляемый объект, как правило, также электрические. Характерным возмущающим воздействием является изменение тока синхронного генератора, обусловленное коротким замыканием в электрической системе [1].

При изменениях напряжения вследствие обычно случайного изменения мощности нагрузки синхронного генератора или возникновения короткого замыкания (характерного случайного события) происходят изменения амплитуды, фазы и частоты принужденных синусоидальных напряжения и тока генератора и возникают свободные апериодические и колебательные составляющие переходных процессов. Соответствующие случайно изменяющиеся по амплитуде, фазе и частоте напряжение и ток на выходе первичных измерительных трансформаторов напряжения и тока являются входными сигналами автоматического устройства, при этом значение амплитуды, фазы и частоты могут быть любыми из непрерывного множества значений. Свободные составляющие напряжения и тока представляют собой внешние помехи. Часто первичные измерительные преобразователи создают дополнительные (внутренние) помехи.

Таким образом, основными входными сигналами автоматических устройств являются аналоговые дискретно-непрерывные сигналы в виде синусоидальных тока и напряжения с изменяющимися амплитудой, фазой или частотой. В ряде случаев в качестве входных сигналов используются свободные составляющие токов переходных процессов, в частности апериодическая составляющая, при этом принужденные и свободные периодические составляющие являются помехами.

Входные сигналы автоматических устройств управляемых объектов постоянного тока представляют собой изменяющуюся постоянную составляющую напряжения на выходе измерительного делителя напряжения. При этом переменные составляющие являются помехами [1].

4. Функциональные части и элементы автоматических устройств.

Поскольку автоматическое управление осуществляется на основе информационных процессов, целесообразно различать взаимодействующие части автоматических устройств, осуществляющие получение, передачу, переработку и использование информации для воздействия на управляемый объект, ввод в управляющую вычислительную машину или отображение

информации для человека. Составные части автоматических устройств, выполняющие перечисленные функции, можно назвать *измерительной (ИЧ)*, передающей (канал связи) (*ПЧ*), логической (*ЛЧ*) и исполнительной (*ИсЧ*) функциональными частями (см. рис. 1.1.3).

В соответствии с функциональными операциями, которые в процессе получения, передачи, переработки и использования информации производятся над сигналами, в автоматическом устройстве целесообразно различать *функциональные элементы*. Изображение автоматического устройства в виде функциональных частей, элементов и связей между ними называется *функциональной схемой* (см. рис. 1.1.3).

Автоматические устройства делятся на *аппаратные* и *программные*. Аппаратные автоматические устройства состоят из отдельных взаимодействующих конструктивно различимых функциональных элементов. Такими являются находящиеся в эксплуатации в электроэнергетических системах и выпускаемые в настоящее время промышленностью автоматические устройства.

Программные автоматические устройства разрабатываются на основе интегральных микропроцессоров цифровых микроэлектронных вычислительных машин (микроЭВМ). В программном автоматическом устройстве явное различие между функциональными элементами и даже между измерительной и логической функциональными частями автоматического устройства исчезает. Однако функциональная структура автоматического устройства, определяемая функциональными операциями над сигналами, сохраняется. Поэтому микропроцессоры программных автоматических устройств рассматриваются как комплексы взаимодействующих функциональных элементов соответственно тем функциям, которые они в автоматическом устройстве выполняют [9].

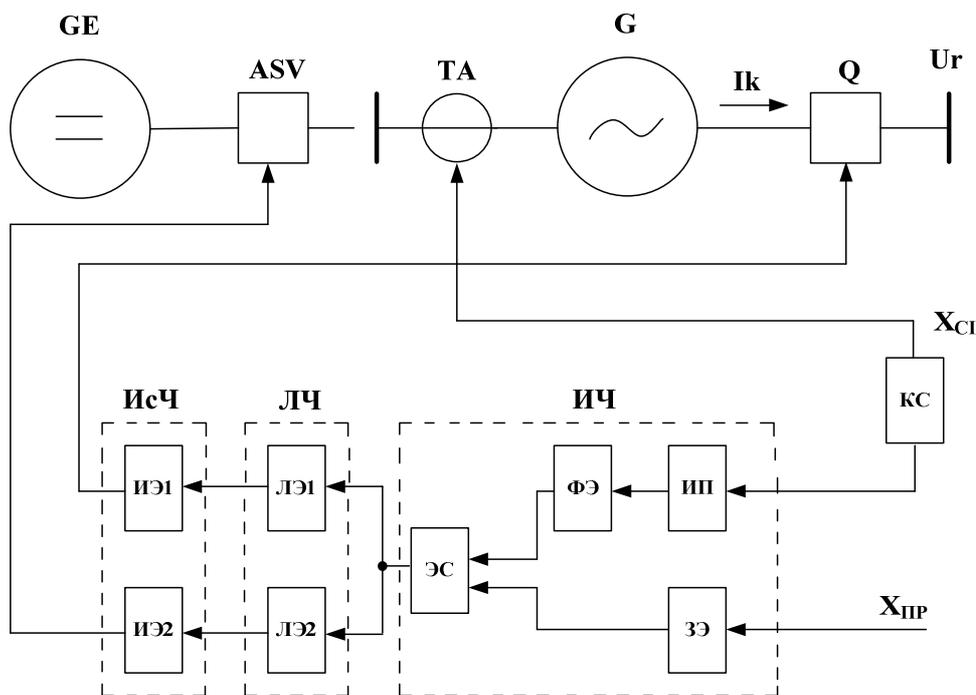


Рис. 1.1.3. Функциональная схема автоматического управляющего устройства релейного действия – автоматической защиты синхронного генератора

В автоматическом устройстве релейной защиты (рис. 1.1.3) сигнал X_{cl} от первичного измерительного преобразователя тока I_k - измерительного трансформатора тока TA , передаваемый по каналу связи KC (контрольному кабелю), преобразуется измерительным преобразователем $ИП$ и сравнивается (элементом сравнения $ЭС$) с предписанным (запоминающим элементом $ЗЭ$) значением информационного параметра. Элемент сравнения определяет, что ток I_k синхронного генератора, например ток обратной последовательности, выделяемый фильтрующим элементом $ФЭ$, превышает допустимое значение и формирует дискретный потенциальный сигнал, который поступает на логические элементы $ЛЭ1$, $ЛЭ2$, реализующие операцию ВРЕМЯ. Если ток обратной последовательности не снижается через заданное время, логические элементы выдают дискретные сигналы на исполнительные элементы $ИЭ1$, $ИЭ2$, которые отключают выключатель Q синхронного генератора и развозбуждают его, отключая выключателем ASV (автоматом гашения поля) возбудитель GE /1/.

Вопросы для самопроверки по теме 1.1.

«Автоматические системы, устройства и функциональные элементы»

1. Что такое «управляемые объекты»?
2. Содержание и назначение данного курса?
3. Что такое «автоматическая информационная система»?
4. Основные виды сигналов?
5. Перечислить основные функциональные части схемы автоматического управляющего устройства?
6. Какие различаются виды обратной связи?

Варианты тестов по теме 1.1.

«Автоматические системы, устройства и функциональные элементы»

1. Автоматическое управляющее устройство это – ...
2. Взаимодействующие энергетические объекты, подвергающиеся целенаправленным воздействиям, называются –
 - а) управляющими объектами;
 - б) управляемыми объектами;
 - в) объектами связи.
3. Сигнал является непрерывно-дискретным, если –
 - а) информационный параметр изменяется скачкообразно;
 - б) информационный параметр образует непрерывное множество.
4. Какие сигналы относятся аналоговым –
 - а) непрерывные;
 - б) цифровые;
 - в) дискретно-непрерывные.
5. Какие сигналы относятся к дискретным –
 - а) дискретно-непрерывные;
 - б) дискретные;
 - в) непрерывно-дискретные.
6. Назовите основные составные части автоматических устройств?
7. Функциональная схема это – ...

8. Помехи это – ...
9. Информационный процесс это – ...
10. Перечислить основные характеристики сигналов.

Тема 1.2. Характеристики элементов автоматических устройств

План.

1. Временные функциональные характеристики.
2. Передаточные функции.
3. Частотные характеристики.
4. Проходная характеристика.

1. Временные функциональные характеристики.

Естественная, соответствующая физическим процессам в элементе автоматического устройства функциональная характеристика описывает его выходной сигнал при воздействии на него входного сигнала как функцию времени. Она определяется решениями дифференциального уравнения непрерывного элемента или разностных уравнений аналогового, импульсного и дискретного, в частности цифрового, элементов соответственно.

При особых дискретных детерминированных входных сигналах в виде единичного импульса неограниченной длительности, описываемого единичной функцией X_{BX1} (рис. 1.2.1, а), и его производной, т.е. импульса бесконечно малой длительности, описываемого d -функцией (d -импульса) $X_{BXd}(0)$, возникающих в момент времени $t=0$, при нулевых начальных условиях переходных процессов в непрерывном элементе и представляют собой его временные функциональные характеристики - переходную $h_1(t)$ (рис. 1.2.1, а) и импульсную $h(t)$ (рис. 1.2.1, б). Входные сигналы являются дискретными потенциальным и импульсным соответственно, а характеристика – непрерывными [1].

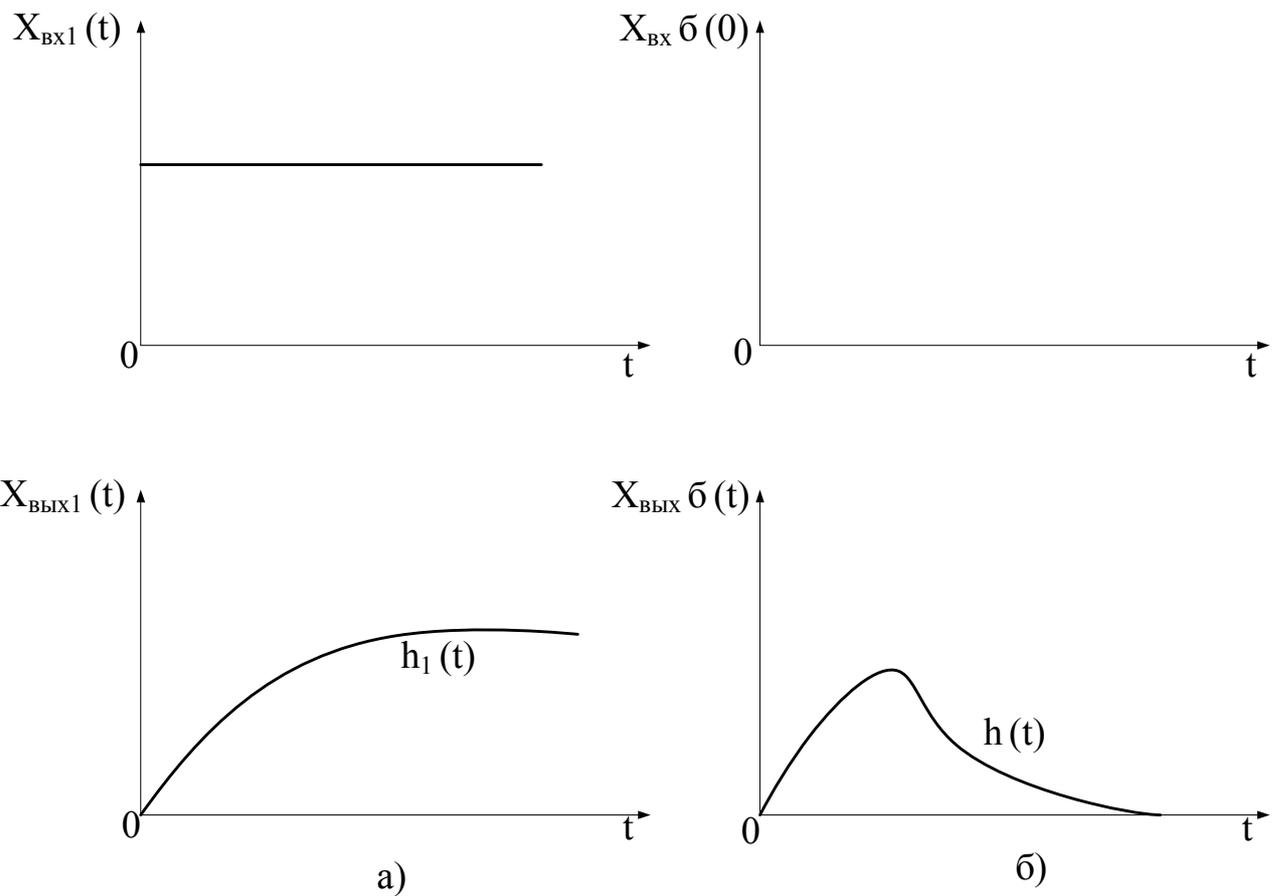


Рис. 1.2.1. Входной сигнал, описываемый единичной функцией, и непрерывная переходная характеристика (а); входной импульсный сигнал, описываемый δ -функцией, и непрерывная импульсная характеристика функционального элемента (б)

2. Передаточные функции.

При использовании сигналов в виде p -изображений $X(\bar{p})$ непрерывных и z -изображений дискретизированных $x(\bar{z})$ и дискретных $X(\bar{z})$ функций времени $x(t)$ и $x(nT)$, $X(nT)$ соответственно функциональными характеристиками элементов являются p - и z -передаточные функции.

Передаточная функция $H(p)$ непрерывного элемента представляет собой прямое преобразование Лапласа (p -преобразование) его импульсной характеристики $h(t)$ (или переходной характеристики, умноженной на оператор p , - изображение Хевисайда переходной характеристики). Она определяется

отношением двух интегралов, сводящимся к отношению полиномов оператора p :

$$H(\bar{p}) = \frac{X_{\text{ВЫХ}}(\bar{p})}{X_{\text{ВХ}}(\bar{p})} = \frac{\int_0^{\Gamma} x_{\text{ВЫХ}}(t) \Psi e^{-pt} dt}{\int_0^{\Gamma} x_{\text{ВХ}}(t) \Psi e^{-pt} dt} = \frac{M(\bar{p})}{N(\bar{p})},$$

где $X_{\text{ВЫХ}}(\bar{p})$, $X_{\text{ВХ}}(\bar{p})$ - p -преобразования (изображения выходного и входного сигналов.)

Полином $N(\bar{p})$ называется характеристическим оператором, поскольку корни p_k характеристического уравнения $N(\bar{p}) = 0$ определяют характер собственного переходного процесса.

Дифференциальное уравнение непрерывного элемента в операторной форме имеет вид:

$$X_{\text{ВЫХ}}(\bar{p}) = H(\bar{p}) \Psi X_{\text{ВХ}}(\bar{p})$$

Обратное p -преобразование (оригинал) $X_{\text{ВЫХ}}(t)$ от $X_{\text{ВЫХ}}(\bar{p})$ является решением дифференциального уравнения [8].

3. Частотные характеристики.

Функциональной характеристикой элемента автоматического устройства при частотном представлении его входного $\underline{X}_{\text{ВХ}}(j\omega)$ и выходного $\underline{X}_{\text{ВЫХ}}(j\omega)$ сигналов является комплексная частотная характеристика или комплексный коэффициент передачи. Она определяет прохождение через функциональный элемент гармонического воздействия: $x_{\text{ВХ}}(t) = X_m \Psi \sin \omega t$, дискретизированного $x_{\text{ВХ}}(nT) = X_m \Psi \sin \omega nT$ или дискретного (обычно цифрового) $x_{\text{ВХ}}(nT) \gg X_m \Psi \sin \omega nT$ с точностью до $D X$. Комплексная частотная характеристика представляет преобразование Фурье импульсной характеристики и получается подстановкой в выражение p -передаточной функции $H(\bar{p})$, непрерывного элемента $p = j\omega$ и в выражение z -передаточной функции $H(\bar{z})$, цифрового элемента $z = e^{j\omega T}$:

$$K(j\omega) = \frac{X_{BbLX}(j\omega)}{X_{BX}(j\omega)} = \frac{M(j\omega)}{N(j\omega)};$$

$$K(e^{j\omega T}) = \frac{X_{BbLX}(e^{j\omega T})}{X_{BX}(e^{j\omega T})} = \frac{A(e^{j\omega T})}{B(e^{j\omega T})}.$$

В отличие от комплексного коэффициента передачи $K(j\omega)$ непрерывная комплексная частотная характеристика $K(e^{j\omega T})$ является периодической функцией относительной круговой частоты ωT и полностью определяется на интервале $-\pi \leq \omega T \leq \pi$ по единичной окружности (см. рис 1.2.2, б). Комплексная частотная характеристика $K(e^{j\omega T})$ может быть дискретизирована, т.е. представлен набором векторов $K(e^{j(2p/N)\pi})$, концы которых образуют N точек на единичной окружности (рис. 1.2.2, б). Она представляет собой дискретное преобразование Фурье дискретизованной импульсной характеристики.

Кривая, описываемая концом вектора $K(j\omega)$ или $K(e^{j\omega T})$ в комплексной плоскости при изменении ω , называется амплитудно-фазной характеристикой. В прямоугольной системе координат комплексная частотная характеристика представляется двумя характеристиками: амплитудно-частотной (АЧХ) $K(\omega)$ или $K(\omega T)$ и фазочастотной (ФЧХ) $\varphi(\omega)$ или $\varphi(\omega T)$ соответственно. На рис. 1.2.2, а в качестве примера приведены частотные характеристики непрерывного, а на рис. 1.2.2, б - цифрового элемента, процессы в которых описываются дифференциальным и разностным уравнениями первого порядка соответственно [9].

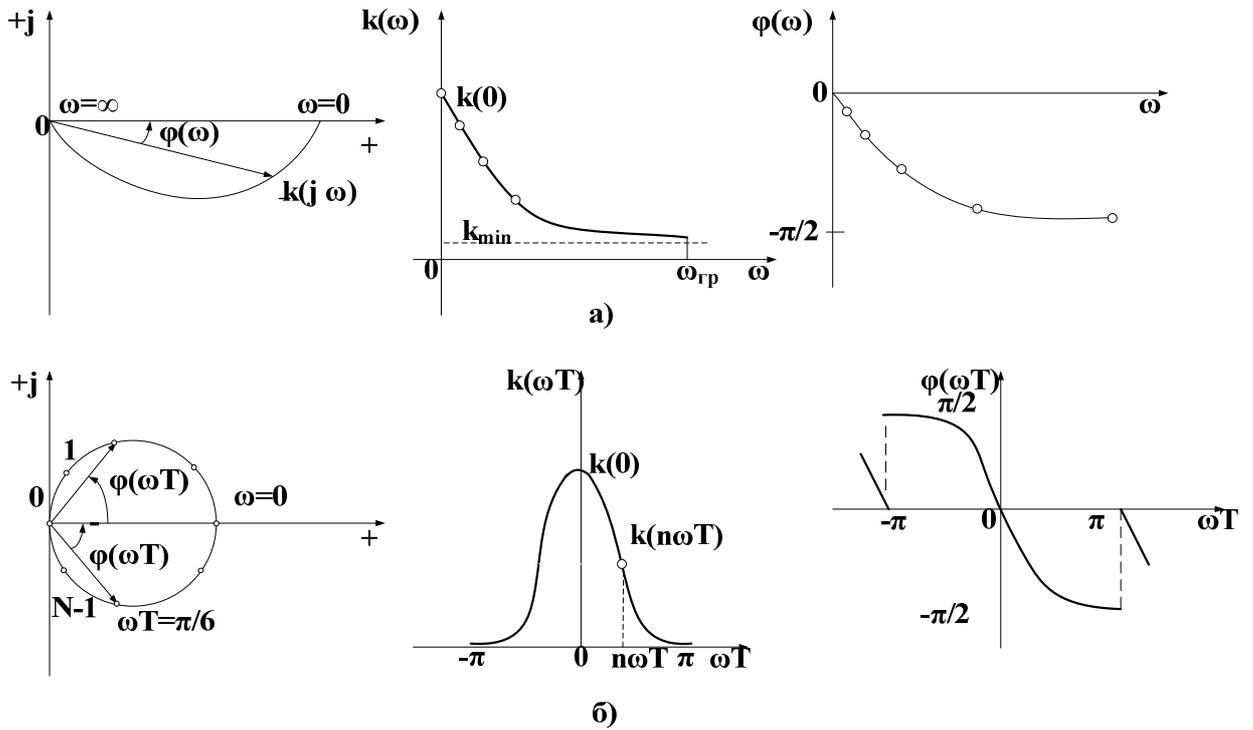


Рис. 1.2.2. Частотные характеристики непрерывного (а) и цифрового (б) элементов

Для непрерывного элемента (см. рис. 1.2.2, а) имеем:

$$K(j\omega) = \frac{1}{j\omega t + 1} = k(\omega)e^{j\varphi(\omega)};$$

$$k(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 t^2}};$$

$$\varphi(\omega) = -\arctg \omega t.$$

Для цифрового элемента (см. рис. 1.2.2, б):

$$K(e^{j\omega T}) = \frac{a}{1 - be^{-j\omega T}} = K(\omega T)e^{j\varphi(\omega T)};$$

$$k(\omega T) = a / \sqrt{1 - 2b\cos \omega T + b^2};$$

$$\varphi(\omega T) = -\arctg \frac{b\sin \omega T}{1 - b\cos \omega T}.$$

Обратная связь – комплексная; в зависимости от круговой частоты ω она может быть как положительной, так и отрицательной.

4. Проходная характеристика.

Проходной характеристикой или характеристикой вход - выход элемента называется функциональная зависимость $X_{\text{ВЫХ}} = f(X_{\text{ВХ}})$ между информационными параметрами выходного и входного процессов в установившемся режиме работы.

Проходная характеристика экспериментально может быть получена при относительно медленном изменении информационного параметра входного процесса. Например, если информационными параметрами являются частота входного и амплитуда или фаза выходного синусоидальных токов, то проходной характеристикой соответствующего элемента может служить зависимость абсолютного значения или фазы комплексного коэффициента $K(j\omega)$ передачи от ω , т.е. амплитудная или фазочастотная характеристика.

Указанная зависимость $X_{\text{ВЫХ}} = f(X_{\text{ВХ}})$ может быть непрерывной или разрывной функцией. Соответственно различаются *непрерывная* и *релейная* проходные характеристики [2].

Непрерывная проходная характеристика в общем случае представляет собой непрерывную функцию $X_{\text{ВЫХ}} = f(X_{\text{ВХ}})$, не проходящую через начало координат и имеющую точки перегиба (рис. 1.2.3, а). Предел отношения приращений $DX_{\text{ВЫХ}}$ и $DX_{\text{ВХ}}$ называется *дифференциальным коэффициентом преобразования* (передачи) элемента:

$$k_{\text{ДИФ}} = \lim_{DX_{\text{ВХ}} \rightarrow 0} \frac{DX_{\text{ВЫХ}}}{DX_{\text{ВХ}}} = \frac{dX_{\text{ВЫХ}}}{dX_{\text{ВЫХ}}}.$$

Отношение дискретного изменения $X_{\text{ВЫХ max}} - X_{\text{ВЫХ 0}}$ к вызывавшему его изменению $X_{\text{ВХ max}}$ (рис. 1.2.3, а) называется *статическим коэффициентом преобразования* (передачи):

$$k_{\text{СТ}} = \frac{X_{\text{ВЫХ max}} - X_{\text{ВЫХ 0}}}{X_{\text{ВХ max}}}.$$

Если характеристика имеет точки прогиба, то возможны два различных режима работы элемента. На рис. 1.2.3, а характеристика делится на три

участка точками перегиба, в которых $k_{\text{диф}} = \frac{dX_{\text{ВЫХ}}}{dX_{\text{ВХОД}}} = 1$. В пределах участка между точками перегиба $k_{\text{диф}} < 1$, а за его пределами $k_{\text{диф}} > 1$.

Средний участок $A\check{A}\check{A}$ принято называть активным или динамическим диапазоном характеристики и определять отношением:

$$D = \frac{X_{\text{ВХ max}}}{X_{\text{ВХ min}}}.$$

В пределах динамического диапазона $k_{\text{диф}}$ обычно принимается постоянным. В зависимости от функционального назначения элемента он имеет свой физический смысл и наименование.

Режим работы элемента, при котором значения входного и выходного информационных параметров не выходят за пределы динамического диапазона, ниже называется *непрерывным*. Режим работы элемента, при котором параметры могут принимать значения только за пределами динамического диапазона, ниже называется режимом *переключения*. Режим переключения предполагает дискретное изменение входного параметра в пределах, превышающих:

$$DX_{\text{ВХ}} = X_{\text{ВХ max}} - X_{\text{ВХ min}}.$$

Проходная характеристика реального элемента, как правило, неоднозначна. На рис. 1.2.3, б показаны две ветви характеристики, соответствующие нарастанию (1) и снижению (2) входного информационного параметра. Наличие двух ветвей (1 и 2) характеристик объясняется потерями энергии внутри элемента, обусловливающими погрешности преобразования. На рис. 1.2.3, б пунктиром показана усредненная характеристика 3.

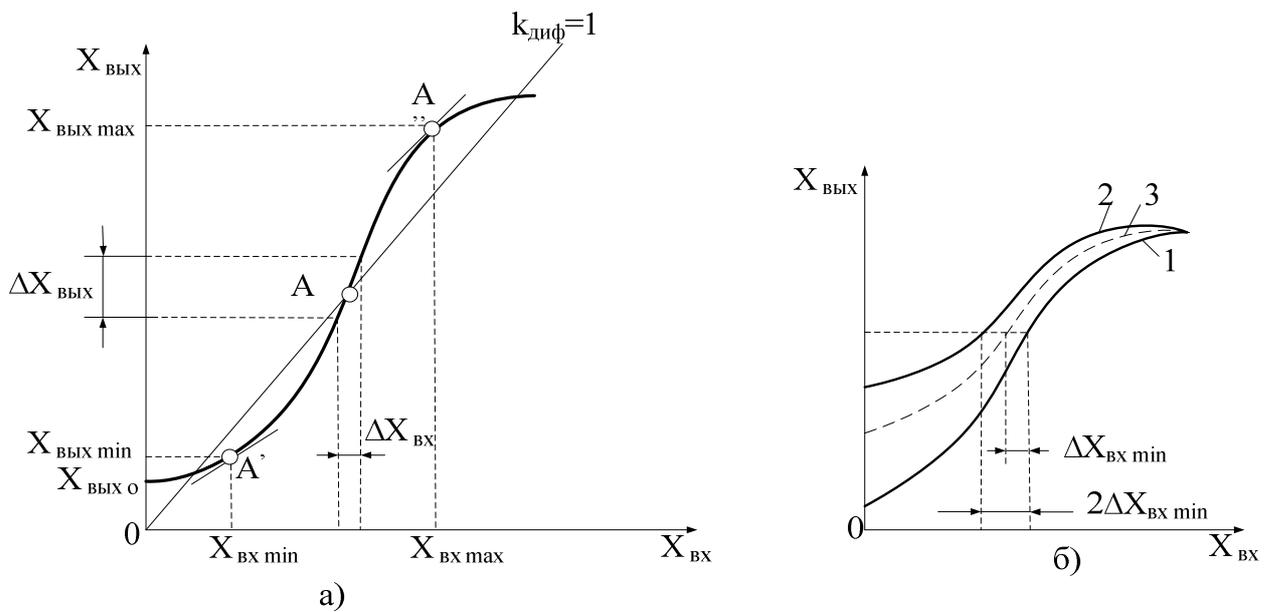


Рис. 2.3. Непрерывные проходные характеристики функционального элемента

Релейная проходная характеристика представляет собой функцию $X_{ВЫХ} = f_p(X_{ВХ, O, C})$ имеющую при некотором значении $X_{ВХ, Д}$ (парамetre действия) разрыв или изменение знака производной. Элемент с релейной характеристикой имеет только два устойчивых состояния (рис. 1.2.4): одно – при $X_{ВХ, O, C} < X_{ВХ, Д}$, а второе - при $X_{ВХ, O, C} > X_{ВХ, Д}$. Поэтому, при непрерывном изменении входного параметра выходной изменяется скачкообразно. Релейную проходную характеристику могут иметь только нелинейные элементы с внутренней или внешней жесткой *положительной обратной связью* [1].

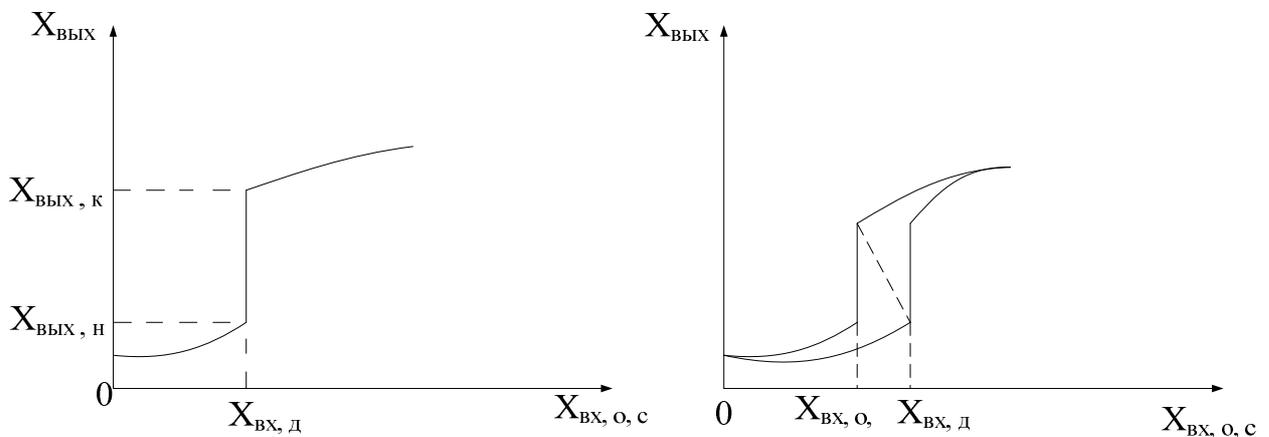


Рис. 1.2.4. Релейные проходные характеристики

Вопросы для самопроверки по теме 1.2.

«Характеристики элементов автоматических устройств»

1. Как получаются импульсная и переходная временные характеристики функционального элемента автоматического устройства?
2. Какие известны методы получения z-передаточной функции цифрового элемента из p-передаточной функции его аналогового прототипа?
3. Как получается релейная проhodная характеристика из непрерывной проhodной характеристики?
4. Что понимается под погрешностями преобразования сигнала?
5. Что понимается под относительным уровнем сигнала, в частности выходного сигнала функционального элемента?
6. Что представляет собой информационная способность функционального элемента?

Варианты тестов по теме 1.2.

«Характеристики элементов автоматических устройств»

1. Функциональная характеристика это – ...
2. Какой вид имеет непрерывная переходная характеристика:
 - а) **Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.**
 - б) **Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.**
 - в) **Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.**
3. Как обозначается передаточная функция непрерывного элемента:
 - а) **Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.;**
 - б) **Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.;**

в) Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.

4. Дифференциальное уравнение непрерывного сигнала в операторной форме имеет вид:

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.

5. Проходная характеристика это – ...

6. Абсолютная погрешность это –

7. Погрешности преобразования и помехи, возникающие в процессе преобразования функциональным элементом сигнала, определяет его:

а) частотные характеристики;

б) информационные характеристики;

в) функциональные характеристики.

8. Обратная связь это – ...

9. Порог чувствительности определяется погрешностью.

10. Информационный объем это – ...

МОДУЛЬ 2

«ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ АВТОМАТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ»

Тема 2.1. Функциональные элементы передающей части автоматических устройств

План.

1. Назначения и разновидности.
2. Усилители сигналов.
3. Усилители импульсных сигналов.
4. Генераторы несущих процессов сигналов.
5. Модуляторы и демодуляторы.
6. Распределители импульсных сигналов.
7. Формирователи и преобразователи кодов.

1. Назначения и разновидности.

Передающая функциональная часть автоматических устройств обеспечивает передачу информации на большие расстояния от электрических станций до диспетчерских пунктов электроэнергетической системы. При этом в качестве линии связи используется цепь: провод фазы линии электропередачи - земля. Передача информации производится сигналами в виде токов высокой (по сравнению с промышленной) частоты по нескольким отдельным каналам, организуемым уплотнением линии связи. Возможна как односторонняя (симплексные каналы связи), так и двусторонняя (дуплексные каналы связи) передача информации.

Функциональные элементы передающей части имеют назначение образовывать сигналы, пригодные для их передачи на значительные расстояния, и создавать каналы их передачи по линии связи.

Информация передается аналоговыми или дискретными высокочастотными сигналами. Аналоговые сигналы используются при телефонной связи и для передачи параметров режимов работы электростанции

(напряжения на шинах электростанций, токов нагрузки и мощности синхронных генераторов) информационными автоматическими устройствами телеизмерения прежних разработок. В современных устройствах телеизмерений формируются дискретные сигналы передача информации. Дискретными являются сигналы автоматических устройств информации о состоянии коммутационных аппаратов на электростанциях и подстанциях (устройств телесигнализации) и автоматических устройств управления ими (отключения, включения) [1].

Сигналы передачи информации формируются путем изменений информационных параметров несущего процесса - гармонического тока высокой частоты. Изменение амплитуды или частоты под воздействием непрерывного сигнала микрофона или измерительного преобразователя, например мощности, называется соответственно амплитудной и частотной модуляцией. Формирование дискретных сигналов в виде импульсов тока высокой частоты с дискретно изменяемой амплитудой или частотой достигается манипуляцией (включением и отключением управляющих амплитудой или частотой цепей несущего процесса). Преобразование переданных сигналов в виде модулированного или манипулированного тока высокой частоты на приемном конце канала связи называется демодуляцией.

Формирование последовательного двоичного кода или кодоимпульсного на его основе дискретного сигнала в виде комбинаций импульсов тока высокой частоты представляет собой кодирование информации, а их расшифровка на приемном конце канала связи - декодирование.

Функциональными элементами образования сигналов передачи информации являются: генераторы несущих процессов, модуляторы или манипуляторы и демодуляторы аналоговых сигналов; формователи и преобразователи кодов дискретных сигналов; усилители сигналов, в частности импульсные усилители. Уплотнение линий связи частотными каналами, по которым различная информация передается одновременно, достигается полосовыми частотными фильтрами. Временное уплотнение линий связи

каналами передачи дискретных сигналов, передающих различную информацию последовательно во времени, достигается с использованием распределителей импульсов [2].

Линия передачи информации: фазный провод электропередачи - земля создается заграждающими резонансными частотными фильтрами - заградителями и конденсаторами связи провода электропередачи с автоматическим информационным устройством. Заградители в виде параллельных резонансных контуров включаются в разрывы провода линии электропередачи по ее концам и, таким образом, ограничивают участок цепи прохождения токов высокой частоты фазным проводом только линии электропередачи. Они представляют собой типовые устройства, рассчитанные на прохождение токов нагрузки линии электропередачи и выдерживающие динамические и термические воздействия токов КЗ. Конденсаторы связи присоединяются к проводам линий перед заградителями (со стороны линии электропередачи) и представляют собой устройства высокого напряжения с соответствующей изоляцией. Заградители и конденсаторы связи являются принадлежностью электроэнергетического объекта - линии электропередачи - и к элементам автоматического устройства не относятся. Элементом автоматического устройства является фильтр присоединения выходного (на передающем конце) или входного (на приемном конце) усилителя сигналов к конденсатору связи.

2. Усилители сигналов.

Усилители сигналов являются наиболее универсальными элементами передающей части автоматических устройств. Соответственно используемым видам сигналов они делятся на усилители сигналов с гармоническим несущим процессом - усилители переменного тока и усилители импульсных сигналов.

Назначением усилителя является увеличение мощности сигнала за счет энергии источника его питания. Основной показатель усилителя -

коэффициент усилителя мощности - определяется как отношение изменений мощностей выходного $DP_{ВЫХ}$ и входного $DP_{ВХ}$ сигналов:

$$k_p = DP_{ВЫХ} / NP_{ВХ}.$$

Простейший усилитель принято называть усилительным каскадом. При недостаточном усилении сигнала одним каскадом усилитель выполняется из нескольких каскадов. Усилители автоматических устройств обычно состоят из двух или трех каскадов, которые можно назвать выходным, входным и промежуточным.

В автоматических устройствах применяются транзисторные усилители на основе схемы включения с общим эмиттером (ОЭ) биполярного и схемы включения с общим истоком (ИО) полевого транзисторов. В новых разработках используются интегральные усилители.

Прохождение сигнала через усилитель сопровождается переходным процессом. Поэтому характеристикой усилителя является передаточная функция $H(p)$ при представлении сигнала изображением функции времени, описывающей сигнал, или комплексный коэффициент передачи $K(j\omega)$ при представлении сигнала его комплексным частотным спектром [8].

Общим требованием к усилителям автоматических устройств кроме постоянной готовности к действию и надежности функционирования является возможно меньшее дезинформационное воздействие на сигналы. Необходимые информационные характеристики и показатели усилителей обеспечиваются при достаточно высокой стабильности коэффициентов усиления (малых относительных погрешностях коэффициентов), практической линейности проходной характеристики и малой инерционности. Указанные свойства усилителей достигаются с помощью отрицательных обратных связей. На основе усилителей с положительной обратной связью, обеспечивающей автоколебательный режим их работы, выполняются генераторы несущих процессов сигналов.

В усилителях различаются четыре вида обратной связи (положительной или отрицательной), определяемых схемой соединения входных и выходных зажимов усилителя A с выходными и входными зажимами цепи обратной связи. В зависимости от схемы соединения выходных зажимов цепи обратной связи (ОС) с входными зажимами усилителя ОС делятся на последовательную, при которой суммируются напряжения и параллельную, при которой суммируются токи.

В зависимости от схемы соединения выходных зажимов усилителя с входными зажимами цепи ОС они делятся на ОС по напряжению и ОС по току. Обратная связь по напряжению не работает при закороченных выходных зажимах усилителя, а обратная связь по току при разомкнутых выходных зажимах.

Для стабилизации мощности обычно используются два вида отрицательной обратной связи, а именно – последовательная по току и параллельная по напряжению [9].

3. Усилители импульсных сигналов.

Идеальный импульсный сигнал, описываемый d -функцией, имеет равномерный непрерывный частотный спектр. Непрерывный частотный спектр типичного реального прямоугольного импульса длительностью t_{II} (рис. 2.1.1, a) характеризуется лишь изменением плотности распределения амплитуд гармонических составляющих в функции частоты. Фазы гармонических составляющих постоянны. Поэтому усилитель импульсных сигналов должен обеспечивать одинаковое усиление (одинаковое изменение амплитуд) гармонических составляющих в широком диапазоне частот, т.е. должен быть широкополосным усилителем, и не должен вносить линейных искажений (разных сдвигов по фазе гармоник). Для идеального импульсного усилителя характерен вещественный коэффициент усиления $K_v(j\omega)$, не зависящий от частоты. Такой усилитель мыслим лишь при абсолютно безынерционных электрических цепях, что практически не может быть

достигнуто. Поэтому реальный импульсный усилитель неизбежно искажает импульсный сигнал. На рис. 2.1.1, б показана обычная форма кривой выходного тока $i_{\text{ВЫХ}}$ (или напряжения) усилителя при прямоугольной форме кривой входного тока $i_{\text{ВХ}}$. Задачи осуществления импульсного усилителя сводятся к обеспечению минимально возможного искажения, т.е. достижению максимально возможной полосы f_y пропускаемых частот и минимально возможной зависимости фазы комплексного коэффициента усиления $K_y(j\omega)$ от частоты (минимальных линейных искажений). Показателями искажения прямоугольного импульса являются время t_y установления фронта, в течение которого выходной ток (или напряжение) возрастает от $i_{\text{ВЫХ}} = 0,1\psi_{\text{ВЫХ}}$ до $i_{\text{ВЫХ}} = 0,9\psi_{\text{ВЫХ}}$ и относительный спад вершины e [1].

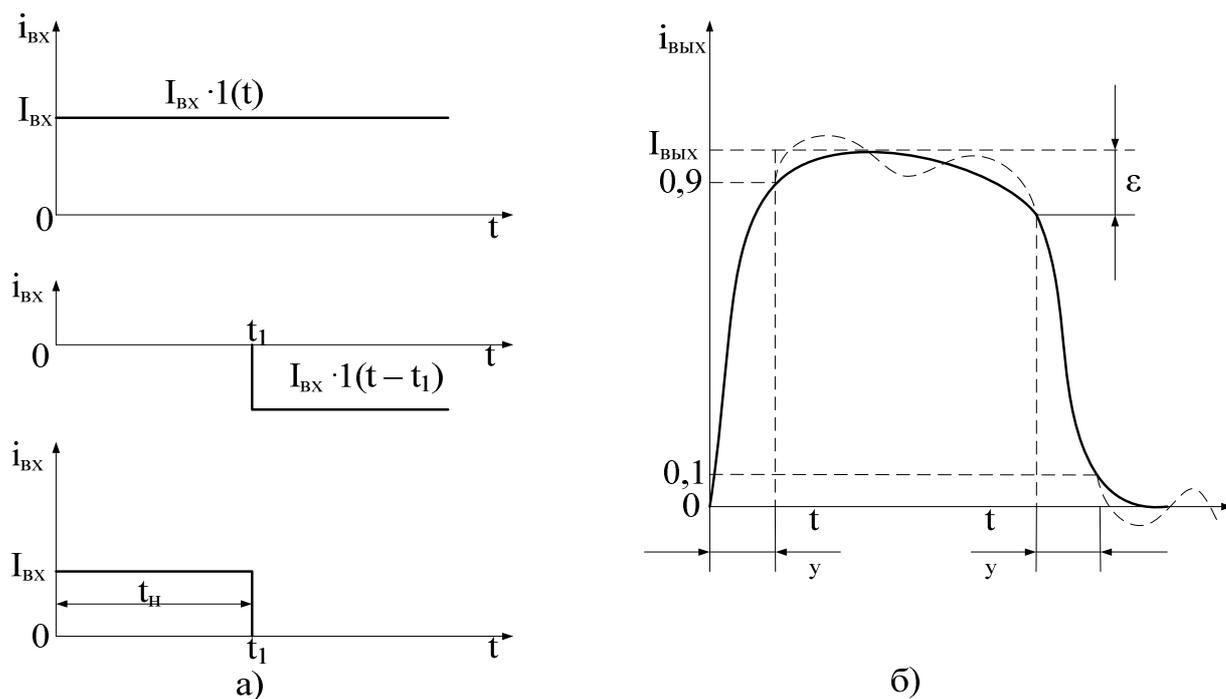


Рис. 2.1.1. Входной сигнал с прямоугольной формой кривой (а) и выходной сигнал (б) импульсного усилителя

4. Генераторы несущих процессов сигналов.

Передача информации на значительные расстояния, как указывалось, производится сигналами в виде модулированного или манипулированного тока высокой частоты. Синусоидальные колебания высокой частоты и являются несущим процессом сигналов. Они создаются генераторами гармонического тока.

Для формирования импульсных, кодоимпульсных и разрядноцифровых сигналов и для движения распределителей импульсов необходимы генераторы импульсного тока низкой частоты.

Генератор принципиально представляет собой усилитель с передаточной функцией второго порядка, охваченный глубокой положительной обратной связью, обеспечивающей автоколебательный режим его работы.

Автоколебательное состояние, являющееся рабочим для генератора, устанавливается при невыполнении условия устойчивости функционирования замкнутого элемента с передаточной функцией второго порядка. Признаком возбуждения автоколебаний является положительная вещественная часть корней характеристического уравнения второго порядка. Положительная вещественная часть корней означает, что амплитуда колебательной свободной составляющей переходного процесса не уменьшается, а возрастает с постоянной времени t и ограничивается только предельными значениями выходного напряжения и тока усилителя, определяемыми напряжением источника питания [7].

Генератор синусоидальных колебаний выполняется как избирательный усилитель с резонансным контуром, охваченный достаточно глубокой для перевода его в автоколебательный режим жесткой положительной обратной связью.

На рис 2.1.2 приведен пример схемы реального генератора синусоидальных колебаний низкой (звуковой) частоты [8].

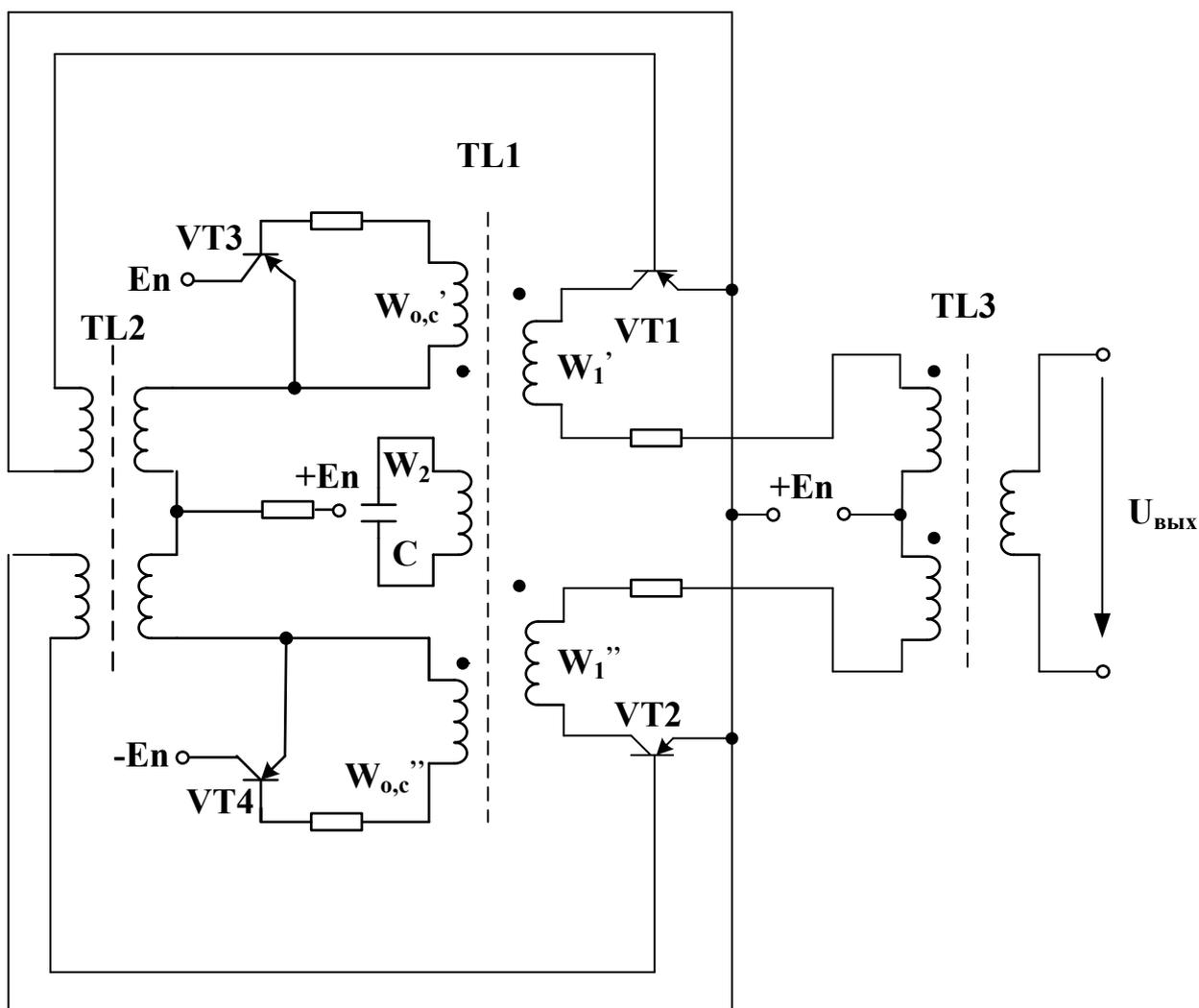


Рис. 2.1.2. Схема генератора синусоидального тока низкой частоты

Он выполнен на основе усилителя на транзисторах $VT1$ и $VT2$, работающего в режиме класса B с трансформаторными связями. В резонансном LC -контуре используется обмотка w_2 трансформатора $TL1$, обмотки w (и некоторого) включены в коллекторные цепи транзисторов $VT1$, $VT2$ усилителя. Цепь обратной связи состоит из обмоток $w_{0,c}'$, $w_{0,c}''$ трансформатора $TL1$, усилителей на транзисторах $VT3$, $VT4$ и трансформатора $TL2$. Трансформатор $TL3$ - выходной.

5. Модуляторы и демодуляторы.

Формирование сигнала передачи информации при синусоидальном несущем процессе - токе высокой частоты - производится его модуляцией

исходным непрерывным сигналом. При модуляции происходит изменение одного из информационных параметров несущего процесса соответственно исходному непрерывному сигналу: амплитуды, фазы или частоты. Соответственно различаются амплитудная, фазовая и частотная непрерывная модуляции. В передающей части современных автоматических устройств непрерывная модуляция не используется (она применяется только при реализации телефонных каналов связи по проводам линий электропередачи). Восстановление исходного непрерывного сигнала достигается демодуляцией, в частности выпрямлением и сглаживанием амплитудно-модулированного тока высокой частоты /5/.

Передача информации автоматическими информационными устройствами производится дискретными, особенно цифровыми, сигналами, представляющими собой импульсы токов высокой частоты. Они формируются дискретной модуляцией - манипуляцией синусоидального несущего процесса.

В современных автоматических информационных устройствах применяется исключительно частотная манипуляция синусоидального несущего процесса, при которой дискретно изменяется его частота. В наиболее характерном случае передачи информации двоичным кодом или сформированным из него помехоустойчивым кодом передаче импульса - 1 соответствует одна частота, а передаче нуля 0 - другая.

Восстановление исходных импульсов и комбинаций единиц и нулей, т.е. получение на приемном конце передающей части переданного кодового сигнала, достигается деманипуляцией. Соответствующие функциональные элементы передающей части автоматических информационных устройств называются *модуляторами* (манипуляторами) и *демодуляторами* (деманипуляторами).

При двусторонней передаче информации они устанавливаются на каждом конце линии связи и обычно в типовых устройствах аппаратуры передачи телеинформации (АПТ) называются модуляторами-демодуляторами (М-ДМ). В связи с тем, что непрерывная модуляция в современных автоматических

устройствах не применяется, собственно модуляторы и демодуляторы ниже не рассматриваются [9].

Манипуляторы представляют собой управляемые бесконтактные ключи, воздействующие на соответствующие цепи генераторов несущих процессов сигналов. Простейшим из них является амплитудный манипулятор, запускающий и останавливающий генератор синусоидальных колебаний. Это - ключ, замыкающий и размыкающий цепь положительной ОС, обеспечивающей автоколебательный режим замкнутого усилителя (генератора), или переключающий положительную ОС на отрицательную.

Характерным примером является манипулятор, управляемый током промышленной частоты - обычно током на выходе комбинированного фильтра токов прямой и обратной последовательностей: при положительной полуволне тока генератор запускается, а при отрицательной останавливается. Сигнал имеет вид импульса тока высокой частоты длительностью в полпериода промышленной частоты $T_{II}/2$.

На рис. 2.1.3 приведена схема частотного манипулятора и управляемого им генератора типового комплекта АПТ. В генераторе G на транзисторе $VT3$ используется резонансный контур в виде обмотки w_1 трансформатора TL с обмоткой $w_{0,C}$ положительной обратной связи и конденсаторов $C1$ и $C2$. Манипулятор M представляет собой два транзистора $VT1$ и $VT2$, работающих в режиме переключения и управляемых импульсами двоичного, обычно помехоустойчивого, кода или импульсами разной полярности кодоимпульсного сигнала.

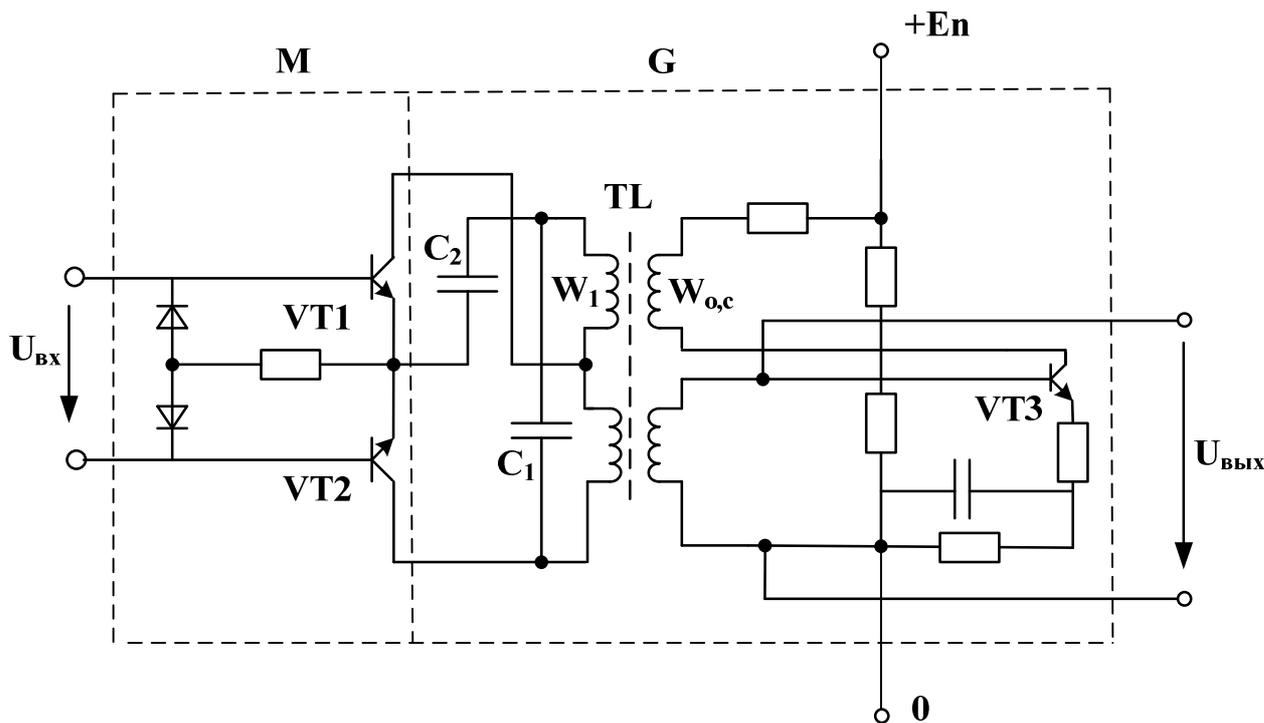


Рис. 2.1.3. Схема частотного манипулятора с управляемым генератором. При положительном входном напряжении $U_{ВХ}$ транзистор $VT1$ открыт, а $VT2$ закрыт. Через $VT1$ к части обмотки w_1 подключен конденсатор C_2 , выходное напряжение $u_{ВЫХ}$ генератора имеет определенную (верхнюю характеристическую) частоту.

При отрицательном входном напряжении (или при его отсутствии) за счет дополнительного тока смещения транзистора $VT2$, который на схеме не показан, открывается транзистор $VT2$, а $VT1$ закрывается. Конденсатор C_2 подключается ко всей обмотке w_1 , параметры резонансного контура дискретно изменяются, обуславливая соответствующее дискретное изменение частоты выходного напряжения $u_{ВЫХ}$ до нижней характеристической. Указанные частоты (верхняя и нижняя) имеют, например, значения $f_B = 3120$ Гц, $f_H = 2880$ Гц и другие, различающиеся на несколько сотен герц.

6. Распределители импульсных сигналов.

Распределители импульсов PI (рис. 2.1.4, а) формируют импульсный сигнал под воздействием тактовых (синхронизирующих) импульсов $u_{И,С}$ в

виде отдельных импульсов u_1, u_i, u_n , которые распределяются по отдельным цепям и по времени (рис. 2.1.4, б). Распределители обычно выполняются по замкнутой схеме и работают циклически. Они реализуются различными способами на триггерах с динамическими входами или регистрах с логическими элементами и счетчиках импульсов с дешифраторами двоичного кода в десятичный.

Схема на рис. 2.1.4, в иллюстрирует выполнение распределителя импульсов на интегральных двухступенчатых D -триггерах, изменяющих свое состояние под воздействием тактовых импульсов $u_{и,с}$. Интегральный логический элемент DWU (ИЛИ-НЕ) исключает возможность одновременного переключения двух триггеров (характерного потенциального "сбоя" работы распределителя). Распределитель замкнутый (кольцевой): новый цикл его работы [переключение в состояние единицы (1) первого триггера $DT1$ и появление сигнала u_1 на первом выходе] возможен только после переключения всех триггеров в состояние нуля, когда единица с выхода DWU поступает на информационный вход D триггера $DT1$. Она проходит с выхода $Q1$ в первую цепь в виде импульса u_1 в момент, как указывалось, исчезновения первого тактового импульса $u_{и,с1}$. Второй импульс $u_{и,с2}$ переводит триггер $DT1$ в исходное (нулевое), а триггер $DT2$ - в единичное состояние, появляется импульс u_2 на выходе $Q2$, подключенном ко второй цепи, и т.д /1/.

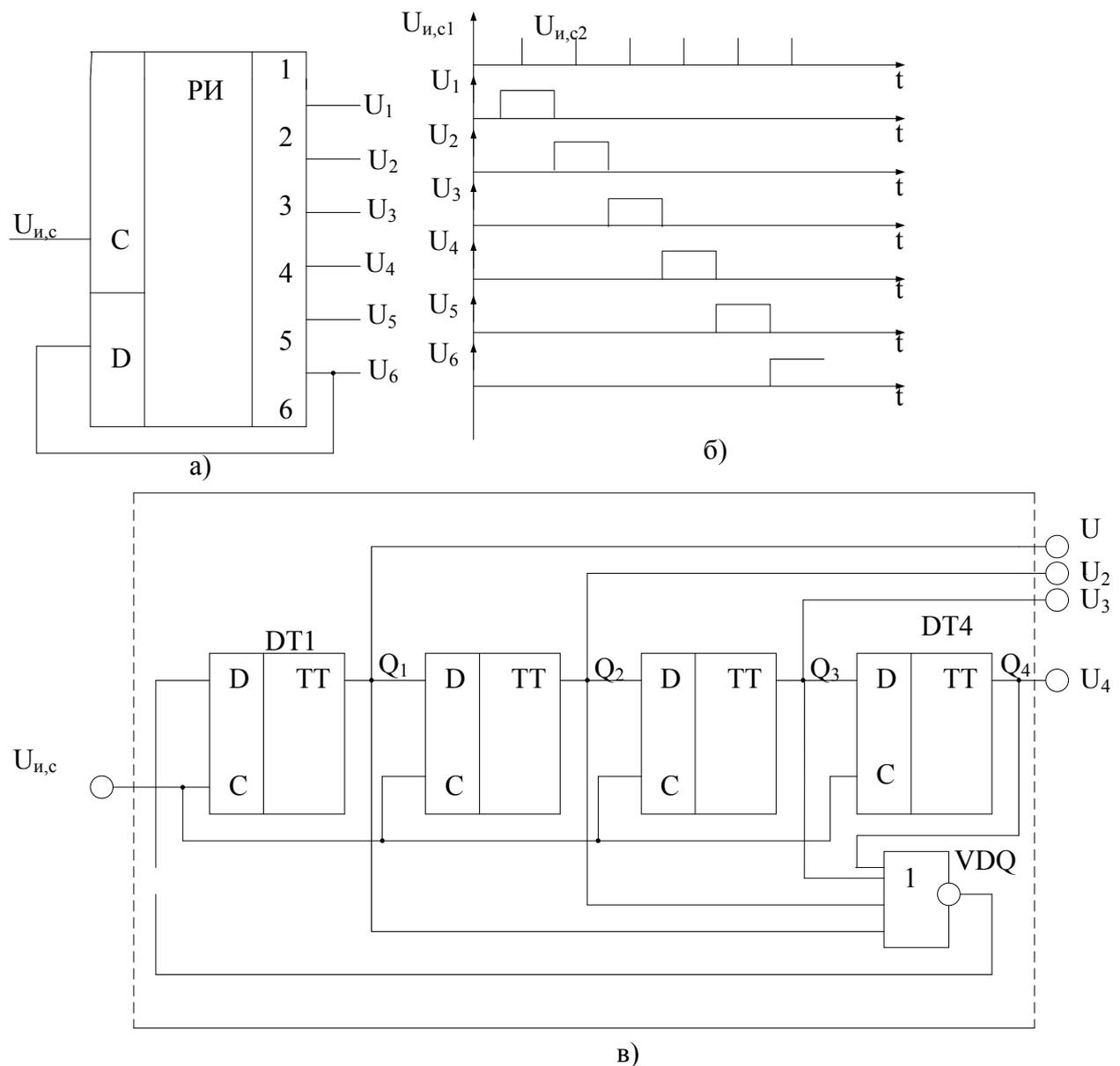


Рис. 2.1.4. Условное графическое обозначение (а), временная диаграмма действия (б) и функциональная схема (в) распределителя импульсов на триггерах

7. Формирователи и преобразователи кодов.

Простейшим кодом является число-импульсный сигнал (число стандартных счетных импульсов). Такой код представляет собой цифровой сигнал в единичной системе счисления. В автоматических информационных устройствах для передачи информации обычно используются двоичный разрядно-цифровой сигнал и более совершенные в информационном смысле коды на его основе.

Формирователи и преобразователи двоичного кода. Формирователем двоичного разредно-цифрового кода на все сочетания натурального ряда чисел в двоичной системе счисления служит стандартный микроэлектронный элемент - счетчик импульсов, входящий в состав многих серий интегральных микросхем. Счетчик формирует параллельный двоичный код из последовательности распределенных во времени импульсов, поступающих на его счетный вход T .

Формирователи и преобразователи помехоустойчивых кодов. *Помехоустойчивые коды.* Помехоустойчивые или помехозащищенные коды делятся на коды с обнаружением и коды с исправлением ошибок, обусловленных помехами в канале передачи информации. Они отличаются от двоичного на все сочетания и различаются между собой кодовым расстоянием - минимальным числом единиц, на которые различаются две соседние кодовые комбинации. Кодовое расстояние равно числу единиц, определяемых сложением кодовых комбинаций по модулю 2 (без учета переноса). Например, коды 101 и 110 различаются на две единицы: $101 + 110 = 011$. Две соседние комбинации двоичного кода на все сочетания различаются только на одну 1. Например, из восьми комбинаций трехразрядного двоичного кода на все сочетания выделяются только четыре комбинации, различающиеся на две 1, и только две комбинации, различающиеся на три 1.

Использование только кодовых комбинаций, различающихся на две 1, а именно 001, 010, 100 и 111 (с нечетным числом 1) или 000, 110, 011 и 101 (с четным числом 1), позволяет обнаружить их искажение помехой. Поступление на приемный конец канала связи одной из вторых комбинаций при передаче одной из первых комбинаций или поступление на приемный конец одной из первых комбинаций при передаче одной из вторых комбинаций означает, что произошло искажение сигнала помехой (ошибка) [8].

Использование только кодовых комбинаций, различающихся на три 1, а именно 000 и 111, или 001 и 110, или 100 и 011, или 010 и 101, позволяет исправить искажение помехой одного разряда принятого цифрового сигнала

или обнаружить искажение двух разрядов. Полагая искажение двух разрядов маловероятным, можно считать такой код позволяющим исправить принятый искаженный помехой сигнал. Если, например, сигнал на приемном конце 100, то он отличается на один разряд только от комбинации 110, на которую принятый сигнал и должен быть исправлен.

Существуют различные помехоустойчивые корректирующие (позволяющие исправление искаженного помехой кодоимпульсного сигнала) коды, формируемые из двоичного кода на все сочетания по определенным правилам соответствующими преобразователями кодов. Они содержат m контрольных символов (единиц и нулей), расставленных между k информационными символами. Характерным примером являются корректирующие коды и преобразователи Хемминга [5].

Вопросы для самопроверки по теме 2.1. «Функциональные элементы передающей части автоматических устройств»

1. Каково назначение передающей функциональной части?
2. Какие требования предъявляют к усилителям сигналов автоматических информационных устройств?
3. Как функционируют внешние обратные связи двухкаскадном интегральном усилителе?
4. В чем состоит основная особенность усилителей импульсных сигналов?
5. Как осуществляется линия передачи сигналов информации по проводу линии электропередачи?

Варианты тестов по теме 2.1.

«Функциональные элементы передающей части автоматических устройств»

1. Передающая функциональная часть – это ...
2. Что является элементом передающей части:
 - а) усилитель сигналов
 - б) транзистор
 - в) фильтр присоединения

3. Импульсный сигнал усилителя имеет вид:
 - а) прямоугольного импульса
 - б) синусоидального импульса
 - в) квадратичного импульса
4. Генератор несущих процессов сигналов, является услителем:
 - а) первого порядка
 - б) второго порядка
 - в) третьего порядка
5. Модулятор – это ...
6. Демодулятор – это ...

Тема 2.2. Фильтры симметричных составляющих

План.

1. Назначение и способы осуществления.
2. Характеристики и показатели фильтров.
3. Фильтры нулевой последовательности.
4. Пассивные фильтры обратной последовательности.
5. Активные фильтры напряжения и тока обратной последовательности.
6. Цифровые фильтры симметричных составляющих.

1. Назначение и способы осуществления.

Фильтрами симметричных составляющих называются измерительные преобразователи трехфазных несимметричных и неуравновешенных систем синусоидальных напряжений и токов в однофазные или симметричные трехфазные напряжения и токи, пропорциональные их симметричным составляющим прямой ($\underline{U}_1, \underline{I}_1$) обратной ($\underline{U}_2, \underline{I}_2$) и нулевой ($\underline{U}_0, \underline{I}_0$) последовательностей. При подведении к входным выводам a, b, c, N фильтра напряжений ZV (рис. 2.2.1, а) или токов ZA (рис. 2.2.1, б) трех фаз между выходными выводами m, n возникают напряжение $\underline{U}_{ВЫХ,Х}$ или ток $\underline{I}_{ВЫХ,К}$, определяемые составляющими $\underline{U}_1, \underline{U}_2, \underline{U}_0$ напряжений или $\underline{I}_1, \underline{I}_2, \underline{I}_0$ токов /1/.

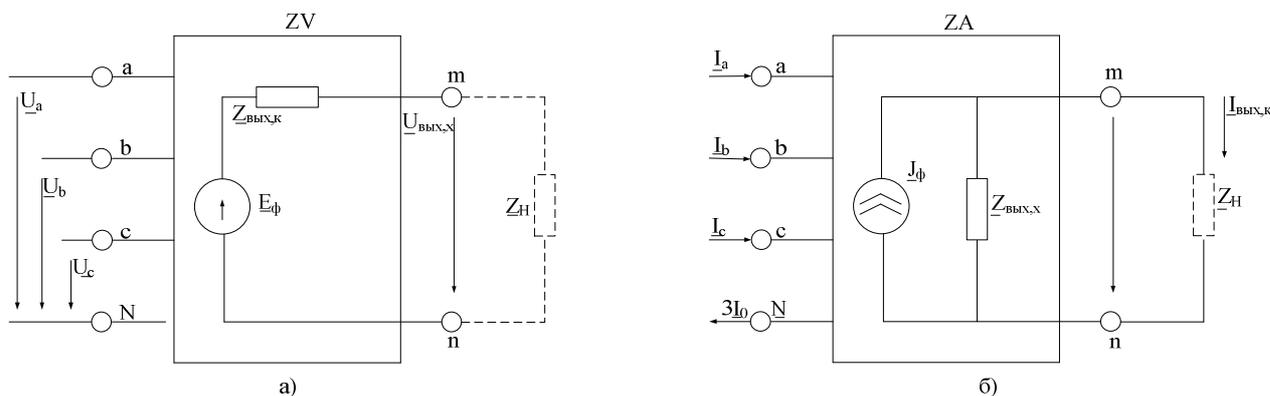


Рис. 2.2.1. Схемы включения фильтров симметричных составляющих напряжения (а) и тока (б)

Фильтры симметричных составляющих, для которых не равен нулю только один из коэффициентов преобразования, являются простыми. Они находят широкое применение, особенно фильтры обратной и нулевой последовательностей.

Известны и более сложные - трехфазные и двоянные - фильтры симметричных составляющих. Они имеют по три или четыре выходных вывода, напряжения на которых образуют симметричную трехфазную систему прямой и обратной последовательностей или пропорциональны прямой (между двумя выводами) и обратной (между другими двумя выводами) последовательностям.

В зависимости от способа реализации указанных измерительных преобразований фильтры симметричных составляющих делятся на пассивные и активные аналоговые и на цифровые. Аналоговые пассивные фильтры представляют собой соответствующие электрические цепи из реактивных и активных сопротивлений. Активные фильтры симметричных составляющих выполняются на интегральных операционных усилителях. Цифровые фильтры делятся на аппаратные, синтезируемые из интегральных элементов обработки цифровых сигналов, и на программные, реализуемые на микропроцессорах и микро ЭВМ [4].

Из пассивных аналоговых фильтров выделяются первичные фильтры симметричных составляющих, представляющие собой соответствующие

схемы соединений вторичных обмоток первичных измерительных трансформаторов напряжения и тока и первичных трансреакторов (магнитных трансформаторов тока) или первичные измерительные трансформаторы специальной конструкции. Преимущественно используются первичные фильтры напряжения и тока нулевой последовательности ввиду простоты их осуществления. Они представляют собой согласное последовательное или параллельное соединение вторичных обмоток однофазных первичных измерительных трансформаторов напряжения и тока или трансреакторов соответственно (трехтрансформаторные фильтры). При этом их выходные напряжение и ток или ЭДС трансреактора равны суммам трех фазных напряжений и токов, т.е. равны утроенным значениям соответственно напряжения и тока нулевой последовательности. Существуют трехфазные трехобмоточные первичные измерительные трансформаторы напряжения, вторичные фазные обмотки которых соединяются по схеме разомкнутого треугольника, суммирующей фазные напряжения. Их особенностью является пятистержневой магнитопровод, обеспечивающий замкнутый контур циркуляции магнитного потока нулевой последовательности. Разработаны специальные конструкции кабельных и шинных (для синхронных генераторов) первичных измерительных трансформаторов тока нулевой последовательности (однотрансформаторные фильтры, в которых суммируются магнитные потоки, создаваемые первичными фазными токами) [8].

Благодаря этому они имеют относительно низкие (по сравнению с трехтрансформаторным первичным фильтром тока нулевой последовательности) токи небаланса (помехи). Токи небаланса трехтрансформаторных первичных фильтров определяются суммой токов намагничивания трех трансформаторов, которая при уравновешенной трехфазной системе токов не равна нулю ввиду неидентичности трансформаторов тока даже одной партии данного типа.

Используемые схемы соединения вторичных обмоток двух фаз однофазных и трехфазных первичных измерительных трансформаторов напряжения и вторичных обмоток двух однофазных первичных измерительных трансформаторов тока встречно последовательно и параллельно соответственно представляют собой комбинированные фильтры напряжения и тока прямой и обратной последовательностей с одинаковыми комплексно-сопряженными коэффициентами K_1 , K_2 преобразования. Их выходные напряжение и ток, равные разностям напряжений и токов двух фаз, не содержат составляющих нулевой последовательности неуравновешенных несимметричных систем напряжений и токов.

2. Характеристики и показатели фильтров.

Составляющие обратной и нулевой последовательности трехфазной системы промышленного тока могут быть относительно низкими (по сравнению с составляющими прямой последовательности) и возникают при возмущениях в электроэнергетической системе аварийного характера, требующих быстрого формирования воздействия автоматических устройств на управляемые объекты. Поэтому главными показателями фильтров симметричных составляющих являются их быстродействие и относительный уровень выходного сигнала. Они определяются функциональными характеристиками: p - и z -передаточными функциями и комплексными коэффициентами преобразования $\underline{K}_0(j\omega)$, $\underline{K}_2(j\omega)$ и $\underline{K}_0(e^{j\omega T})$, $\underline{K}_2(e^{j\omega T})$ аналоговых и цифровых фильтров соответственно [5].

Относительный уровень сигнала аналоговых фильтров зависит от коэффициентов \underline{K}_0 , \underline{K}_2 преобразования при номинальной промышленной частоте $f_{II} = \omega_{II} / 2\pi$, определяющих выходной сигнал от помех на выходе фильтров нулевой и обратной последовательностей при трехфазной системе напряжений или токов прямой последовательности на их входах.

Помехи представляют собой напряжение или ток небаланса $U_{НБ,Х}$, $I_{НБ,К}$ выходе реальных фильтров, обусловленные: неточностью настройки фильтров

из-за разбросов параметров резисторов и конденсаторов, реакторов и трансформаторов и их изменениями вследствие возмущающих воздействий, главным из которых является отклонение промышленной частоты от номинальной; наличием высших гармонических составляющих напряжений (токов) прямой и обратной или нулевой последовательностей. Источниками помех в активных аналоговых фильтрах являются разброс параметров операционных усилителей и отличие их от идеальных.

Быстродействие фильтров симметричных составляющих, как и других измерительных преобразователей, определяется длительностью их собственных переходных процессов при нулевых начальных условиях, зависящей от постоянной времени затухания свободных составляющих напряжений или токов. Процессы в пассивных и активных аналоговых фильтрах симметричных составляющих описываются дифференциальными уравнениями первого и второго порядков. Они характеризуются соответствующими p -передаточными функциями. Однако в пассивных фильтрах второго порядка переходные процессы остаются аperiodическими, тогда как в активных они колебательные.

Процессы в цифровых фильтрах симметричных составляющих описываются разностными уравнениями и характеризуются z -передаточными функциями [9].

3. Фильтры нулевой последовательности.

Пассивные фильтры. Напряжение нулевой последовательности неуравновешенной трехфазной системы вторичных напряжений первичных измерительных трансформаторов напряжения, равно напряжению смещения изолированной нейтрали симметричной нагрузки относительно заземленной нейтрали системы вторичных напряжений. Поэтому пассивный *фильтр напряжения* нулевой последовательности состоит из трех резисторов (рис. 2.2.2, а) или конденсаторов (рис. 2.2.2, б), соединенных по схеме звезды.

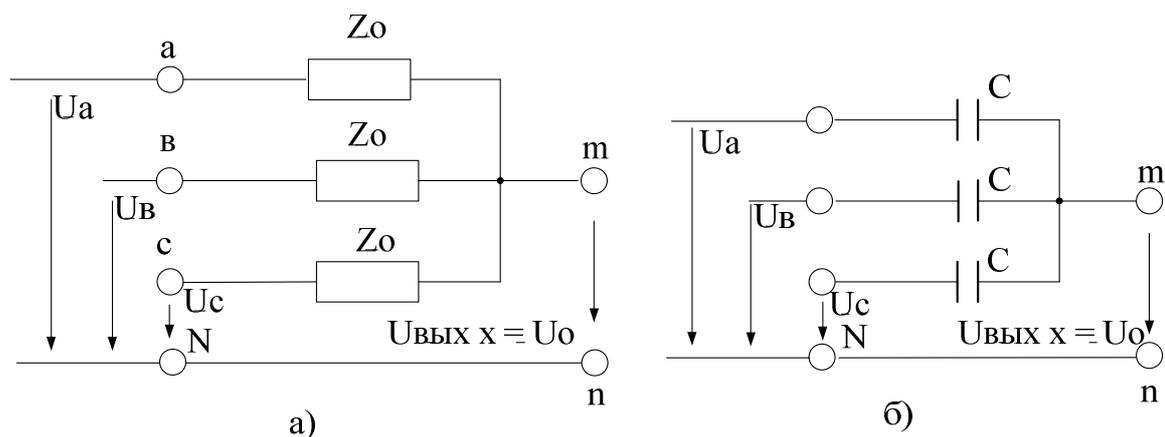


Рис. 2.2.2. Схемы фильтров симметричных составляющих напряжений нулевой последовательности

Фильтр тока нулевой последовательности представляет собой вторичный измерительный трансформатор тока с тремя первичными обмотками, к началам которых подводятся вторичные токи трех фаз первичных измерительных трансформаторов. Однако обычно ток нулевой последовательности, как указывалось, получают непосредственно от первичных измерительных трансформаторов тока или используют ток в нулевом проводе, соединяющем нейтраль нагрузки трех однофазных первичных измерительных трансформаторов тока с заземленной нейтралью их вторичных обмоток, соединенных по схеме звезд. Поэтому необходимость в фильтре тока нулевой последовательности в виде указанного вторичного измерительного трансформатора тока обычно не возникает [7].

Выходное сопротивление фильтра тока нулевой последовательности определяется только сопротивлением ветви намагничивания вторичного или первичных измерительных трансформаторов тока: $Z_{\text{ВЫХ},X} \gg jX_{\text{НАМ}}$

Активные фильтры. Поскольку напряжение и ток нулевой последовательности равны сумме соответственно напряжений и токов трех фаз, активные фильтры напряжения и тока нулевой последовательности представляют собой сумматоры на интегральных операционных усилителях с промежуточными (вторичными) измерительными трансформаторами напряжения *TLV* или тока *TIA*. В *фильтре напряжения* осуществляется отрицательная обратная связь по напряжению, а в *фильтре тока* -

отрицательная обратная связь по току. Однако схема фильтра тока получается с незаземленной нагрузкой, что не всегда приемлемо [1].

4. Пассивные фильтры обратной последовательности.

Фильтры напряжения обратной последовательности осуществляются с использованием междуфазных вторичных напряжений, не содержащих составляющих нулевой последовательности.

Из большого разнообразия фильтров напряжения обратной последовательности наиболее широко используется резисторно-конденсаторный фильтр ZV_2 (рис. 2.2.3, а). Векторные диаграммы на рис. 2.2.3, б соответствуют подключению фильтра к симметричной системе напряжений прямой последовательности. Из диаграммы видно, что при номинальной промышленной частоте напряжение $\underline{U}_{ВЫХ,Х1} = 0$, точки m и n совмещаются.

Диаграмма на рис. 2.2.3, в соответствует подключению фильтра к симметричной системе напряжений обратной последовательности.

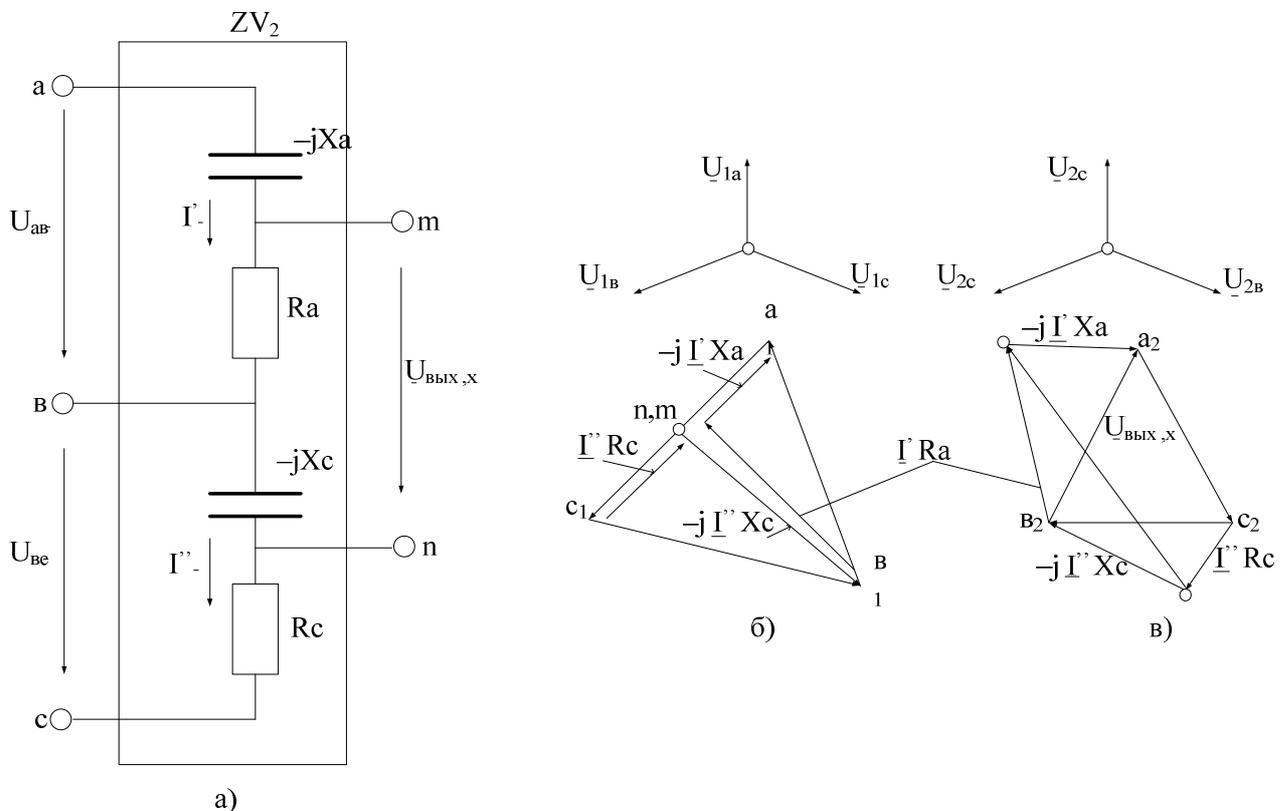


Рис. 2.2.3. Схема (а) и векторные диаграммы (б, в) резисторно-конденсаторного фильтра напряжения обратной последовательности

Фильтры тока обратной последовательности, применяемые на практике, выполняются с использованием фазных токов $\underline{I}_a, \underline{I}_b, \underline{I}_c$.

5. Активные фильтры напряжения и тока обратной последовательности.

Принципиально возможно осуществление активных фильтров обратной последовательности напряжений и токов по соответствующим схемам измерительных преобразователей источников ЭДС и источников токов в источники выходных напряжения и тока соответственно. Однако в качестве фильтров тока обратной последовательности, применяемых на практике, используются фильтры обратной последовательности напряжений, пропорциональных входным токам. Поэтому фильтры напряжений ZV_2 и токов ZA_2 обратной последовательности имеют различные входные измерительные преобразователи: трансформаторы напряжений TLV (см. рис. 2.2.4, а), трансреакторы TAV (см. рис. 2.2.4, б) или трансформаторы тока, нагруженные балластными резисторами.

Фильтр обратной последовательности в соответствии должен состоять из двух фазоповоротных элементов напряжений $\underline{U}_{ab}, \underline{U}_{bc}$ и сумматора, реализуемых на одном операционном усилителе. Выбором фазоповоротных элементов и определяются основные показатели активных фильтров - относительный уровень сигнала и быстродействие.

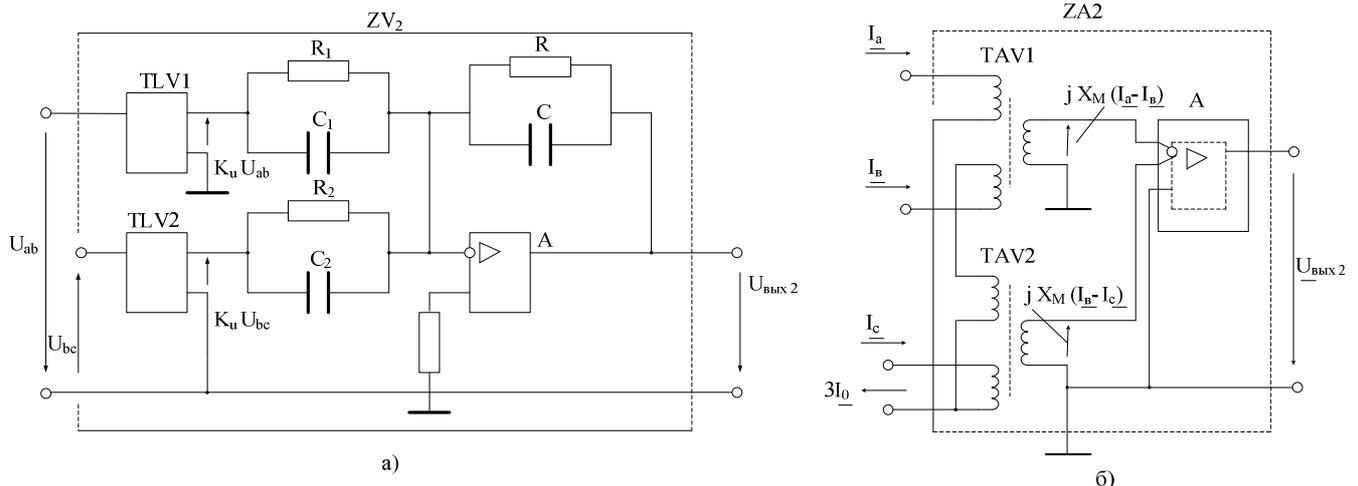


Рис. 2.2.4. Схемы активных фильтров обратной последовательности напряжения (а) и тока (б)

Поскольку относительный уровень сигнала зависит прежде всего от составляющей напряжения небаланса $U_{НБ1}$ обусловленной изменениями промышленной частоты, фазоповоротные элементы должны обеспечивать возможно меньшую зависимость абсолютного значения и аргумента комплексных коэффициентов преобразования от частоты. Свойством независимости от частоты абсолютного значения коэффициента преобразователя обладают неминимально-фазовые элементы [2].

Практическое значение имеют фильтры напряжения (тока) обратной (прямой) последовательности, выполняемые на одном интегральном операционном усилителе. При этом используются минимально-фазовые фазоповоротные элементы в виде частотных фильтров на основе инвертирующего включения операционного усилителя, наиболее удобного для реализации сумматора. Применение неминимально-фазовых элементов (фазовых контуров) несмотря на свойственную им независимость от частоты амплитуды выходного напряжения не улучшает имеющий важное значение информационный показатель фильтров и даже ухудшает его. Ухудшение показателя объясняется более изменением фазы комплексного коэффициента передачи фазового контура в функции изменения промышленной частоты, чем частотного фильтра, что иллюстрируется следующим примером.

6. Цифровые фильтры симметричных составляющих.

Аналого-цифровое преобразование мгновенных значений фазных напряжений и токов несимметричных и неуравновешенных трехфазных систем в дискретные значения в виде разрядно-позиционных двоичных кодов создает возможности вычислений в реальном времени дискретных мгновенных значений, амплитуд и фаз их симметричных составляющих. Соответствующие вычисляющие измерительные преобразователи являются цифровыми фильтрами симметричных составляющих [6].

В общем виде z -передаточная функция цифрового фильтра симметричных составляющих может быть получена соответствующим преобразованием p -передаточной функции соответствующего аналогового фильтра. p -передаточная функция фильтра симметричных составляющих представляет собой передаточную функцию параллельно соединенных частотных фильтров, в частности ФНЧ и ПЧФ второго порядка. Поэтому z -передаточная функция цифрового фильтра симметричных составляющих прямой и обратной последовательностей может быть записана как сумма z -передаточных функций рекурсивных цифровых частотных фильтров. По z -передаточной функции может быть составлена структурная схема цифрового фильтра симметричных составляющих.

Однако такой цифровой, как и аналоговый, фильтр имеет теоретически бесконечную импульсную характеристику, обуславливающую соответствующую инерционность формирования сигнала. Поэтому разработаны алгоритмы функционирования и структуры цифровых фильтров симметричных составляющих прямой и обратной последовательностей, определяющих необходимые операции над фазными или междуфазными напряжениями (токами), обеспечивающими конечную и относительно малую задержку формирования сигнала [8].

Вычисления информационных параметров - амплитуд и фаз симметричных составляющих напряжений и токов - могут производиться как по дискретным мгновенным значениям симметричных составляющих, так и по

двоичным кодам ортогональных составляющих фазных или междуфазных напряжений и токов. Соответственно можно различать два алгоритма функционирования цифровых фильтров симметричных составляющих.

Вопросы для самопроверки по теме 2.2.

«Фильтры симметричных составляющих»

1. Как выполняются первичные фильтры напряжения и тока нулевой последовательности?
2. Как выполняется пассивный вторичный фильтр напряжения нулевой последовательности?
3. Как выглядят векторные диаграммы напряжения, иллюстрирующие действия фильтра напряжения обратной последовательности с двумя входными междуфазными напряжениями?
4. Как вычисляется амплитуда напряжения (тока) нулевой последовательности в цифровом фильтре?
5. Какие способы вычисления амплитуд симметричных составляющих используются в цифровых фильтрах?
6. Что такое информационный показатель?

Варианты тестов по теме 2.2.

«Фильтры симметричных составляющих»

1. Фильтры симметричных составляющих это –
2. Пассивный фильтр напряжения нулевой последовательности состоит из трех ... или ... , соединенных по схеме
3. В фильтре напряжения осуществляется обратная связь:
 - а) по току;
 - б) по напряжению;
 - в) по частоте.
4. Фильтры токов обратной последовательности, выполняются с использованием:

- а) фазных напряжений;
 - б) полных токов;
 - в) фазных токов.
5. TLA –
6. Цифровой фильтр симметричных составляющих это –

Тема 2.3. Измерительные преобразователи мощности

План.

1. Назначение, виды и способы осуществления.
2. Измерительные преобразователи мощности на квадраторах.
3. Времяимпульсные измерительные преобразователи мощности.
4. Быстродействующие аналоговые измерительные преобразователи мощности.
5. Аналого-цифровой измерительный преобразователь.

1. Назначение, виды и способы осуществления.

Назначением измерительных преобразователей мощности переменного и постоянного тока является формирование электрических сигналов информации о реактивной и активной мощностях синхронных генераторов и компенсаторов, статических источников реактивной мощности, линий электропередачи переменного и постоянного тока и других управляемых объектов электроэнергетических систем. Измерительные преобразователи мощности осуществляются на основе аналогового перемножения мгновенных значений непрерывно изменяющихся напряжения и тока или цифрового перемножения их дискретных мгновенных значений в двоичных кодах. Возможно и комбинирование - аналого-цифровое измерительное преобразование мощности, реализуемое умножающими ЦАП [3].

Произведение мгновенных значений, как известно, представляет собой мгновенную мощность, в частности при синусоидальном токе промышленной частоты равную:

$$\begin{aligned}
 p(t) &= U_m \sin \omega_{\Pi} t I_m \sin(\omega_{\Pi} t - \phi) = \\
 &= UI \cos \phi - UI \cos(2\omega_{\Pi} t - \phi)
 \end{aligned}
 \tag{2.3}$$

Постоянная составляющая в выражения (2.3) и есть выходной сигнал измерительного преобразователя активной мощности. Аналогично постоянная произведения мгновенных значений сдвинутого по фазе на угол $\pi/2$ напряжения и тока представляет собой выходной сигнал измерительного преобразователя реактивной мощности $UI \sin \phi$.

Поэтому аналоговые и аналого-цифровые измерительные преобразователи мощности формируют выходной сигнал в виде пропорционального активной или реактивной мощности постоянного напряжения или тока. Выходным сигналом цифровых измерительных преобразователей мощности является двоичный код, отображающий дискретные значения только постоянной составляющей произведения.

Гармоническая составляющая удвоенной промышленной частоты выражения (7.1) представляет собой внутреннюю схему, генерируемую при измерительном преобразовании мощности. Она задерживается аналоговым или цифровым частотным фильтром нижних частот или компенсируется путем использования суммы (разности) произведений мгновенных значений составляющих напряжения и тока, сдвинутых по фазе, в частности ортогональных, и другими методами. **Известны различные способы технической реализации аналогового перемножения** мгновенных значений, которые можно разделить на **прямые и косвенные** [9].

Прямые способы осуществляются на основе некоторых физических явлений, допускающих электрическое аналоговое моделирование операции перемножения мгновенных значений двух электрических или электрической и магнитной величин. Свойством прямого перемножения является линейная зависимость выходного напряжения (тока) от каждой из входных величин (напряжения и тока) при постоянном значении второй из них.

Способ аналогового перемножения мгновенных значений электрической и магнитной величин на основе гальваномагнитного эффекта Холла можно называть *способ непосредственного прямого перемножения*. Из других способов прямого перемножения практическое значение имеют способ линейного управления мгновенными значениями одной из перемножаемых величин источником тока, пропорционального мгновенным значениям другой перемножаемой величины, и импульсный способ.

Способ линейного управления реализуется на основе использования линейной зависимости от тока коллектора I_k биполярного транзистора при малых его изменениях ΔI_k крутизны переходной характеристики $I_k = f(U_{БЭ})$ - зависимости тока коллектора от напряжения $U_{БЭ}$ эмиттерном переходе.

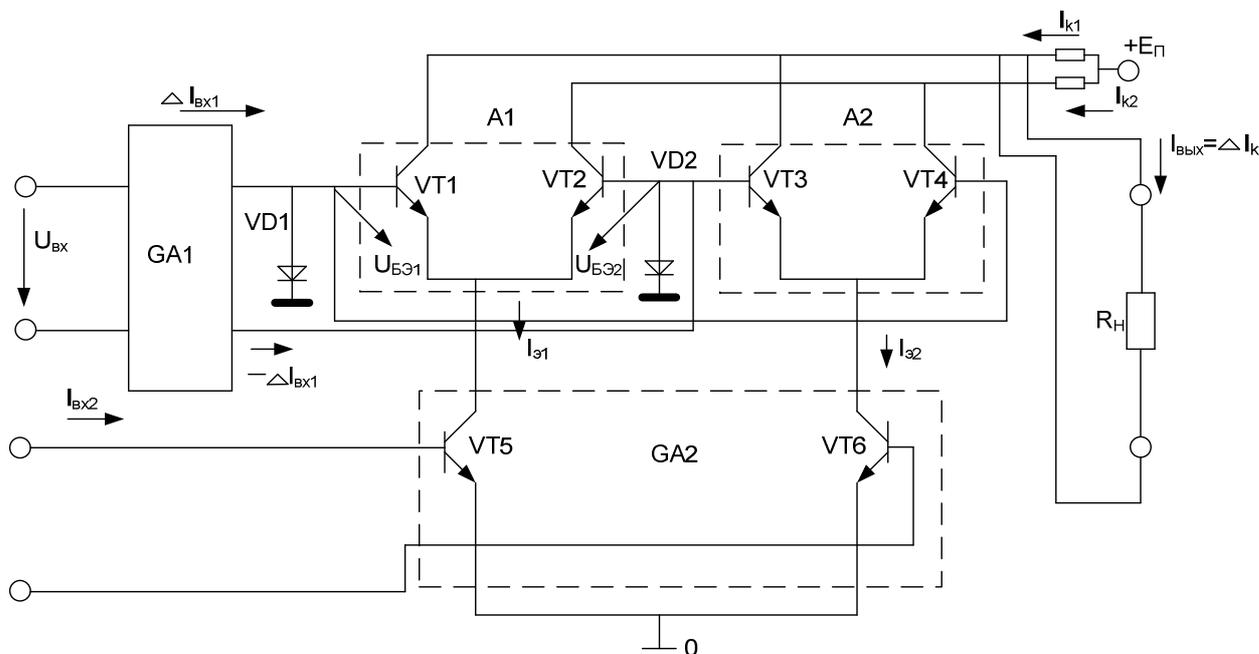


Рис. 2.3.1. Схема, поясняющая действие интегрального перемножителя с переменной крутизной характеристики

Поэтому соответствующий перемножитель в специальной литературе называют перемножителем с переменной крутизной. По такому способу функционируют интегральные перемножители типов К525ПС1 и К525ПС2.

Сущность способа поясняется схемой на рис 2.3.1. Используется дифференциальный усилитель А1 на транзисторах VT1 и VT2 с общим током

эмиттера $I_{э1}$ управляемого источника тока $GA2$. Как известно, выходной ток $I_{вых} = \Delta I_k$ дифференциального усилителя не содержит постоянного тока исходного режима транзисторов и определяется в соответствии с переходной характеристикой $I_k = f(U_{бэ})$ только изменяющимся напряжением $U_{бэ}$.

Рассмотренный перемножитель функционирует при разнополярных $\pm I_{э1}$ изменениях одного из входных токов, но только при однополярном изменении, а именно при возрастании второго входного тока $I_{э2}$, т.е. является двухкватратным. Выполнение перемножения двух входных токов обоих знаков, в частности синусоидальных токов, достигается использованием двух дифференциальных усилителей $A1$, $A2$ (рис. 2.3.1) с дифференциальным управлением источником тока $GA2$, показанным условно (транзисторы $VT5$, $VT6$). Соотношения величин в схеме перемножителя подробно рассмотрены в.

Времяимпульсный способ прямого перемножения состоит в том, что длительность импульса тока с практически прямоугольной формой кривой (рис. 2.3.2,а) с относительно высокой (по сравнению с промышленной f_{Π}) частотой основной гармонической составляющей (с периодом $T_0 = T_{\Pi} = 1/f_{\Pi}$) или относительная разность длительностей $\Delta t_* = (t_{u1} - t_{u2})/T_0$ положительного t_{u1} и отрицательного t_{u2} импульсов (рис. 2.3.2,б) пропорциональна дискретизованному (периодом T_0) мгновенному значению одной из перемножаемых величин, например напряжению U_n (рис. 2.3.2, в), а его значение – высота импульса (рис. 2.3.2,б) – пропорциональна мгновенному значению тока i_n (рис. 2.3.2,в). Среднее (за период T_0) значение импульсного тока (рис. 2.3.2,б) пропорционально площади импульсов, т.е. произведению дискретизованных мгновенных значений $U_n = U(nT_0)$, $i_n = i(nT_0)$ перемножаемых напряжения и ток [1].

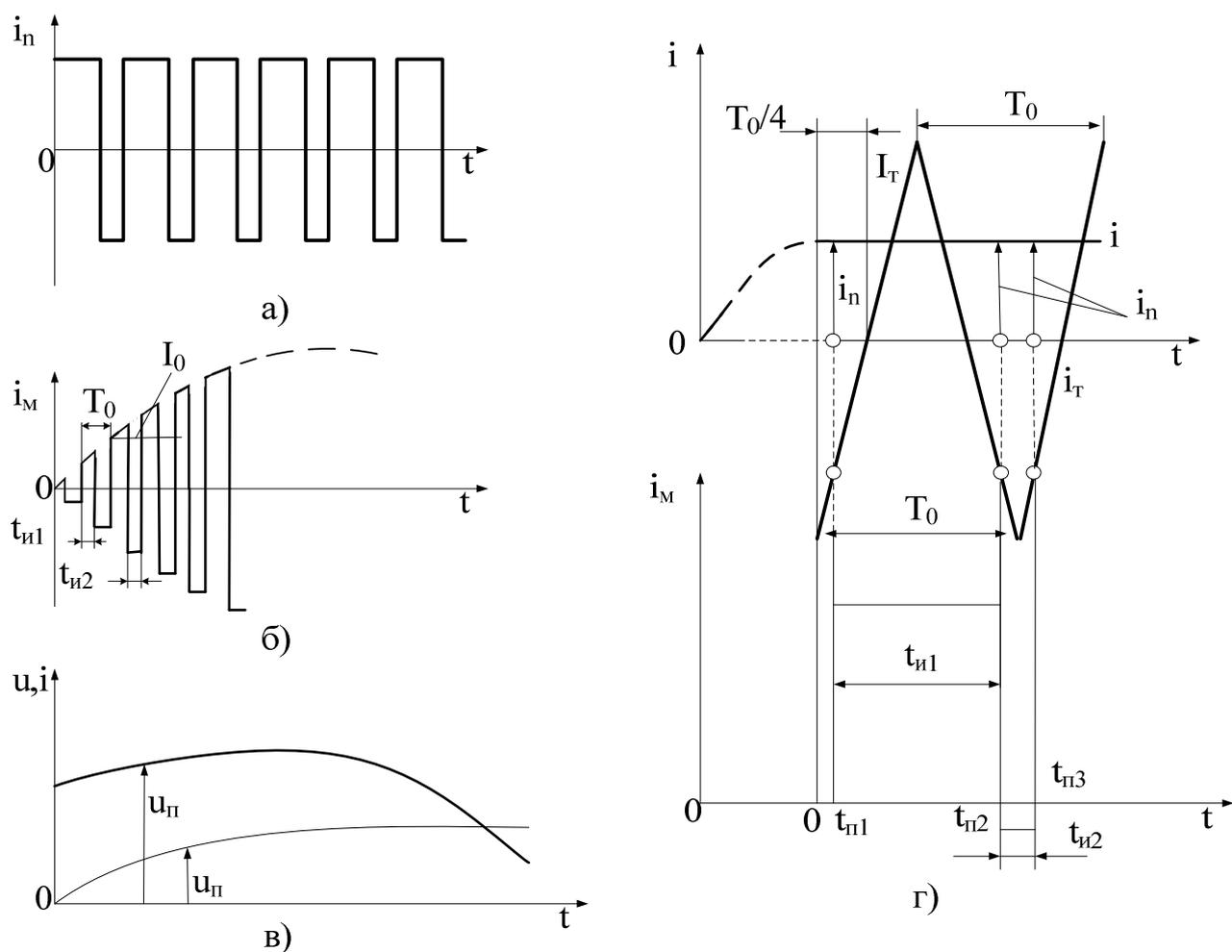


Рис. 2.3.2. Временные диаграммы, поясняющие первый (а, б) и второй (г) способы прямого времяимпульсного перемножения дискретизованных мгновенных значений U_n , i_n синусоидального напряжения и тока (в)

Косвенные способы перемножений мгновенных значений напряжения и тока основаны на замене произведения различными аналитическими соотношениями, тождественно равными произведению.

В настоящее время в автоматических устройствах электроэнергетических систем используются аналоговые измерительные преобразователи мощности, функционирующие на основе времяимпульсного прямого перемножения и косвенного с квадратурованием мгновенных значений величин. Это объясняется некоторыми недостатками непосредственного гальваномагнитного перемножителя – холлотрона, главным образом нетехнологичностью его изготовления и зависимостью ЭДС от температуры окружающей среды, и появлением интегральных перемножителей только в самое последнее время.

Однако разработаны и гальваномагнитные и на интегральных перемножителях измерительные преобразователи, обладающие важным достоинством – быстроедействием. Разработаны также измерительные преобразователи, функционирующие на основе косвенного перемножения с времяимпульсным квадратирующим.

2. Измерительные преобразователи мощности на квадраторах

При реализации измерительных преобразователей мощности переменного тока на основе замены перемножения, суммированием синусоидальных напряжения и тока производится с преобразованием тока в напряжение, а электрическое вычитание квадратируемых величин – соответствующим включением полупроводниковых выпрямителей.

На рис. 2.3.3 и 2.3.4 приведены принципиальные схемы измерительных преобразователей активной мощности, например на диодных аппроксимирующих квадраторах (рис. 2.3.3, а), а реактивной – на варисторных RU квадраторах (рис. 2.3.4, а). Измерительные преобразователи различаются схемами формирования квадратируемых величин. Для преобразования тока I в пропорциональное напряжение в первом (рис. 2.3.3, а) применяется измерительный трансформатор тока TIA , нагруженный резистором R , а во втором (рис. 2.3.4, а) – трансреактор TAV с сопротивлением взаимоиндукции jX_M .

В измерительном преобразователе с варисторными квадраторами производится квадратирующее непосредственно мгновенных значений сформированных величин с сохранением их знака, а в измерительном преобразователе с диодными квадраторами – выпрямленных (абсолютных) мгновенных значений: квадраторы включены в цепи диодов $VD1', VD2'$ и $VD1'', VD2''$ выпрямителей (см. рис. 2.3.3, а). При показанных на схеме условных положительных направлениях мгновенных значений u_I, u_{II} верхний квадратор преобразует положительные мгновенные значения, а нижний – отрицательные мгновенные значения напряжений [8].

Квадратор состоит из нескольких диодов, например $VD1-V D2$ закрытых обратными напряжениями $U^+ - U^{++}$ делителя ЭДС $E_{\text{п}}$ (резисторы R_d) стабильного источника питания, или стабилитронов. При малых мгновенных значениях напряжения $u_l \leq U^+$ сопротивление цепи выпрямленного тока практически (при $R_d \leq R_0$) равно сопротивлению резистора $R_0 = ctg\gamma_0$ (рис. 2.3.3, б). По мере повышения напряжения, например при $|u_l| \geq U^+, |u_l| \geq U^{++}$, открываются диоды $VD1, VD2$ (или стабилитроны) и подключают параллельно R_0 резисторы R_1, R_2 . Эквивалентное сопротивление цепи тока ступенями уменьшается до $R_{1\text{эк}} = ctg\gamma_1, R_{2\text{эк}} = ctg\gamma_2$. Зависимость мгновенного i_l и среднего I_{0l} значений выходного тока от мгновенного $|u_l|$ и действующего U_l значений напряжения представляет собой ломаную линию, аппроксимирующую с необходимой точностью параболу (рис. 2.3.3, б).

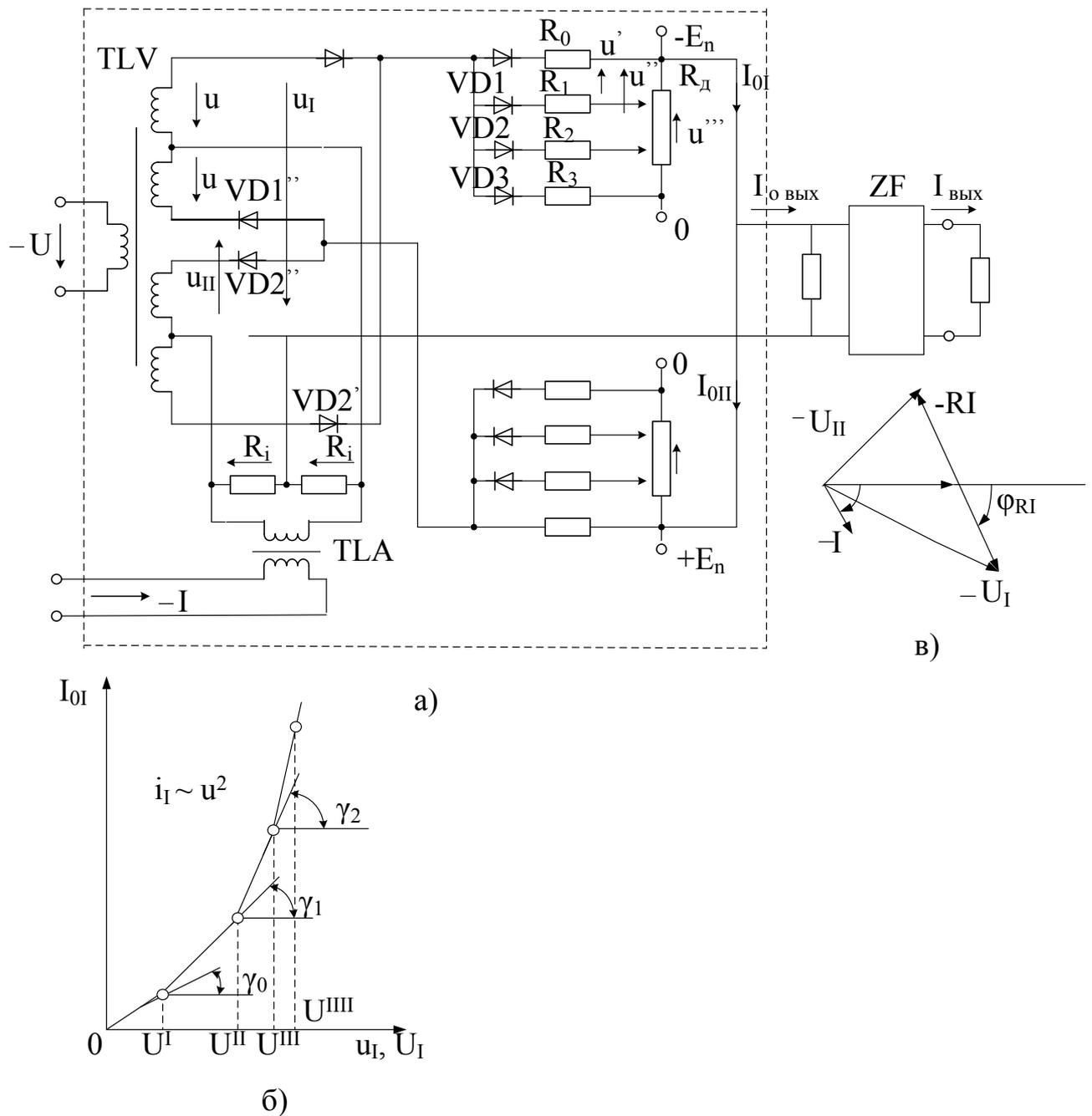


Рис. 2.3.3. Схема (а) и векторная диаграмма (в) измерительного преобразователя активной мощности не диодных квадраторах и их характеристика (б)

Векторные диаграммы на рис. 2.3.3, в и 2.3.4, б иллюстрируют формирование квадратируемых напряжений U_I и U_{II} при коэффициентах трансформации измерительных трансформаторов TLV и TLA $K_U = K_I = 1$.

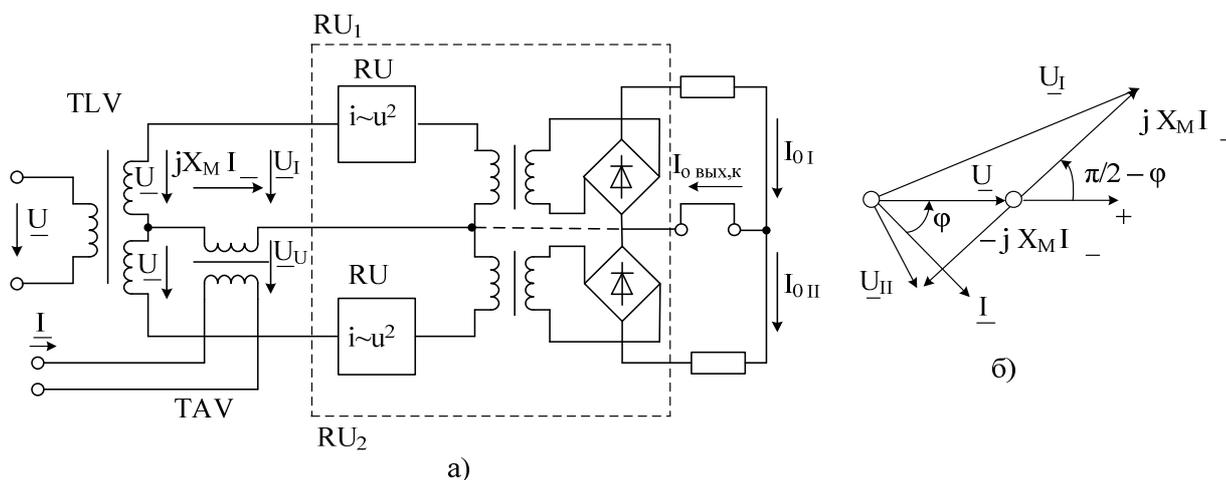


Рис. 2.3.4. Схема (а) и векторная диаграмма (б) измерительного преобразователя реактивной мощности на варисторных квадраторах

При трехфазном исполнении, т.е. при использовании трех однофазных преобразователей мощности с общим резистором нагрузка R_H или двух преобразователей, включенных по схеме двух ваттметров, гармонические составляющие токов взаимно компенсируются, поскольку сумма мгновенных мощностей трех фаз равна активной мощности [5].

Однако при несимметрии напряжений и токов на выходе трехфазного измерительного преобразователя имеет место гармоническая составляющая удвоенной частоты. Относительный уровень сигнала снижается по мере возрастания несимметрии. Поэтому и при трехфазном исполнении необходим частотный фильтр на выходе измерительного преобразователя. Удовлетворительная совместная работа однофазного измерительного преобразователя с полупроводниковым интегральным операционным усилителем на выходе, выпускаемого промышленностью, обеспечивается при частотном фильтре ZF (усилитель на схеме 2.3.3, а не показан) с постоянной времени не менее $\tau = 10$ мс; время установления выходного сигнала на уровне 0,95 установившегося при нулевых начальных условиях переходного процесса $t_y = 3\tau = 1.5TП = 30$ мс.

3. Времяимпульсные измерительные преобразователи мощности

К времяимпульсным относятся измерительные преобразователи мощности, функционирующие по способу прямого перемножения на основе

широтно - и амплитудно- импульсной модуляции и по способу косвенного перемножения на основе неявного времяимпульсного квадратирувания /9/.

Измерительные преобразователи на модуляторах.

Промышленностью выпускаются измерительные преобразователи активной и реактивной мощностей трехфазной уравновешенной (не содержащей тока нулевой последовательности) системы токов, функционирующие по способу прямого времяимпульсного перемножения [4].

На рис. 2.3.5 приведена упрощенная схема измерительного преобразователя активной мощности с полупроводниковым широтно-импульсным модулятором, функционирующим на основе интегрирования напряжения, пропорционального перемножаемому току.

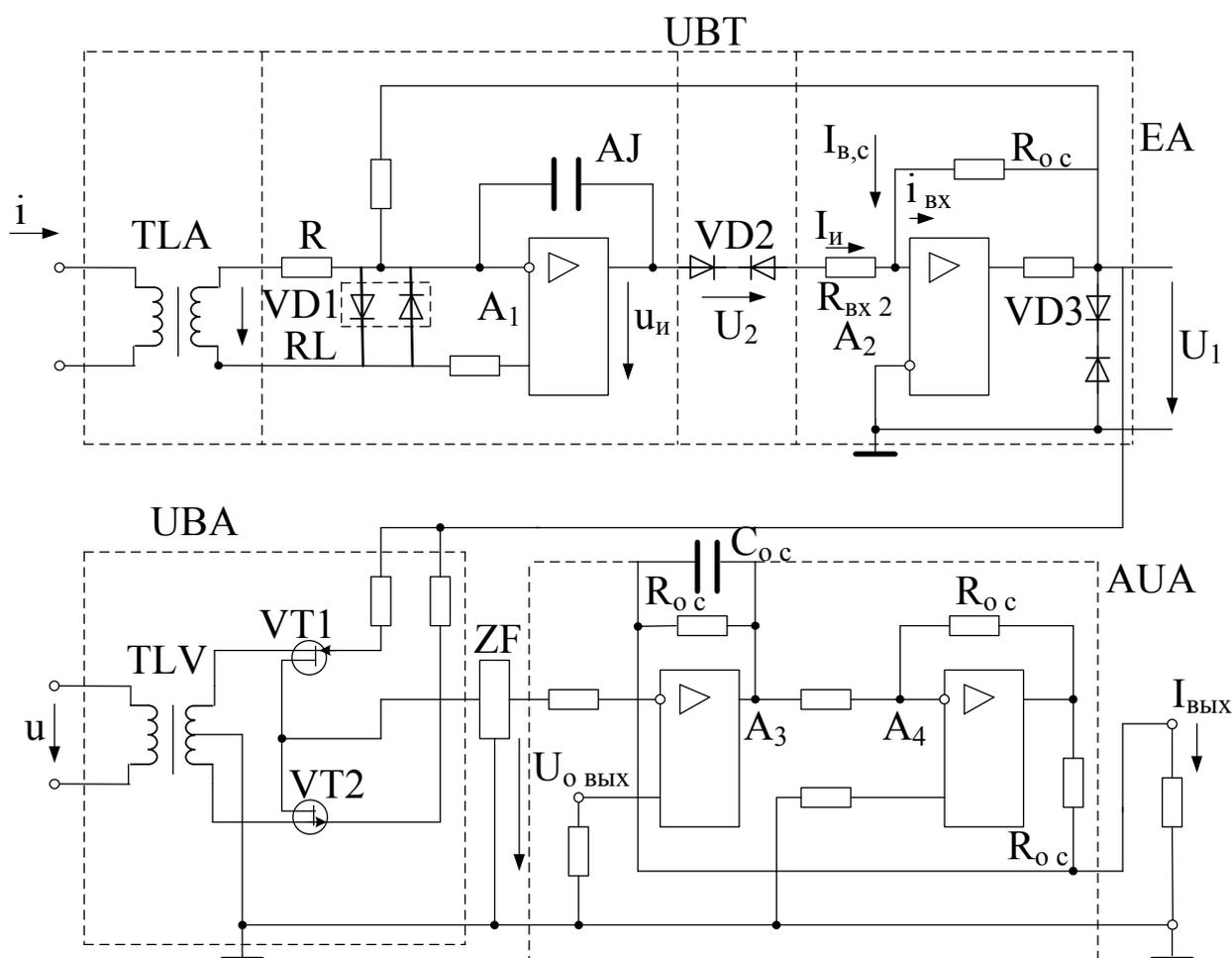


Рис. 2.3.5. Схема времяимпульсного измерительного преобразователя активной мощности с широтно-импульсным модулятором, функционирующим на основе интегрирования перемножаемого напряжения

Широтно-импульсный модулятор UBT состоит из интегратора AJ и компаратора EA на интегральных операционных усилителях $A1$ и $A2$ соответственно. Стабилитроны $VD1$ ограничивают напряжение на входе интегратора, поскольку интегрируется напряжение iR , пропорциональное мгновенному значению входного тока, который может значительно превышать номинальный (при коротких замыканиях в электроэнергетической системе), а стабилитроны $VD2$ и $VD3$ устанавливают напряжения U_2 и U_{lf} которые должны быть постоянными.

Амплитудно-импульсный модулятор UBA выполнен по схеме управляемого выпрямителя с переключателями на полевых униполярных транзисторах $VT1$, $VT2$, которые могут включаться, непосредственно в цепь переменного тока. Напряжение на его выходе описывается указанной дискретизованной периодом T_0 функцией. Пассивный резисторно-конденсаторный частотный фильтр ZF производит выделение его постоянной составляющей $U_{0\text{ВЫХ}}$ которая преобразуется в выходной ток $I_{\text{ВЫХ}}$ активным преобразователем AUA источника ЭДС в источник тока. Он выполнен в соответствии с принципиальной схемой, обеспечивающей заземление нагрузки, на двух операционных усилителях $A3$ и $A4$, с общей отрицательной обратной связью.

Измерительные преобразователи на времяимпульсных квадраторах.

Разработаны измерительные преобразователи активной мощности типа ИПТАН-301, функционирующие по способу косвенного перемножения, реализуемого времяимпульсными квадраторами.

4. Быстродействующие аналоговые измерительные преобразователи мощности.

Для современных автоматических управляющих устройств, особенно устройств противоаварийного управления электроэнергетическими объектами, необходимы быстродействующие измерительные преобразователи мощности.

Поэтому разработаны быстродействующие измерительные преобразователи выполненные на гальванномагнитных перемножителях – холлотронах и интегральных перемножителях с переменной крутизной.

Гальванномагнитные измерительные преобразователи.

Взаимокомпенсация гармонических составляющих органически свойственна сдвоенному холлотрону за счет дифференцирования перемножаемых синусоидальных напряжений и тока промышленной частоты.

Разработаны гальванномагнитные быстродействующие измерительные преобразователи как активной, так и реактивной мощности, выполняемые на двух гальванномагнитных преобразователях мгновенной мощности.

Недостатками гальванномагнитных измерительных преобразователей мощности являются, плохая технологичность изготовления и зависимость ЭДС Холла от температуры окружающей среды.

Измерительные преобразователи на интегральных перемножителях.

При построении быстродействующего измерительного преобразователя активной и реактивной мощности однофазного промышленного тока на двух интегральных перемножителях необходимо разложение синусоидальных напряжения и тока на две составляющие, сдвинутые по фазе на некоторый угол, в частности ортогональных составляющих. Поэтому схемы измерительных преобразователей содержат фазоповоротные элементы $U\theta_1 - U\theta_4$ (рис. 2.3.6, *a* и *б*), обеспечивающие указанный угол сдвига фаз между составляющими \underline{U}' и \underline{U}'' и $(RI)'$, $(RI)''$ перемножаемых напряжений \underline{U} и RI , равный $\gamma = \psi' - \psi''$ в частности $\gamma = \pi/2$ (рис. 2.3.6, *в* и *г*). Они и определяют быстродействие измерительных преобразователей, поскольку их постоянные времени монотонно зависят от угла сдвига фаз [1].

Однако при приведенных на рис. 2.3.6, *a* и *б* простых структурных схемах при $\gamma < \pi/2$ полная компенсация гармонических составляющих обеспечивается только в измерительном преобразователе реактивной мощности (рис. 2.3.6, *б*), в преобразователе активной мощности (рис. 2.3.6, *a*) она обеспечивается лишь

при $\gamma = \pi/2$. Указанные составляющие $\underline{U}' = U \cdot e^{j\psi'}$, $\underline{U}'' = U \cdot e^{j\psi''}$, $(RI)'' = (RI)' \cdot e^{j\psi'}$, $(RI)' = (RI)'' \cdot e^{j\psi''}$ попарно перемножаются: в измерительном преобразователе активной мощности \underline{U}' , $(RI)'$ и \underline{U}'' , $(RI)''$, а в измерительном преобразователе реактивной мощности \underline{U}' , $(RI)''$ и \underline{U}'' , $(RI)'$.

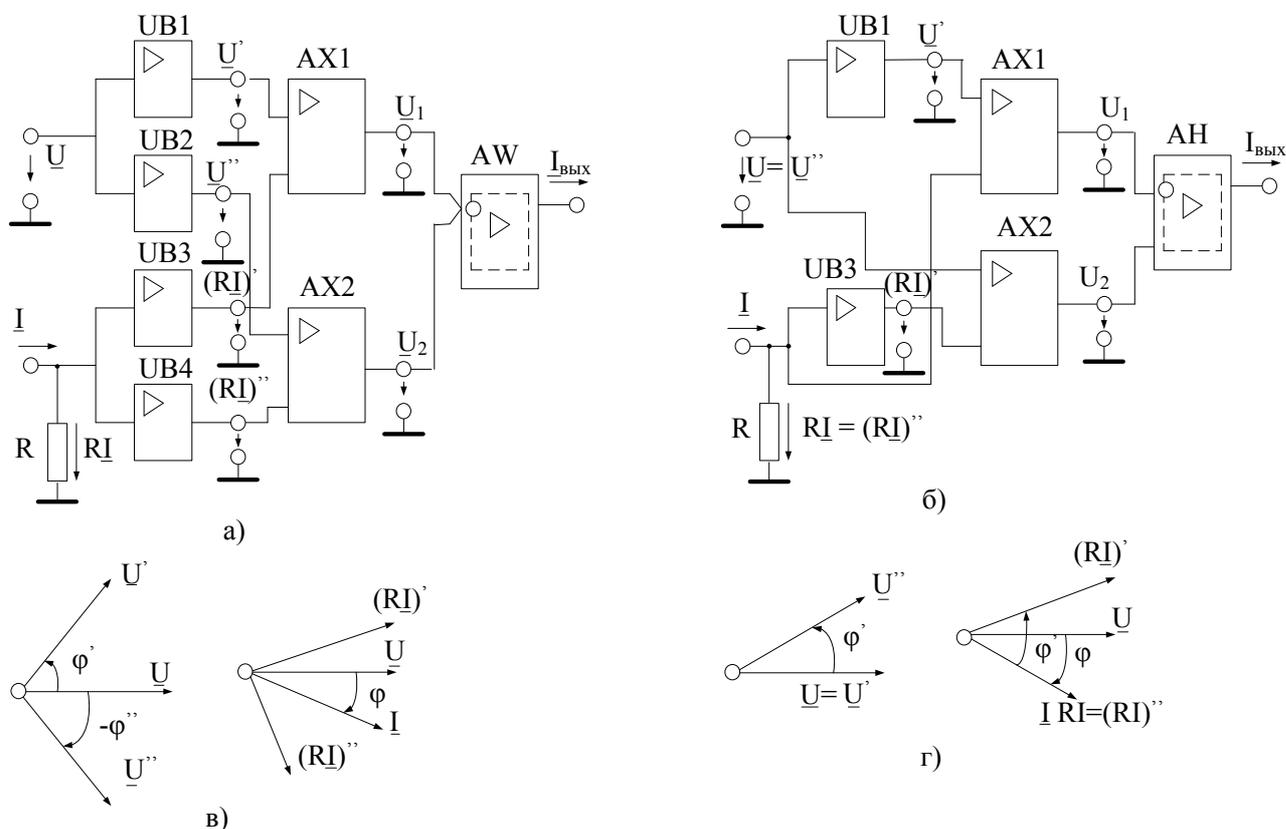


Рис. 2.3.6. Функциональные схемы и векторные диаграммы измерительных преобразователей активной (а) и реактивной (б) мощностей на интегральных перемножителях

5. Аналого-цифровой измерительный преобразователь.

Цифровой преобразователь может функционировать как перемножитель, поскольку его выходной ток пропорционален цифровому сигналу при неизменной ЭДС источника питания разветвителя токов или пропорционален изменяющейся ЭДС при неизменном двоичном коде на его выходе: обеспечивается линейная зависимость выходной величины от одной из входных при постоянном значении второй входной величины. При этом могут перемножаться только положительные мгновенные значения напряжения и

тока, т.е. перемножитель не различает знака мгновенной мощности – является двухкватратным.

В измерительном преобразователе используются АЦП положительных мгновенных значений тока следящего типа с реверсивным счетчиком и перемножающий ЦАП. Аналого-цифровой преобразователь функционирует в течении времени совпадения по знаку мгновенных значений напряжения и тока, формируемых времяимпульсным преобразователем [6].

Вопросы для самопроверки по теме 2.3.

«Измерительные преобразователи мощности»

1. Как принципиально осуществляется измерительное преобразование активной мощности?
2. В чем состоит способ прямого времяимпульсного перемножения мгновенных значений напряжения и тока?
3. Как функционирует измерительный преобразователь активной мощности на времяимпульсных квадраторах?
4. За счет чего достигается быстродействие измерительных преобразователей мощности на двух перемножителях?
5. Каково время установления выходного сигнала?

Варианты тестов по теме 2.3.

«Измерительные преобразователи мощности»

1. Измерительный преобразователь мощности – это ...
2. Перечислите способы технической реализации аналогового перемножения.
3. Квадратирование величин происходит посредством включения:
 - а) полупроводниковых выпрямителей
 - б) диодов в параллель
 - в) постоянного тока
4. Времяимпульсные преобразователи мощности – это...
5. В измерительном преобразователе используются АЦП мгновенных значений тока.

МОДУЛЬ 3

«ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ. ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ЧАСТЬ АВТОМАТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ»

Тема 3.1. Элементы сравнения сигналов. Измерительные органы автоматических устройств.

Тема 3.1.1. Элементы сравнения сигналов

План.

1. Принципы действия элементов сравнения.
2. Характеристики элементов сравнения.
3. Пассивные элементы сравнения.
4. Активные выпрямительные элементы сравнения сигналов.
5. Дискретные элементы сравнения фаз.
6. Цифровые элементы сравнения.

1. Принципы действия элементов сравнения.

Сравнения сигналов является основной информационной операцией измерительной части автоматических устройств. Сравнение состоит в сопоставлении на основе аналогового моделирования или цифровой реализации вычитания однородных информационных параметров. В качестве информационных параметров используются амплитуда, фаза и частота переменного тока, абсолютное значение и направление (знак) постоянного тока. Функциональные элементы, автоматических устройств, выполняющие сравнение сигналов, называются элементами сравнения (ЭС) – дискриминаторами. Элементы сравнения электрических величин постоянного тока объединяются с ЭС амплитуд общим названием «элементы сравнения абсолютных значений».

Преимущественно применяются ЭС амплитуд и фаз синусоидальных величин. Если одновременно используются оба информационных параметра –

амплитуда и фаза, то принцип и элемент сравнения сигналов называются амплитудно-фазными.

Аналоговое моделирование вычитания реализуется цепями постоянного тока и поэтому предполагает измерительное преобразование амплитуды, фазы и частоты переменного тока в соответственно изменяющийся постоянный ток (напряжение) [8].

Аналоговый элемент сравнения состоит из дифференциальной пассивной (два резистора R_1, R_2 на рис. 3.1.1, а) или активной (усилитель А, на рис. 3.1.1, б и в) цепи постоянного тока и измерительных преобразователей ИП1, ИП2 информационных параметров сравниваемых величин, например синусоидальных ЭДС E_1, E_2 , в пропорциональные напряжения U_1, U_2 постоянного тока. Пассивные непрерывные ЭС имеют непрерывную, а активные – непрерывную, так и релейную проходную характеристику.

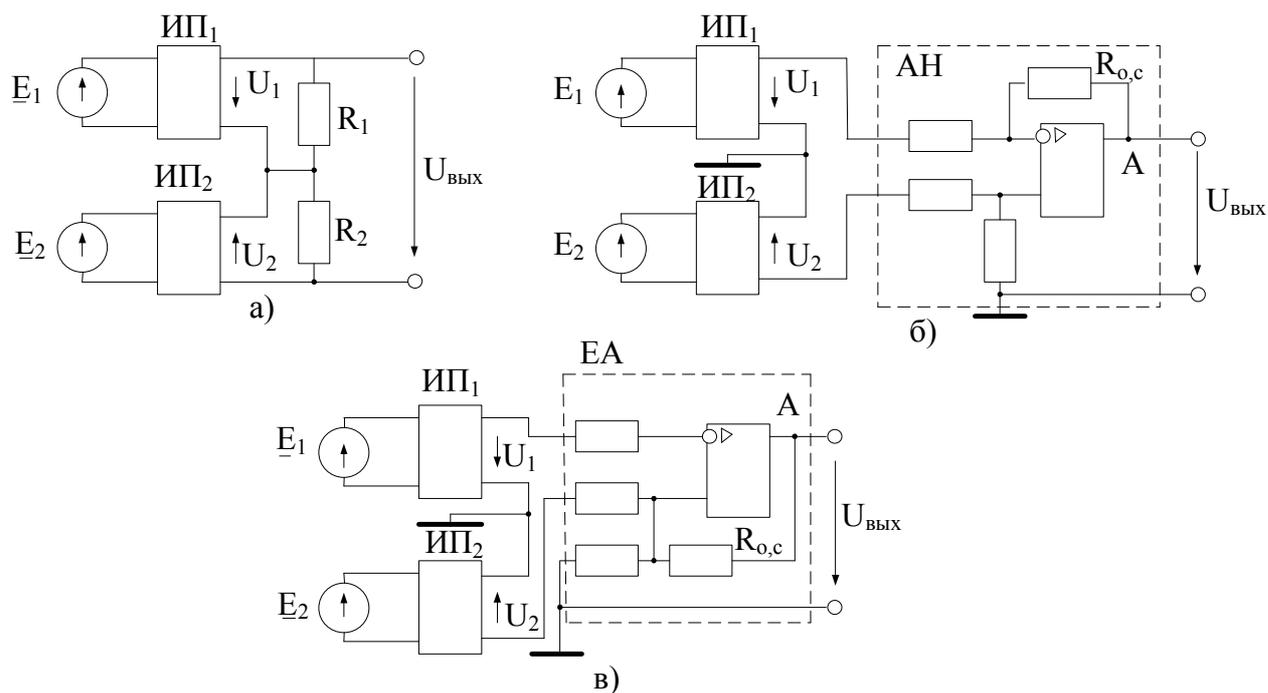


Рис. 3.1.1. Функциональные схемы элементов сравнения сигналов непрерывного (а, б) и релейного (в) действия

2. Характеристики элементов сравнения.

Функциональные характеристики.

Основными функциональными характеристиками ЭС непрерывного и дискретного действия являются проходная и характеристика действия

соответственно. Элементами сравнения свойственна специфичная – так называемая граничная характеристика.

Прходная характеристика графически изображает зависимость выходного информационного параметра от разности амплитуд, фаз или частот сравниваемых синусоидальных величин.

Граничная характеристика соответствует соотношениям сравниваемых величин, при которых выходной информационный параметр ЭС непрерывного действия равен нулю или формируется выходной сигнал ЭС дискретного действия равен нулю или формируется выходной сигнал ЭС дискретного действия с идеальной релейной характеристикой, проходящей через вертикальную ось указанных координат. Релейная реальная характеристика определяет *характеристику действия*.

Информационными характеристиками являются относительный уровень выходного сигнала ЭС непрерывного действия, погрешность характеристики действия, порог чувствительности и информационная способность ЭС дискретного действия [3].

Относительный уровень выходного сигнала, служит характеристикой ЭС амплитуд и фаз с выпрямительными ИП, генерирующими помехи в виде гармонических составляющих напряжения $u_{\text{вых}}$ на выходе. При этом для ЭС он оказывается значительно ниже относительного уровня выходного сигнала ИП. Например, при сравнении амплитуд синусоидальных величин, не совпадающих по фазе, постоянные составляющие U_{01} , U_{02} выпрямленных напряжений вычитаются арифметически, а гармонические составляющие - геометрически. Поэтому относительный уровень сигнала зависит от угла ψ сдвига фаз и оказывается крайне низким при угле $\psi = \pi/2$, при котором гармонические составляющие удвоенной круговой частоты $2\omega_{\Pi}$ находятся в противофазе и их амплитуды арифметически складываются.

Для четкого формирования дискретного выходного сигнала ЭС с релейной характеристикой относительный уровень разности сигналов *ИП1*,

ИП2 должен быть таким, чтобы наибольшее мгновенное значение переменной составляющей, в частности амплитуда гармонической составляющей удвоенной частоты, не превышала напряжения действия U_D компаратора, т.е. чтобы помеха $u_{II}(t)$ не выходила за пределы петли релейной характеристики. Такая помеха допустима, поскольку не вызывает неустойчивого действия (вибрации) компаратора: если компаратор действует под влиянием положительной амплитуды гармонической составляющей, то отрицательная амплитуда оказывается недостаточной для его отпускания [9].

Относительные погрешности характеристик действия ЭС амплитуд и фаз характеризует степень отличия характеристик действия от граничных и определяются напряжением U_D действия компаратора. Условие действия ЭС амплитуд ЭДС E_1, E_2 представляет собой соотношение:

$$k_{II}(E_{m1} - E_{m2})_D = U_D,$$

где k_{II} - коэффициент преобразования, равный:

$$k_{II} = (U_{01} - U_{02}) / (E_{m1} - E_{m2}).$$

Обозначая $E_{m1} = E_m$ и $(E_{m2} / E_{m1})_D = W_D$, вышеуказанное условие можно представить в виде:

$$k_{II} E_m (1 - W_D) = U_D,$$

или, поскольку $W_{sp} = 1$, — в виде:

$$k_{II} E_m (W_{sp} - W_D) = U_D.$$

Относительная погрешность характеристики действия:

$$\sigma W = (W_{sp} - W_D) / W_{sp} = 1 - W_D$$

Погрешность зависит от амплитуд сравниваемых величин:

$$\sigma W = U_D / k_{II} E_m.$$

При больших амплитудах погрешность σW мала и практически не проявляется. При относительно малых амплитудах погрешность σW быстро нарастает по мере их снижения (рис. 3.1.2, а) и характеристика действия заметно отличается от граничной.

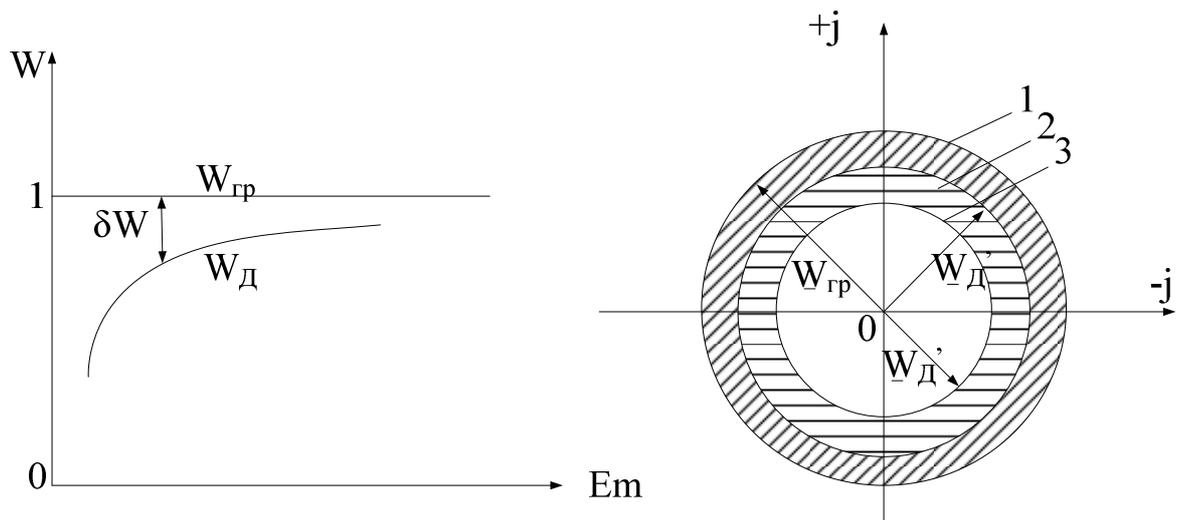


Рис. 3.1.2. Графики погрешностей (а) и характеристики действия (б) релейного элемента сравнения амплитуд

На рис. 3.1.2, б показаны граничная характеристика 1 ЭС амплитуд и характеристики действия 2 и 3 при E_m' и $E_m'' < E_m'$.

Условие действия ЭС по фазе ЭДС \underline{E}_1 и \underline{E}_2 с граничным углом $\psi_{зр} = \pm \pi/2$ и зависимостью $U_{0вых} = k_{\Pi} E_m \cos \psi$ — имеет вид:

$$k_{\Pi} (E_m \cos \psi)_{Д} = U_{Д} .$$

где E_m — меньшая амплитуда сравниваемых ЭДС, например $E_m = E_{m1}$. Наибольший возможный угол действия $\psi_{Д}$ зависит от наибольшего амплитудного значения, например $E_{m, \max} = E_{m1 \max}$.

$$\psi_{Д} = \arccos(U_{Д} / k_{\Pi} E_{m1 \max}) .$$

Относительная погрешность характеристики действия:

$$\sigma \psi = \frac{\psi_{зр} - \psi_{Д}}{\psi_{зр}} = 1 - \frac{2}{\pi} \arccos \frac{U_{Д}}{k_{\Pi} E_{m1 \max}} .$$

При снижении $E_{m1 \max}$ погрешность $\sigma \psi$ растет (рис. 3.1.3, а). На рис. 3.1.3, б показаны граничная характеристика 1 ЭС фаз и характеристики действия 2 и 3 при $E'_{m1 \max}$ и $E''_{m1 \max} > E'_{m1 \max}$. Характеристики действия определяются соотношением:

$$\underline{W}'_D = (\underline{E}_1 / \underline{E}_2)_D = \left[(\underline{E}_1 / \underline{E}_2) e^{j\psi} \right]_D,$$

и при $E_{m2} = \text{const}$ представляют собой отрезки $a'b'$, $a''b''$ прямой, параллельной граничной линии и проходящей через точку $W_{D \min}$ на вещественной оси ($\psi=0$):

$$W_{D \min} = \frac{E_{1 \min}}{E_2} = \frac{1}{k_{II}} \cdot \frac{U_{II}}{E_2}.$$

Напряжение U_D действия компаратора или шаг квантования информационного параметра определяют *порог чувствительности*, а рассмотренная зависимость погрешностей σW и $\sigma \psi$ от амплитуд сравниваемых величин означает соответствующее изменение информационной способности ЭС дискретного действия [7].

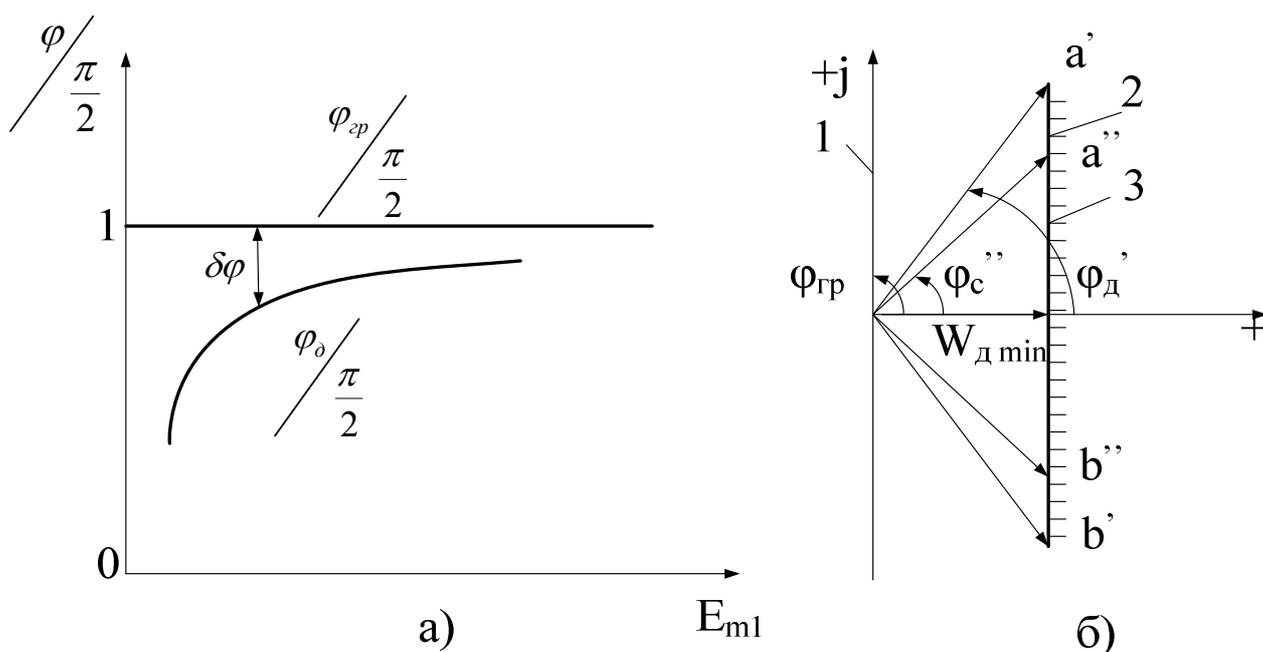


Рис. 3.1.3. Графики погрешностей (а) и характеристики действия (б) релейного элемента сравнения фаз

Напряжение U_D эквивалентно аддитивной погрешности $X_{\text{вых}0}$. *Порог чувствительности* ЭС амплитуд характеризуется наименьшей разностью амплитудных значений ЭДС $\Delta E_{\text{тпор}}$, при которой возможно действие компаратора.

При $\sigma W = 1 (W_D = 0)$:

$$\Delta E_{\text{пор}} = U_{D, \text{cp}} / k_{\Pi, \text{cp}}.$$

Вышеуказанным выражением определяется и порог чувствительности ЭС фаз как наименьшее амплитудное значение меньшей из сравниваемых по фазе ЭДС.

Информационная способность ЭС фаз определяется:

$$N_{\phi} = \frac{E_{\text{max}} - E_{\text{раб}}}{\Delta E_{\text{пор}}} = \frac{E_{\text{max}}}{\Delta E_{\text{пор}}} - \frac{1}{\cos \frac{\pi}{2} (1 - \sigma \psi_{\text{доп}})}$$

Информационная способность определяет количество информации $I = \log_2 N$, необходимой для ограничения относительной погрешности характеристики действия значением $\sigma W_{\text{доп}}$, или $\sigma \psi_{\text{доп}}$, т.е. определяет "цену" одной единицы (1 бит) количества информации на выходе ЭС дискретного действия при заданной его точности.

При одинаковом количестве информации ЭС фаз дискретного действия имеет меньшую относительную погрешность характеристики действия, чем ЭС амплитуд.

3. Пассивные элементы сравнения.

Аналоговые пассивные элементы сравнения являются элементами непрерывного действия. Они выполняются на диодных измерительных преобразователях сравниваемых величин, которые обычно формируются как источник синусоидальных величин ЭДС [1].

Элементы сравнения амплитуд E_{m1} , E_{m2} (рис. 3.1.4) состоит из двух выпрямителей VS1, VS2, резисторов R1, R2, образующих пассивную дифференциальную цепь, и сопротивлений Z1, Z2, включающих внутренние сопротивления источников сравниваемых ЭДС. В зависимости от соединения выпрямителей между собой производится вычитание постоянных составляющих U_{01} , U_{02} выпрямленных напряжений – включение с равновесием

напряжений (рис. 3.1.4, а) или I_{01} , I_{02} токов- включение с циркуляцией токов (рис. 3.1.4, б).

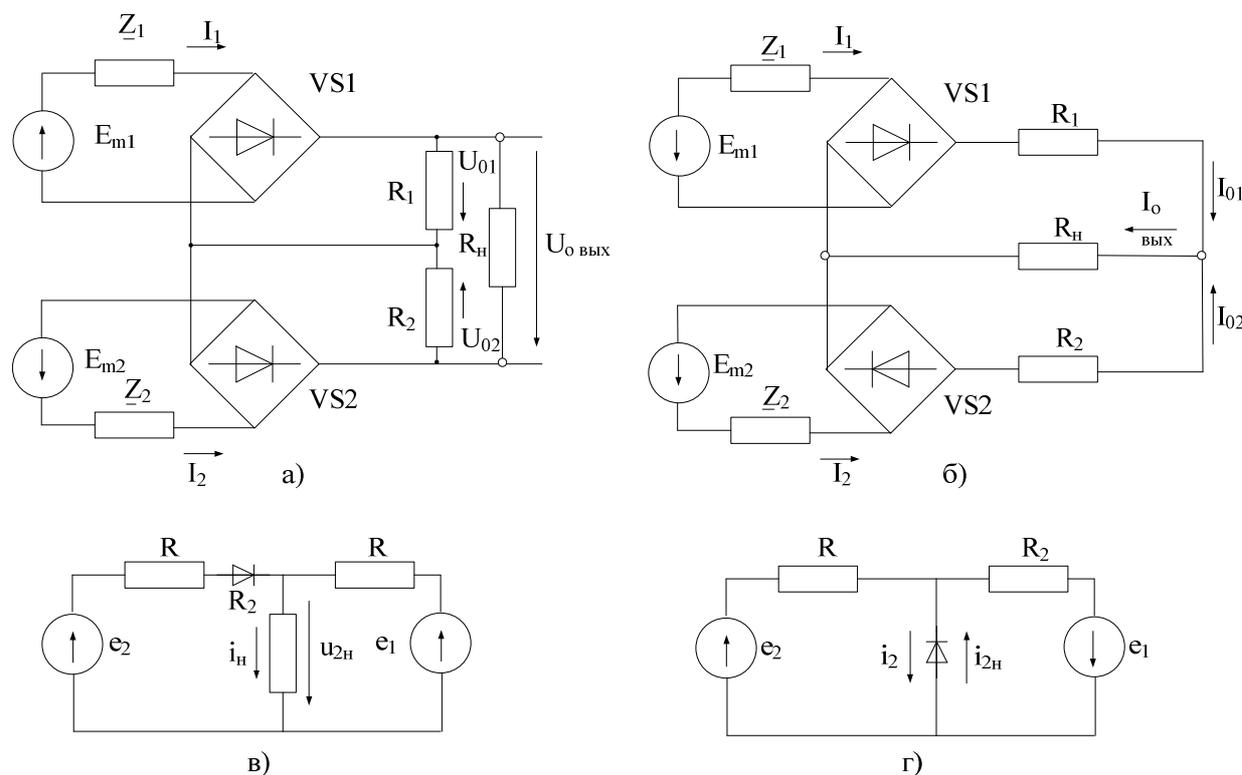


Рис. 3.1.4. Диодные элементы сравнения амплитуд (а, б) и схемы их замещения (в, г)

Элемент сравнения фаз принципиально состоит из двух управляемых выпрямителей. Диодным элементом сравнения фаз является классический *диодный кольцевой демодулятор* (фазовый дискриминатор). Он состоит из кольцевой схемы на диодах $VD1-VD4$ с резисторами $R1 - R4$ и трансформаторов и делителей сравниваемых ЭДС \underline{E}_1 , \underline{E}_2 на резисторах $R'_{д1} - R''_{д2}$ (рис. 3.1.5). Делители или трансформаторы являются по существу формирователями ЭДС \underline{E}_{1a} , \underline{E}_{2a} , сравниваемых по амплитуде, из ЭДС $\underline{E}_{1\phi}$, $\underline{E}_{2\phi}$, сравниваемых по фазе.

Кольцевая диодная схема выполняет функцию диодного элемента сравнения амплитуд сформированных ЭДС с включением с циркуляцией токов. Однако в силу специфичности ее выполнения и возможности представления действия кольцевого демодулятора как двух управляемых выпрямителей кольцевой диодный демодулятор считается элементом сравнения фаз [5].

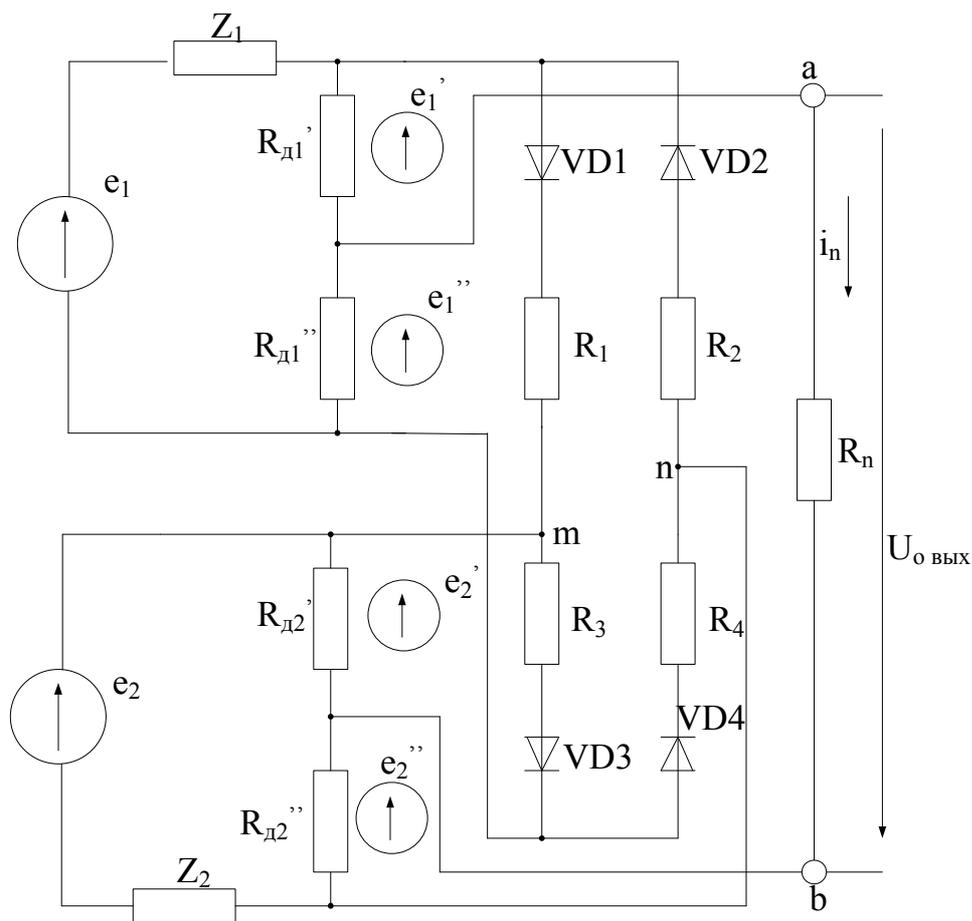


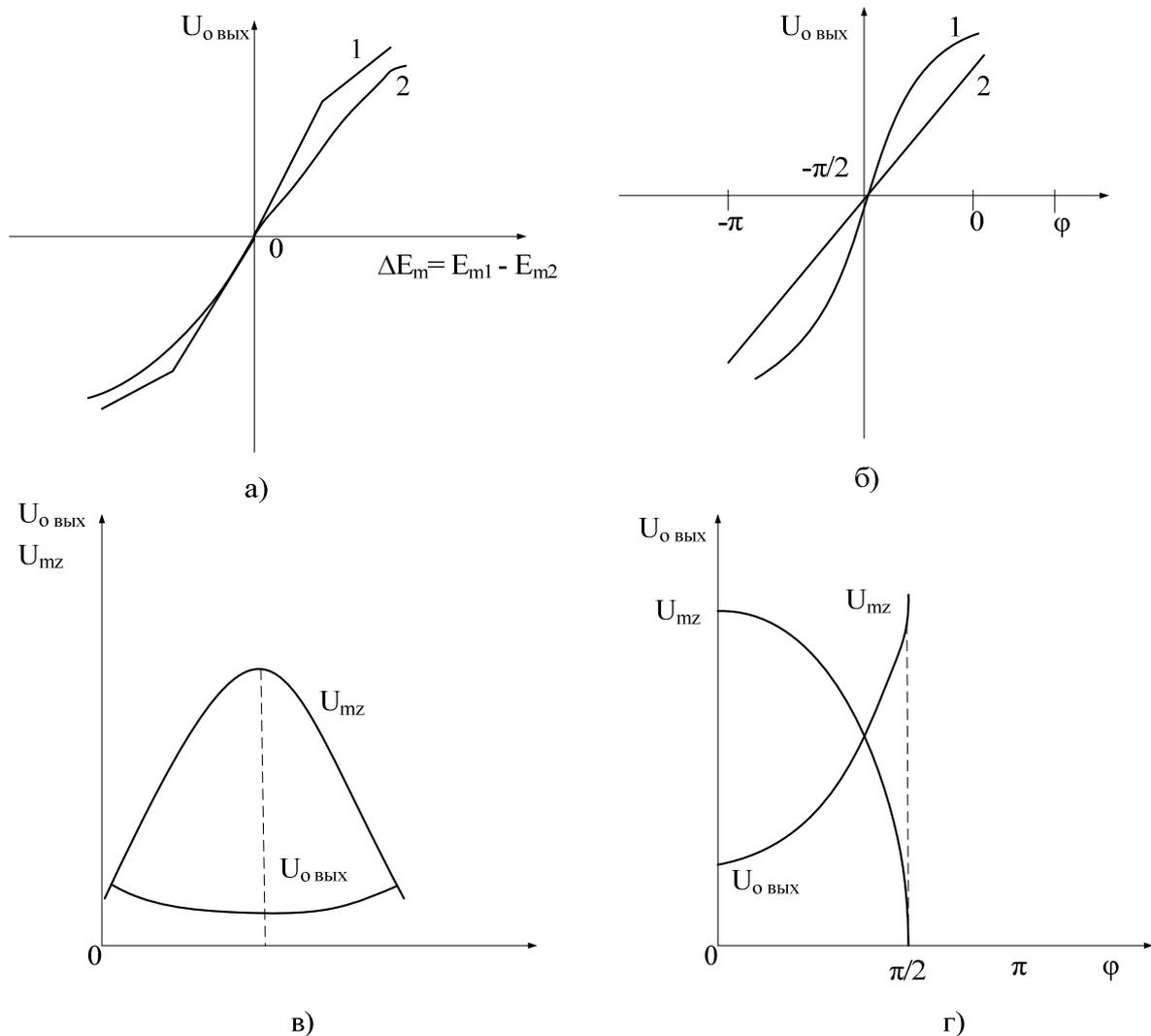
Рис. 3.1.5. Схема элемента сравнения фаз на основе кольцевого диодного демодулятора

Проходные характеристики пассивных диодных элементов сравнения приведены на рис. 3.1.6, а, б. Характеристики 1 и 2 на рис. 3.1.6, а соответствуют *сравнению амплитуд*, совпадающих по фазе и сдвинутых по фазе на угол $[\psi] = \pi/2$. Они отражают влияние на функционирование ЭС амплитуд неинформационного параметра, каким для него является угол сдвига фаз. Реальная проходная характеристика при $0 \leq [\psi] \leq \pi/2$ располагается в области, ограниченной графиками 1 и 2.

Две проходные характеристики 1 и 2 элемента сравнения фаз (рис. 3.1.6, б) отражают влияние функционирование ЭС фаз соотношения амплитуд ЭДС как неинформационного для него параметра.

Относительный уровень сигнала сильно зависит от угла сдвиг фаз между сравниваемыми синусоидальными величинами. Графики на рис. 3.1.6, в и г иллюстрируют соотношения между *входным сигналом* (напряжение $U_{o\text{вых}}$) и

основной внутренней помехой – амплитудой U_{m2} гармонической составляющей удвоенной промышленной частоты напряжения на выходе ЭС амплитуд и фаз.



с. 3.1.6. Проходные характеристики (а, б) и зависимости сигнала и помехи (в, г) на выходе элементов сравнения амплитуд (а, в) и фаз (б, г)

Амплитудно-фазные пассивные элементы сравнения получают на основе использования рассмотренной зависимости амплитуды гармонической составляющей удвоенной частоты напряжения на выходе диодного ЭС амплитуд от угла сдвига фаз.

4. Активные выпрямительные элементы сравнения сигналов.

Активные ЭС аналоговых сигналов функционируют в качестве элементов как непрерывного, так и дискретного действия. Они выполняются по указанным выше схемам (рис. 3.1.1, б и в): непрерывность действия обеспечивается активным вычитателем АН, а дискретность действия –

компораторам EA . Они различаются и по измерительным преобразователям $ИП1, ИП2$ сравниваемых величин.

Схемы активных ЭС амплитуд непрерывного и дискретного действия на выпрямителях ИП приведены на рис. 3.1.7 и 3.1.8. Ввиду возможности получения на активных выпрямителях $VS1, VS2$ постоянных составляющих различной полярности в схеме на рис. 3.1.7 вместо вычитателя $АН$ показан сумматор AW , совмещающий функцию фильтрации сигналов U_{01}, U_{02} ИП и выходного сигнала $U_{0\text{ВЫХ}}$ ЭС, он выполняется в виде сдвоенного ФНЧ второго порядка. В активном ЭС амплитуд выпрямители работают практически как идеальные, взаимное влияние между ними отсутствует. Поэтому проходная характеристика линейна и не зависит от угла ψ сдвига фаз.

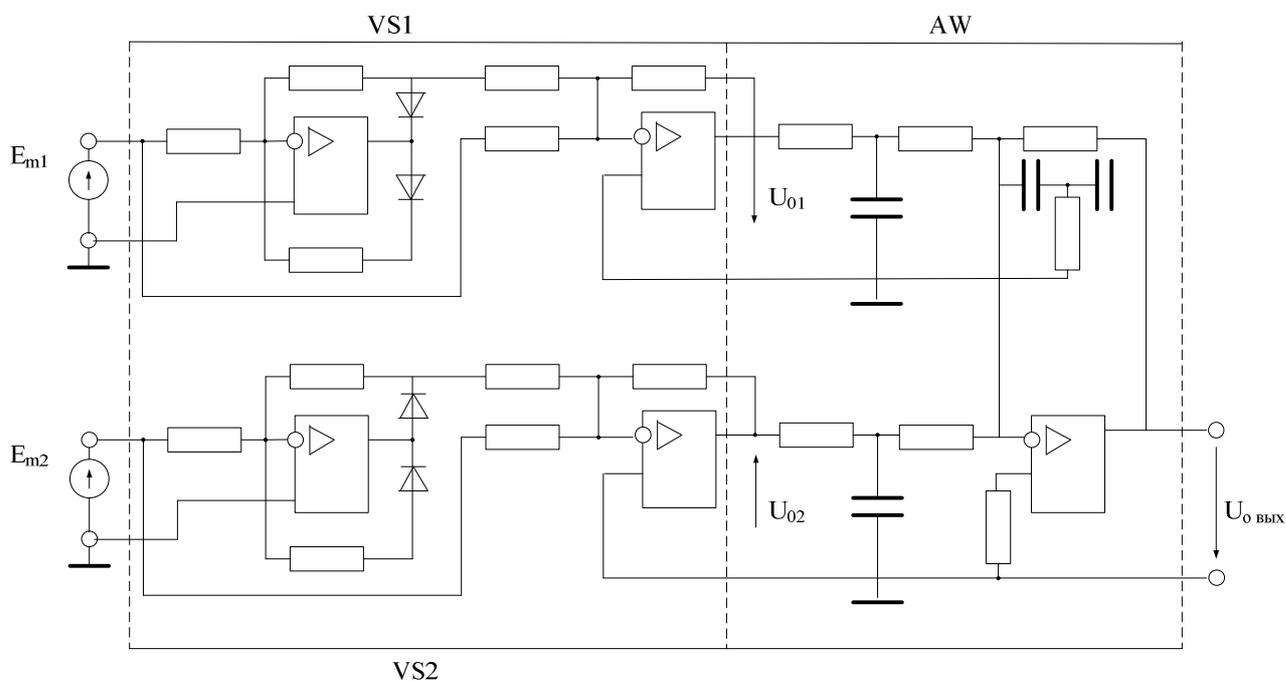


Рис. 3.1.7. Активный элемент сравнения амплитуд непрерывного действия

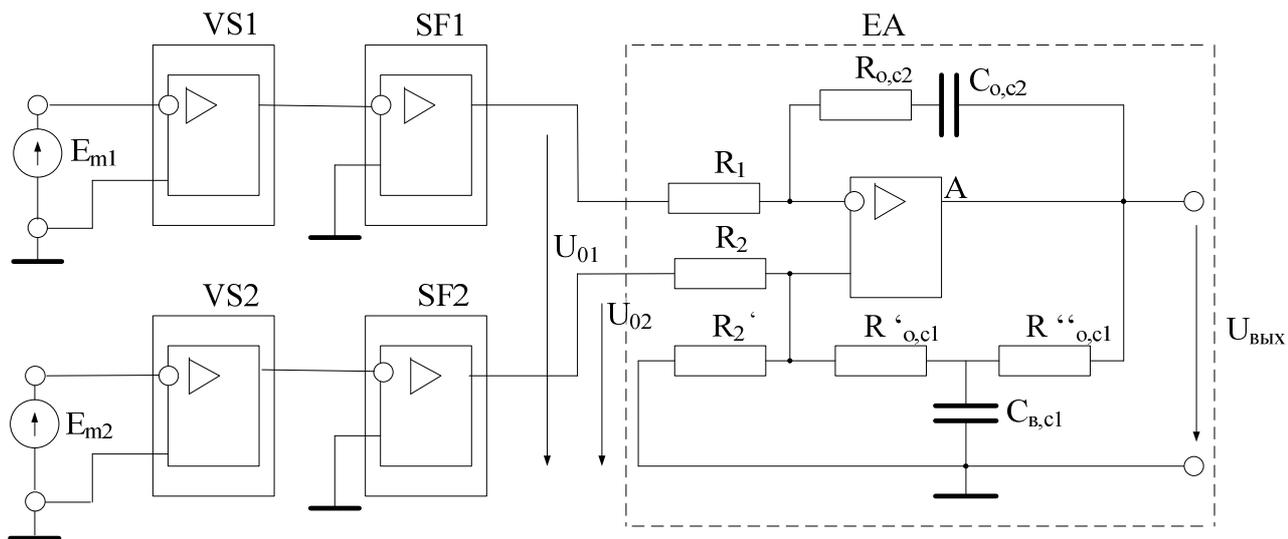


Рис. 3.1.8. Активный элемент сравнения амплитуд релейного действия

Схема активных ЭС фаз ЭДС e_1 , e_2 (рис. 3.1.9) непрерывного дискретного действия состоят из двух активных выпрямительных ИП фаз: вычитание постоянных составляющих напряжений на выходах обеспечивается дифференциальным Д-включателем ОУ А [5].

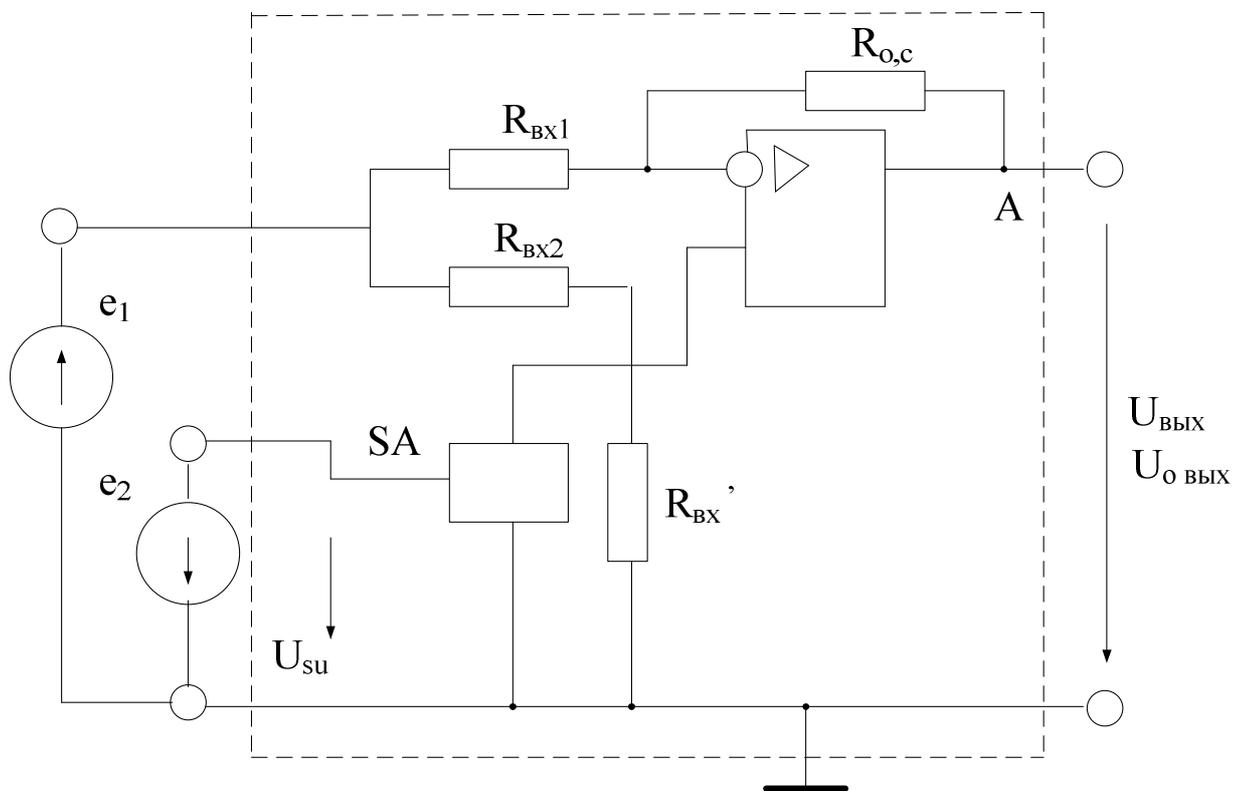


Рис. 3.1.9. Схема активного элемента сравнения фаз

5. Дискретные элементы сравнения фаз.

Дискретными называются ЭС, формирующие дискретные потенциальный и импульсный выходные сигналы на основе логических операций с дискретными потенциальными или импульсными сигналами. Соответственно различаются дискретные потенциальные и импульсные ЭС.

Дискретные потенциальные или импульсные сигналы, над которыми производятся логические операции, формируются из синусоидальных сравниваемых величин аналого-дискретными преобразователями. По логическому алгоритму дискретные ЭС фаз делятся на определяющие порядок следования дискретных входных сигналов – последовательные и ЭС, выходной сигнал которых определяется комбинацией входных сигналов, - комбинационные.

6. Цифровые элементы сравнения.

Цифровые ЭС функционируют на основе арифметического вычитания информационных параметров в число-импульсной или разрядно-цифровой форме. Элементы сравнения, которые не только выявляют, какой из сравниваемых параметров больше, но и определяют, насколько больше относятся к ЭС непрерывного действия. В ЭС дискретного действия достаточно лишь обнаружить сигнал, т.е. определить большее (или меньшее) значение параметра, поэтому они могут функционировать на основе логической операции неравнозначности двух чисел.

Элементы сравнения число-импульсных сигналов наиболее просто реализуются при сравнении параметра с заданным значением, например при сравнении амплитуды E_m синусоидальной ЭДС e , преобразованной в число-импульсный сигнал $u_{и.с.}$ в виде последовательности N импульсов с заданным значением $N_{зд}$. Для этого могут использоваться суммирующие счетчики $СТ$. Счетчик характеризуется определенной емкостью, равной наибольшему числу импульсов, которые могут быть им зафиксированы /9/.

Элементы сравнения сигналов в двоичном параллельном коде, фиксирующие большее (или меньшее) значение одного из них, могут

осуществляться на основе элементов неравнозначности двух двоичных чисел (сумматоров по модулю два цифровых ЭВМ). Сигнал 1 на выходе элемента неравнозначности имеет место только при неравенстве входных двоичных чисел и определяется остатком от деления их суммы на два.

Например. Схема на рис. 3.1.10 реализует алгоритмы сравнения одноразрядных двоичных чисел A и B . Неравенству чисел соответствуют значения $A=1, B=0 (A \neq B)$ или $A=0, B=1 (A \neq B)$. Определение большего числа сводится к логическим операциям $D = A\bar{B}$ или $E = \bar{A}B$ соответственно, а определение их равенства – к операции $C = A\bar{B} + \bar{A}B$.

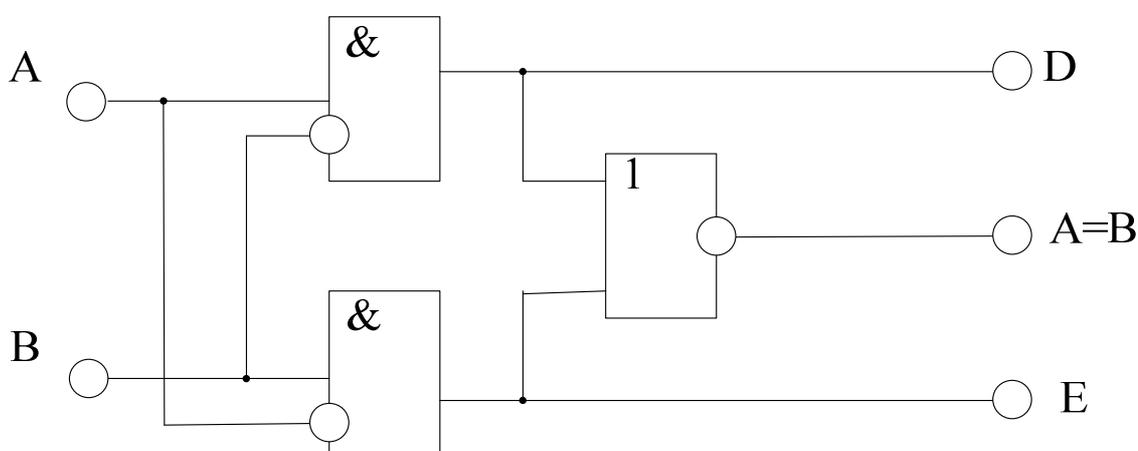


Рис. 3.1.10. Схема реализации алгоритма сравнения одноразрядных чисел

Вопросы для самопроверки по теме 3.1.1.

«Элементы сравнения сигналов»

1. Что представляет собой функциональная операция сравнения входных сигналов автоматических устройств?
2. Каковы виды элементов сравнения?
3. Как выполняется полупроводниковый пассивный элемент сравнения фаз?
4. Чем отличаются по выполнению элементы сравнения амплитуд непрерывного и релейного действия?

5. Что представляют собой граничные характеристики элементов сравнения амплитуд и фаз?

6. Какие различаются дискретные элементы сравнения фаз, функционирующие по логическим алгоритмам?

Варианты тестов по теме 3.1.1.

«Элементы сравнения сигналов»

1. Элементы сравнения сигналов – это ...
2. Какие параметры используются в качестве информационных параметров:
 - а) частота
 - б) фаза
 - в) амплитуда
3. Функциональные характеристики ЭС:
 - а) проходная
 - б) граничная
 - в) выходная
4. Пассивные элементы сравнения – это ...
5. Активные ЭС аналоговых сигналов функционируют в качестве элементов как, так и действия.
6. Цифровые ЭС функционируют на основе арифметического вычитания информационных параметров в или форме.

Тема 3.1.2. Измерительные органы автоматических устройств

План.

1. Назначение, виды и особенности измерительных органов.
2. Аналоговые измерительные органы с одной входной воздействующей величиной.
3. Измерительные органы с двумя входными воздействующими величинами.

4. Цифровые измерительные органы.

1. Назначение, виды и особенности измерительных органов.

Назначение измерительной части автоматических устройств – получение и обработка сигналов информации о состоянии управляемых электроэнергетических объектов и возмущающих на них воздействиях. Измерительная часть обычно содержит несколько измерительных органов, воспринимающих сигналы и обрабатывающие их по различным алгоритмам.

Напряжение u (выходная величина управляемого объекта ОУ) и ток i (возмущающее на него воздействие) первичных измерительных преобразователей называются входными воздействующими величинами. Принято различать измерительные органы с одной, двумя или более входными воздействующими величинами.

Входные величины измерительных органов автоматических устройств управляемых объектов переменного тока – дискретно-непрерывные, а объектов постоянного тока – непрерывные функции времени. Выходные сигналы измерительных органов могут иметь любую форму их представлений. При множестве (бесконечном или конечном счетном) возможных значений информационного параметра они объединяются обычно понятием непрерывных выходных измерительных органов, и только при двух возможных значениях информационного параметра – понятием дискретных потенциальных органов. Соответствующие измерительные органы имеют непрерывную или релейную проходную характеристику. Поэтому различаются измерительные органы непрерывного и релейного действия. К измерительным органам релейного действия на практике обычно относятся и имеющие непрерывную проходную характеристику, но работающие и в режиме переключения.

Измерительные органы релейного действия независимо от вида проходной характеристики по аналогии с электромеханическими устройствами могут также называться электрическими измерительными реле в отличие от измерительных органов непрерывного действия. Под электрическим реле

понимается устройство, предназначенное производить скачкообразные изменения в управляемых цепях при заданных значениях электрических воздействующих величин. Под воздействием входных величин происходит возбуждение реле и переход из начального положения в конечное, т.е. имеет место действие реле. Переход из конечного состояния в начальное или отпускание реле имеет место при снижении или снятии возбуждения.

К измерительным электрическим органам релейного действия относятся только те, которые предназначены срабатывать с определенной точностью при заданных значениях: характеристикой величины. При срабатывании при этом понимается выполнение измерительным органом релейного действия предназначенной функции в процессе изменения своего состояния – действия или отпускания, а заданное значение характеристической величины называется уставкой реле [1].

Несмотря на множество различных измерительных органов как с одной, так и несколькими входными воздействующими величинами в общем случае они реализуют алгоритм, который заключается в сопоставлении значений величин, характеризующий текущий режим электроэнергетического управляемого объекта, с заданными значениями тех же величин, моделируемыми обычно в запоминающих элементах измерительного органа. По результатам сопоставления принимается заключение о состоянии объекта или его режиме и формируются необходимые воздействия на исполнительные непрерывного или релейного действия элементы автоматических устройств.

Основными алгоритмами являются восприятие контролируемых или воздействующих величин, преобразование в форму, удобную для обработки, формирование характеристической величины и сравнение ее опытным путем с заданными параметрами однородной величины, хранящейся в запоминающемся элементе. Заключительной операцией алгоритма измерительного органа в отличие от процесса измерения должно быть формирование выходного сигнала, определяющего воздействия на управляемый объект.

В алгоритмах измерительных органов автоматических устройств независимо от функционального назначения и элементной базы используются следующие способы измерений – непосредственное сравнение с эталонной величиной и компенсационный метод. Если принятый алгоритм измерительного органа основан на использовании операций только с синусоидальными величинами промышленной частоты, то все составляющие воздействующих величин других часто являются помехами, для устранения которых предусматриваются частотные фильтры.

Обобщенный алгоритм измерительного органа релейного действия с указанием основных преобразований и операций в виде структурной схемы приведен на рис. 3.1.11.

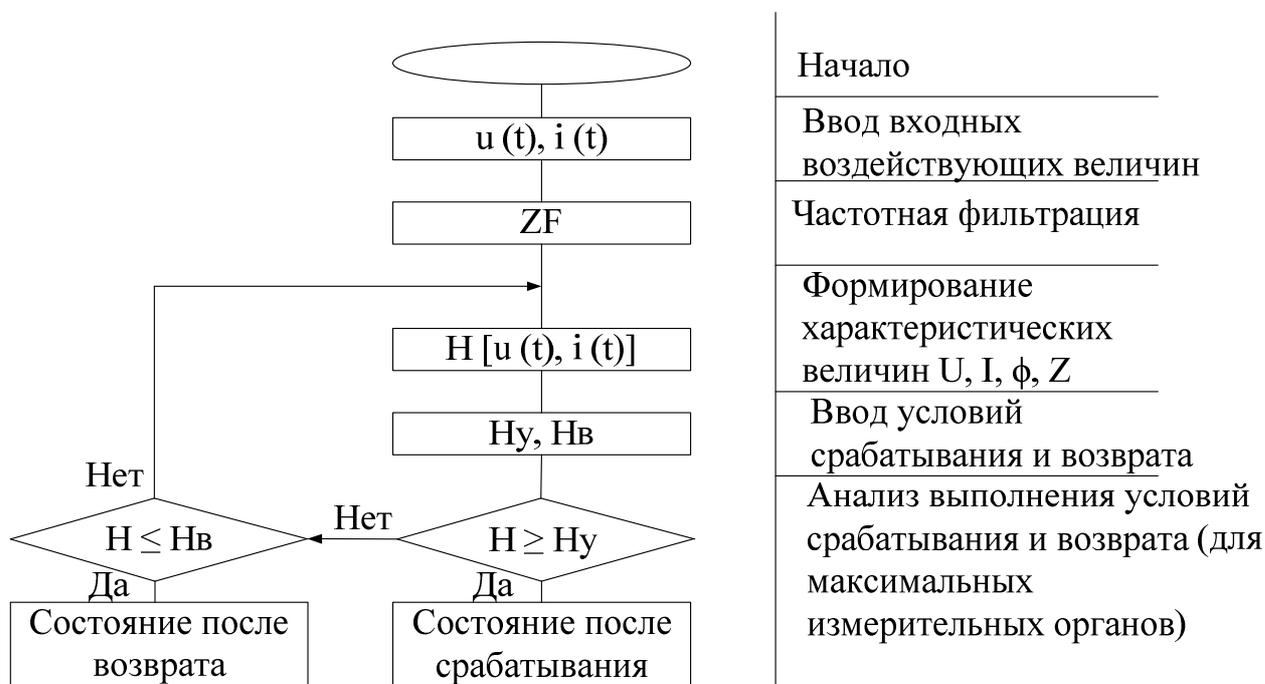


Рис. 3.1.11. Общий алгоритм функционирования измерительного органа релейного действия

Алгоритм измерительного органа непрерывного действия отличается лишь отсутствием условных переходов, определяющих срабатывание и возврат, т.е. формирует непрерывный выходной сигнал [2].

Выполнение алгоритма начинается операцией ввода входных воздействующих величин, поступающих от первичных измерительных трансформаторов тока и напряжения в виде непрерывных функций времени $u(t)$

и $i(t)$. В схеме предусмотрена частотная фильтрация (фильтр ZF) в предположении, что последующие операции алгоритма основаны на преобразованиях электрических величин промышленной частоты.

В соответствии с функциональными назначениями измерительного органа по значениям входных воздействующих величин формируются текущие значения характеристических величин H : ток или напряжение, угол сдвига фаз φ , сопротивление $Z = U / I$.

В зависимости от принципа действия измерительного органа и способа его технической реализации для формирования характеристических величин могут использоваться амплитудные, действующие, значения и фазы или ортогональные составляющие, а также мгновенные значения $u(t)$, $i(t)$ входных воздействующих величин.

Вводятся или формируются условия срабатывания и возврата в виде значений уставок характеристической величины H_y , например тока I_y , или параметры характеристик срабатывания, в частности в плоскости комплексного переменного Z .

Проверяется выполнение условий срабатывания и возврата, например $H \geq H_y$ и $H \geq H_B$; при выполнении одного из них измерительный орган переходит в состояние после срабатывания или после возврата. При невыполнении ни одного из условий продолжается выполнение операций алгоритма до указанных условных переходов [8].

2. Аналоговые измерительные органы с одной входной воздействующей величиной.

К аналоговым, условно отнесены все измерительные органы на полупроводниковой и интегральной электронной элементной базе, в схемах которых отсутствуют АЦП и не используются операции с цифровыми кодами электрических величин. Поскольку для операции сравнения необходимы не менее двух напряжений или токов (электрических величин), в измерительных органах с одной входной воздействующей величиной производится или сопоставление информационного параметра с его заданным (эталонным)

значением, или сравнение амплитуд или фаз двух электрических величин, являющихся разными функциями одного и того же информационного параметра входной воздействующей величины.

Измерительные органы непрерывного действия.

Измерительные органы непрерывного действия определяют не только какой из двух сравниваемых однородных информационных параметров больше (или меньше), но и в какой степени превышает значение одного информационного параметра значение другого (насколько он больше или меньше). Измерительные органы выполняются на основе элементов сравнения непрерывного действия [2].

Измерительные органы напряжения или тока. Формирование двух указанных сравниваемых электрических величин в измерительных органах производится двумя измерительными преобразователями с разными проходными характеристиками или стабилитронами, устанавливающими эталонное значение информационного параметра. В измерительных органах напряжения переменного тока обычно используются линейный и нелинейный выпрямительные измерительные преобразователи амплитуды элемента сравнения амплитуд. При этом применяются насыщающиеся реакторы или трансформаторы.

Измерительные органы частоты. В быстродействующем измерительном органе частоты используется интегрирующий измерительный преобразователь с аналоговой памятью - запоминающим конденсатором /9/.

Измерительные органы релейного действия.

Измерительные органы релейного действия определяют, какой из сравниваемых однородных информационных параметров больше или меньше, и в зависимости от результата сравнения происходит их срабатывание или возврат. Они выполняются на основе элементов сравнения релейного и дискретного действия.

Измерительные органы напряжения или тока. Выполнение условий срабатывания и возврата в измерительных органах напряжения или тока, как

правило, оценивается сравнением информационного параметра входной воздействующей величины с заданными (эталонными) значениями. Информационным параметром в измерительных органах переменных напряжения и тока является их амплитуда, преобразуемая выпрямительными или времяимпульсными измерительными преобразователями в непрерывный (среднее выпрямленное значение) и времяимпульсный сигналы соответственно. Возможно и квадратичное измерительное преобразование амплитуды в непрерывный сигнал. Такое преобразование производится в электромагнитных измерительных реле тока и напряжения.

3. Измерительные органы с двумя входными воздействующими величинами.

В автоматических устройствах электроэнергетических систем преимущественно применяются измерительные органы с двумя входными воздействующими величинами - синусоидальными напряжением U_p и током I_p релейного действия. К ним относятся, главным образом измерительные органы сопротивления $Z_p = U_p / I_p$ и различного типа измерительные органы угла сдвига фаз γ между двумя вводными воздействующими величинами, особенно так называемые измерительные органы направления мощности. Измерительные органы активной и реактивной мощностей выполняются как релейного, так и непрерывного действия. К измерительным органам с двумя входными величинами относятся и дифференциальные измерительные органы тока релейного действия с так называемыми тормозными характеристиками срабатывания с двумя входными токами.

Все измерительные органы с двумя входными воздействующими величинами могут выполняться на основе элементов сравнения амплитуд, фаз или на основе амплитудно-фазных элементов сравнения релейного или дискретного действия. Характеристики срабатывания измерительных органов с двумя входными величинами получают отображением (на основе дробно-линейного преобразования) граничной характеристики элемента сравнения из плоскости W в плоскость характеристической величины H измерительного

органа с изменением, если необходимо, формы и расположения характеристики.

Характеристики срабатывания: - в данном случае функции двух вещественных или одного комплексного переменного и могут адекватно изображаться в плоскости комплексного сопротивления Z или мощности S , а также в полярных или прямоугольных координатах вещественных переменных.

Измерительные органы сопротивления.

Измерительные органы сопротивления релейного действия входят в измерительную часть *ИЧ* автоматических устройств релейной защиты электроэнергетических объектов от разрушительных воздействий токов коротких замыканий. Характеристической величиной измерительного органа (ИО) сопротивления является заданная функция выраженных в комплексной форме отношений входных воздействующих напряжений к входным воздействующим токам (комплексных сопротивлений). К измерительному органу сопротивления KZ (рис. 3.1.12, а) подводятся синусоидальные напряжение U_p и ток I_p , и в общем случае определяется отношение $Z_p = U_p / I_p = Z_p \Psi^{j\gamma_p}$, которое называется сопротивлением на входе, отображающим сопротивление, например, Z линии электропередачи AB (рис. 3.1.12,б).

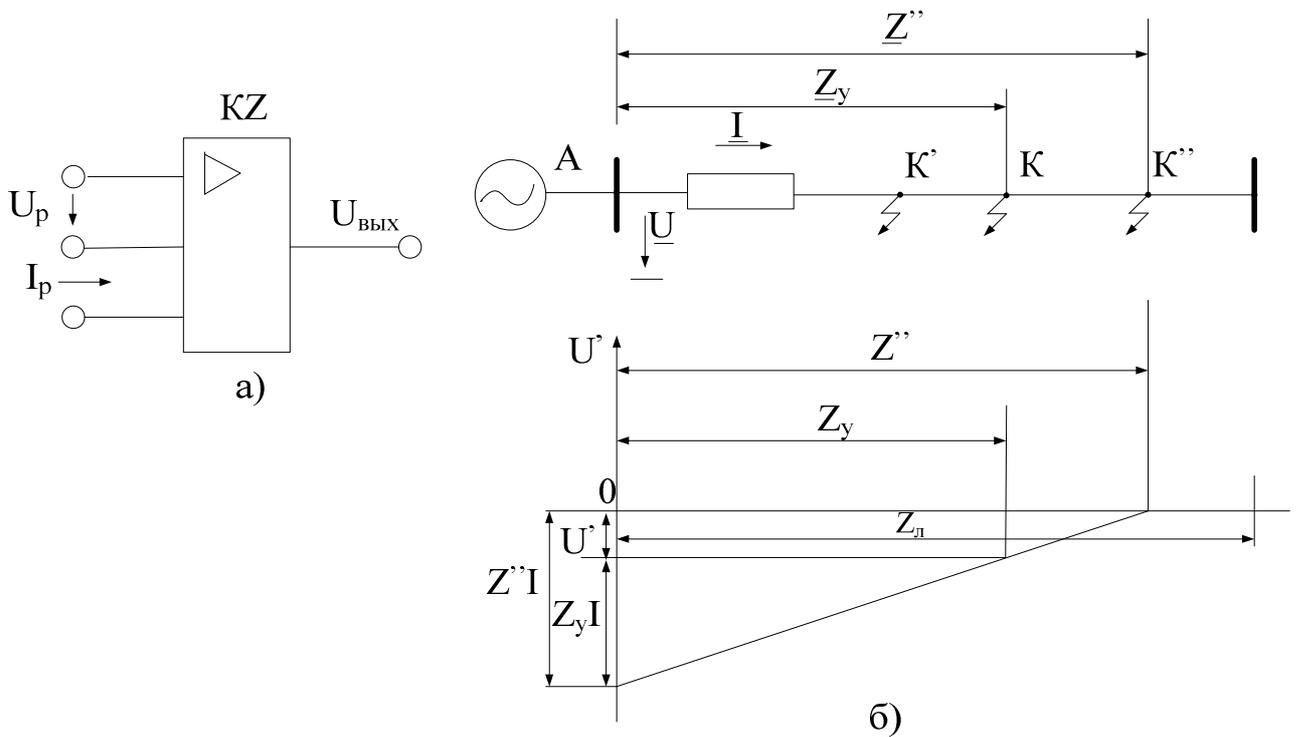


Рис. 3.1.12. Алгоритм (а), функциональная схема (б) измерительного органа полного сопротивления.

Из определения функции и характеристик ИО сопротивления очевидна возможность их осуществления как путем непосредственного вычисления составляющих R и jX отношения $Z_p = U_p / I_p$ и последующего определения их расположения относительно заданной характеристики срабатывания, так и с использованием компенсационного метода [2].

Измерительные органы сдвига фаз.

Для ИО сдвига фаз релейного действия характеристической величиной является угол сдвига фаз между электрическими величинами переменного тока (комплексными величинами). Входными воздействующими величинами могут быть как токи, так и напряжения. В случае, когда сдвиг фаз определяется между током I_p и напряжением U_p , получается ИО направления мощности. По изменению угла сдвига фаз между подводимыми током и напряжением он достоверно фиксирует изменение направления тока в месте его включения, а именно фиксирует направления тока I_p к месту КЗ. Поскольку ИО направления не предназначен измерять реальную электрическую мощность, входные токи и напряжения могут выбираться

произвольно из трехфазных систем для лучшего выполнения указанной функции. В соответствии с функциональным назначением ИО направления мощности осуществляется на основе сравнения фаз тока I_P и напряжения U_P .

Измерительные органы мощности.

В отличие от ИО направления мощности в ИО мощности производятся измерительные преобразования и сравнение с заданным значением реальной активной или реактивной мощности электроэнергетического объекта. Применяются ИО мощности как релейного, так и непрерывного действия. Основным элементом ИО мощности является измерительный преобразователь активной (ИПАМ) или реактивной (ИПРМ) мощности переменного тока в пропорциональные постоянные напряжение или ток $U_{0ВЫХ}(I_{0ВЫХ})$, которые сравниваются с эталонными значениями $E_{ЭТ}(I_{ЭТ})$ элементом сравнения непрерывного или релейного действия соответственно [1].

Обычно используются ИО активной мощности трехфазной симметричной системы напряжений и токов с тремя ИПАМ $UW1-UW3$ (рис. 3.1.13), сумма выходных напряжений которых на выходе сумматора AW не содержит гармонической составляющей удвоенной частоты. Поэтому частотный фильтр между сумматором и компаратором EA не предусматривается. Выходным дискретным потенциальным сигналом ИО обычно является положительное напряжение $U_{ВЫХ}$ на выходе компаратора. Поэтому в связи с инвертированием выходного напряжения ИПАМ сумматором AW в качестве сигнала в максимальном ИО используются положительные выходные напряжения ИПАМ и $E_{ЭТ}$, а в минимальном - отрицательные. Мощность срабатывания реле устанавливается задающим элементом в виде, например, источника эталонной ЭДС $E_{ЭТ}$, устанавливаемой резистором R_y как часть напряжения $U_{СТ}$ на стабилитроне VD .

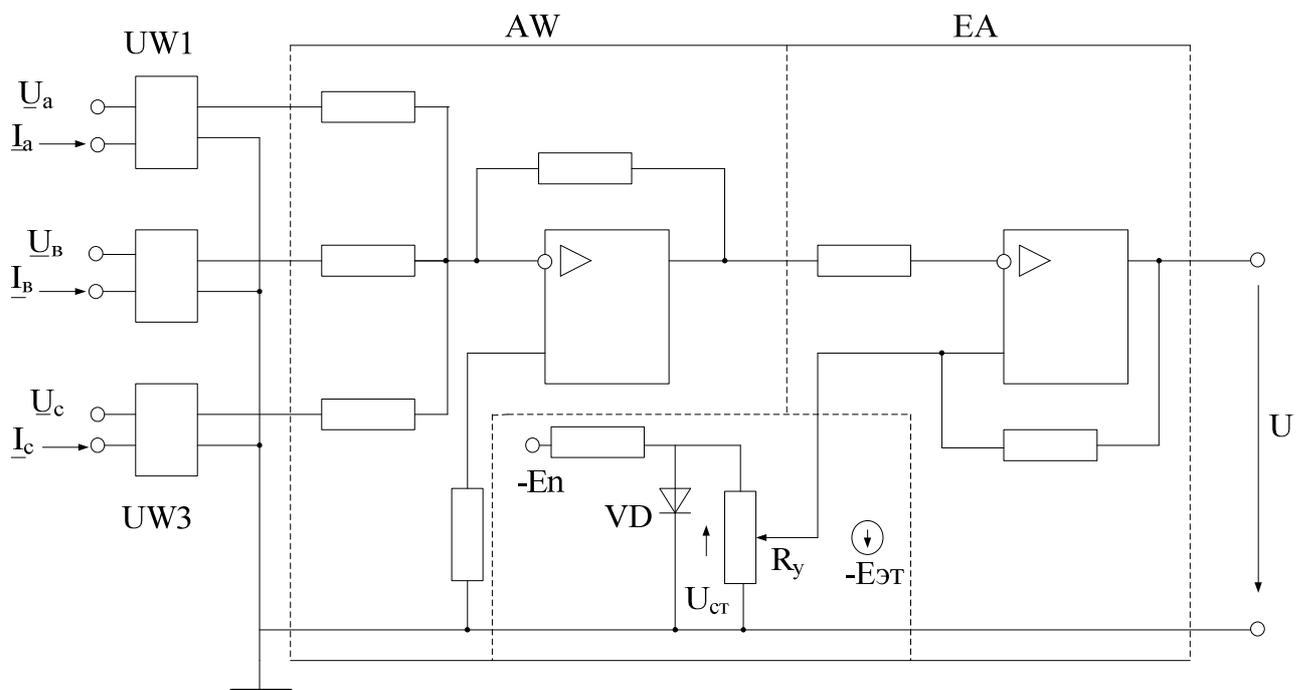


Рис. 3.1.13. Функциональная схема измерительного органа релейного действия активной мощности

4. Цифровые измерительные органы.

Достоинства цифровых методов и средств обработки информации позволяют не только реализовать программно на микропроцессорах и микроЭВМ известные способы осуществления аналоговых измерительных органов, но и выполнить новые алгоритмы их осуществления, в частности решая в реальном времени дифференциальные уравнения состояний электроэнергетических управляемых объектов. При этом отпадает необходимость фильтрации входных воздействующих величин, поскольку используются и свободные их составляющие. Однако при достигнутой в настоящее время производительности микропроцессоров такой алгоритм еще не обеспечивает необходимого быстродействия измерительных органов. Поэтому быстродействующие цифровые измерительные органы, как и аналоговые, осуществляются на основе использования принужденных составляющих напряжения и тока с учетом специфики и возможностей цифровой вычислительной техники.

При этом возникают задачи выделения принужденных составляющих цифровыми фильтрами и определения информационных параметров синусоидальных величин, решения которых связаны прежде всего с обеспечением быстродействия измерительных органов и эффективным использованием вычислительных средств. Если, например, амплитуда непосредственно отслеживается как наибольшее значение последовательности дискретных мгновенных значений (выборок), то для этого необходимы время, достигающее длительности половины периода промышленной частоты, и постоянная занятость процессора. Поэтому целесообразны прерывания выполнения операции по определению амплитуды и подключение процессора в моменты времени появления наибольших дискретных мгновенных значений.

Амплитуда и фаза, могут определяться по двум средним дискретным мгновенным значениям, позволяющим вычислить производную по двум выборкам (отсчетам), сдвинутым во времени на четверть периода промышленной частоты и равным дискретным мгновенным значениям ортогональных (синусной и косинусной) составляющих, или двум отсчетам, отображающим неортогональные, сдвинутые на угол, меньший $\pi/2$, составляющие. При этом в общем случае необходимо формирование из входных воздействующих величин сигналов управления мультиплексором МПЛ, АЦП и микропроцессорным комплектом больших интегральных схем (БИС) МПК [6].

Программные измерительные органы непрерывного действия.

Характерным примером технической реализации на микропроцессорном комплекте БИС являются *программные измерительные органы непрерывного действия амплитуды, частоты и фазы* (относительно напряжения на шинах электростанции) *напряжения и реактивной и активной составляющих тока синхронного генератора.*

Измерительный орган амплитуды фиксирует положительные амплитудные мгновенные значения напряжений трех фаз, суммирует их и определяет среднее значение амплитуды, сравнивает амплитуду с заданным

(предписанным) значением — вычисляет ее отклонение и определяет на основе численного дифференцирования, производную амплитуды за время, не превышающее одной третьей части длительности периода промышленной частоты. Амплитуда фиксируется путем управления соответствующим каналом мультиплексора *МПЛ* и *АЦП*. Структурная схема алгоритма вычисления среднего значения амплитуды приведена на рис. 3.1.14, а.

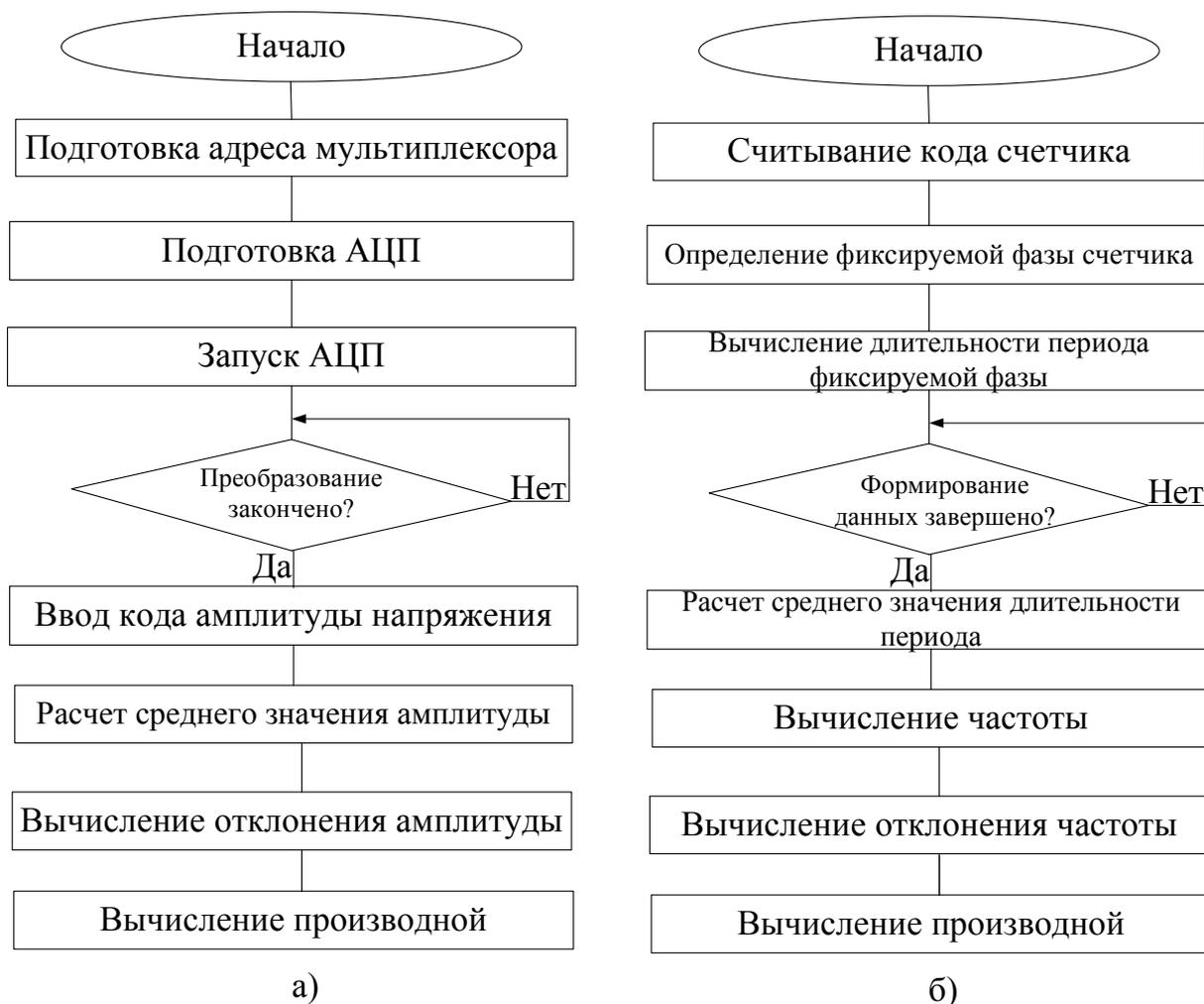


Рис. 3.1.14. Структурные схемы программ цифровых измерительных органов амплитуды (а) и частоты (б) напряжения

Измерительный орган частоты также содержит вычитающий счетчик тактовых импульсов, в который периодически после каждого считывания до нуля вновь записывается число импульсов. Поэтому за время, равное длительности периода промышленной частоты, число импульсов в счетчике

уменьшается на небольшую часть. Структурная схема алгоритма вычисления среднего значения частоты приведена на рис. 3.1.14, б [8].

Вопросы для самопроверки по теме 3.1.2.

«Измерительные органы автоматических устройств»

1. Каково назначение измерительной части автоматических управляющих устройств электроэнергетических систем?
2. Что представляют собой входные воздействующие и характеристическая величины измерительного органа?
3. На каких элементах сравнения выполняются измерительные органы напряжения и тока?
4. Как функционирует времяимпульсное измерительное максимальное реле тока?
5. Что такое компенсационный способ определения сопротивления на зажимах измерительного реле?
6. На каких элементах сравнения могут выполняться измерительные органы сопротивления?

Варианты тестов по теме 3.1.2.

«Измерительные органы автоматических устройств»

1. Входными воздействующими величинами ИО АУ являются:
 - а) напряжение
 - б) ток
 - в) сопротивление
2. Измерительные органы релейного действия – это ...
3. Измерительные органы непрерывного действия имеют проходную характеристику.
4. К аналоговым ИО, относятся все измерительные органы на и электронной элементной базе.
5. Цифровые измерительные органы – это ...

Тема 3.2. Элементы логической части и обработки цифровых сигналов. Исполнительные элементы автоматических устройств.

Тема 3.2.1. Элементы логической части и обработки цифровых сигналов

План.

1. Назначение логической части автоматических устройств.
2. Комбинационные логические элементы.
3. Запоминающие элементы.
4. Сумматоры двоичных чисел.

1. Назначение логической части автоматических устройств.

В результате переработки информации о состоянии управляемого объекта и о действующих на него возмущениях и выдачи соответствующих дискретных, в том числе цифровых, сигналов измерительной частью должны быть сформированы сигналы, определяющие дискретные управляющие воздействия на объект или на элементы отображения информации. Формирование указанных сигналов производится логической частью автоматических устройств. Дискретные сигналы логической части, воздействующие на исполнительные элементы автоматических устройств, вырабатываются на основе логических алгоритмов. По логическим алгоритмам производится и обработка цифровых сигналов, как в логической, так и в других функциональных частях автоматических устройств. Поэтому функциональные элементы обработки цифровых сигналов и рассматриваются совместно с собственно логическими элементами.

К собственно логическим элементам относятся интегральные микросхемы (ИС) дискретного действия (далее дискретные ИС), выполняющие элементарные логические операции с дискретными сигналами. Основными из них являются операции *логического сложения (дизъюнкции) ИЛИ*, *логического умножения (конъюнкции) И*, *логического отрицания (инверсии) НЕ*. Результат

их выполнения (выходной сигнал) определяется функцией комбинации обрабатываемых (входных) дискретных сигналов. На их основе по соотношениям алгебры логики выполняются более сложные комбинационные операции, широко используемые в цифровой вычислительной технике [1].

Соответствующие логические элементы называются комбинационными. При этом оказывается возможной реализация всех известных комбинационных операций логическими ИС, выполняющими две элементарные операции: ИЛИ - НЕ или И - НЕ. К собственно логическим относятся и последовательностные элементы запоминания дискретных сигналов (операция ПАМЯТЬ) и задержки их прохождения (операция ВРЕМЯ). Логическая часть современных автоматических устройств часто достаточно сложна, и для ее синтеза используется как алгебра логики, так и теория конечных автоматов.

Из элементов обработки цифровых сигналов, свойственных цифровой вычислительной технике, некоторые имеют и самостоятельное значение для аппаратных автоматических устройств электроэнергетических систем.

Разработка программных автоматических устройств на основе универсальных и специализированных микроЭВМ обуславливает целесообразность рассмотрения их основных микроэлектронных элементов как микроэлектронной базы программных функциональных элементов автоматических устройств.

2. Комбинационные логические элементы.

Обработка дискретных сигналов по логическим алгоритмам обеспечивается интегральными микросхемами, выполняющими логические операции ИЛИ-НЕ или И-НЕ. Они, как указывалось, позволяют реализовать любую логическую функцию, т.е. образуют функционально полный набор логических микросхем. Указанные микроэлектронные логические элементы DWU (ИЛИ-НЕ) и DXU (И-НЕ) входят во многие серии дискретных интегральных схем.

В современных и разрабатываемых автоматических устройствах электроэнергетических систем применяются в основном наиболее распространенная серия микросхем типа К155 и аналогичная типа К555 и так называемая высокопороговая серия микросхем типа К511. Микросхемы К155 и К555 относятся к транзисторно-транзисторной логике (ТТЛ), а микросхема К511 - к диодно-транзисторной (ДТЛ). В последних разработках используются и микросхемы типа К561, выполняемые на основе полевых МДП (МОП) транзисторов. Основной их особенностью является малая потребляемая мощность от источника питания. Они состоят из наборов логических микроэлементов DXU (И-НЕ) с разным количеством входов.

В связи с различными напряжениями источников питания и различными напряжениями, соответствующими единичному логическому сигналу, в состав серии К511 входят согласующие микроэлементы, обеспечивающие совместное функционирование микросхем указанных серий.

На рис. 3.2.1, *а-в* в качестве примеров показаны логические элементы DU , DX , DW , выполненные на микросхемах DXU рассмотренной серии и реализующие элементарные логические операции НЕ, И, ИЛИ соответственно. Выполнение инверсия НЕ одним элементом DXU И-НЕ очевидно ($Y = \bar{X}$) (рис. 3.2.1, а). Логическое перемножение И (рис. 3.2.1, б) выполняется на основе простого соотношения - двойной инверсии логического произведения: $\bar{X}_1\bar{X}_2 \text{ @ } X_1X_2 = Y$. Логическая сумма ИЛИ (рис. 3.2.1, в) получается на основе закона инверсии: произведение инверсий, равно инверсии суммы: $\bar{X}_1\bar{X}_2 \text{ @ } X_1 + X_2 = Y$. Схема на рис. 3.2.1, в иллюстрирует регистрацию логической операции ЗАПРЕТ, часто встречающейся в автоматических устройствах (блокировании), $Y = X_1\bar{X}_2$.

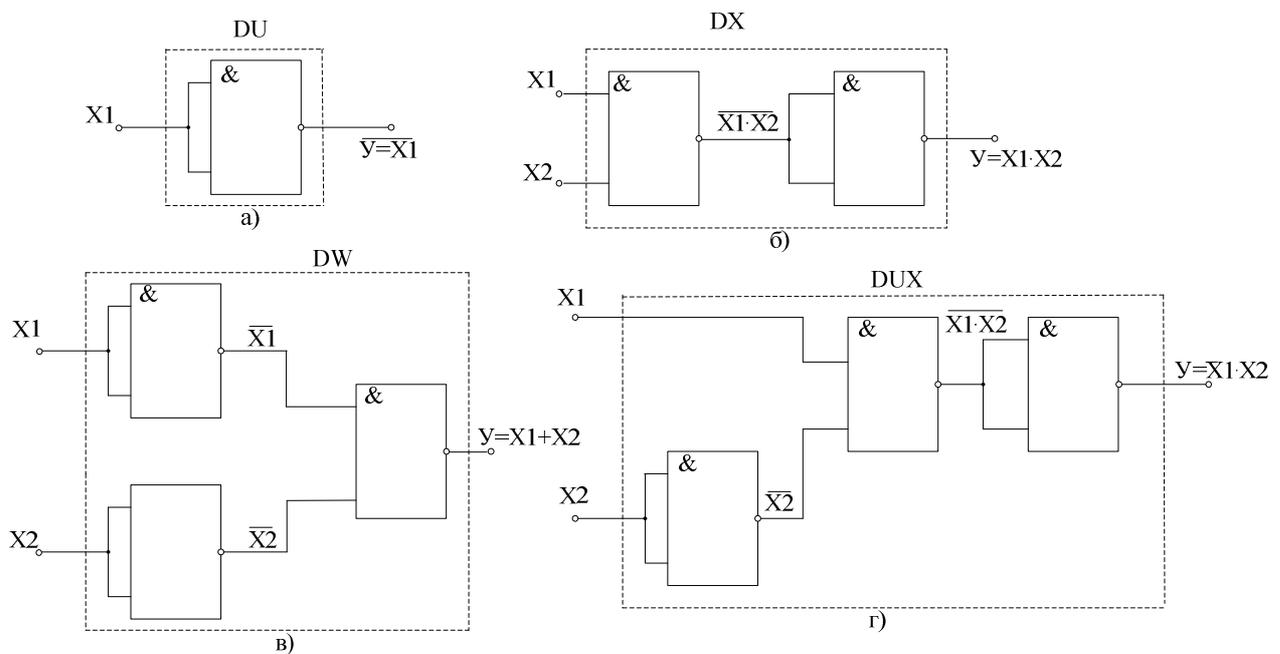


Рис. 3.2.1. Функциональные схемы логических элементов НЕ (а), И (б), ИЛИ (в) и ЗАПРЕТ (г), выполняемых на интегральных микроэлементах

3. Запоминающие элементы.

Логическая операция ПАМЯТЬ реализуется посредством триггеров и регистров, способных запоминать и хранить информацию.

Триггеры. Под триггером понимается электронный элемент, обладающий двумя устойчивыми состояниями, причем переход из одного в другое происходит каждый раз под воздействием сигналов. Один из сигналов записывает информацию в триггер, а второй считывает ее. Различаются потенциальные (статические) и импульсные (динамические) триггеры.

Потенциальный триггер. Различие состояний потенциального триггера определяется наличием или отсутствием на его выходе дискретного потенциального сигнала. Входной сигнал может быть как потенциальным, так и импульсным. Потенциальный триггер осуществляется на основе усилителя постоянного тока с сильной положительной обратной связью, обеспечивающей релейность его проходной характеристики. Отличительной особенностью характеристики триггера является ее симметричное положение относительно вертикальной оси. Поэтому в отличие от других релейных

элементов, например от компаратора, для изменения состояний триггера необходимы два входных сигнала, в частности положительный $+u_{II}$ и отрицательный $-u_{II}$ импульсы.

Счетный интегральный триггер. В устройствах обработки цифровой информации широкое применение находят счетные Т-триггеры и комбинированные RST-триггёры. Триггер со счетным T входом управляется последовательностью импульсов одной полярности. При этом часто используется динамический инверсный вход T .

Универсальный интегральный триггер. Интегральные триггеры обычно выполняются так, чтобы имелась возможность осуществлять рассмотренные выше и некоторые другие функции. Обычно они синхронные, двухступенчатые, но имеют и асинхронные установочные входы, а также по несколько входов одного назначения, объединяемых элементами DW (ИЛИ) или DX (И) [5].

Интегральные регистры.

Регистром называется совокупность из нескольких D-триггеров, предназначенных для запоминания многоразрядного двоичного кода. Информация в регистр может записываться последовательно и параллельно и таким же образом извлекаться из регистра. Записываемая информация поступает на входы всех разрядов (ячеек), например 1-8-го регистра. Запись информации $u_{II,II}$ производится при наличии импульса $u_{II,V}$ на одном или нескольких управляющих входах во все ячейки регистра одновременно. Снимается информация также с выходов всех разрядов одновременно.

После полного заполнения регистра информацию можно извлечь или параллельно, или последовательно. Для последовательного извлечения информации необходимо еще восемь управляющих импульсов. Различные способы записи и извлечения информации в регистрах позволяют использовать их для преобразования параллельного двоичного кода в последовательный и наоборот, а также для выполнения операции сдвига.

В настоящее время выпускается большое количество регистровых интегральных схем, содержащих, как правило, четыре или восемь разрядов регистра в одном корпусе ИС. Например, интегральная микросхема 155ИР1 - это универсальный сдвигающий четырехразрядный регистр.

4. Сумматоры двоичных чисел.

Сумматоры представляют собой комбинационные логические устройства. Промышленностью выпускаются одно-, двух- и четырехразрядные интегральные сумматоры, которые позволяют суммировать два числа последовательно разряд за разрядом или параллельно, т.е. все разряды складывать одновременно.

Выполнение операций суммирования и умножения.

При выполнении *суммирования* и *умножения* сумматоры используются вместе с регистрами, которые служат для хранения промежуточных и конечных результатов. Такие сумматоры называются накопительными.

Для выполнения *умножения* используются схемы последовательно-параллельного и параллельного действия. Применяются умножители, работающие в прямом и дополнительном кодах. Наиболее просто реализовать умножение в прямом коде [1].

Вопросы для самопроверки по теме 3.2.1.

«Элементы логической части и обработки цифровых сигналов»

1. Каково назначение логической части автоматических устройств?
2. В каком режиме работают логические элементы?
3. По какой схеме выполняется операция логического сложения ИЛИ на интегральных микроэлементах типа И-НЕ?
4. По какой схеме выполняется операция логического умножения И на интегральных микроэлементах типа И-НЕ?
5. Какой сумматор называется накопительным, чем он отличается от комбинационного?

6. Как выполняется умножение двух чисел в двоичном параллельном коде?

Варианты тестов по теме 3.2.1.

«Элементы логической части и обработки цифровых сигналов»

1. Логическое умножение это:
 - а) дизъюнкция
 - б) инверсия
 - в) конъюнкция
2. Обработка дискретных сигналов по логическим алгоритмам обеспечивается микросхемами.
3. Под триггером понимается элемент, обладающий двумя состояниями, причем переход из одного в другое происходит каждый раз под воздействием сигналов.
4. Интегральный регистр – это ...

Тема 3.2.2. Исполнительные элементы автоматических устройств

План.

1. Назначение и особенности исполнительных элементов.
2. Элементы отображения информации.
3. Исполнительные усилители.

1. Назначение и особенности исполнительных элементов.

Исполнительные элементы представляют собой устройства, служащие для воздействия на управляемый объект, отображения информации для человека (оператора) или ввода информации в управляющую вычислительную машину. Управляющее воздействие исполнительного элемента обычно является энергетическим воздействием и представляет собой изменяющийся поток энергии, вводимый в объект. Это могут быть дополнительный ток возбуждения возбуждателя синхронного генератора, ток включающего электромагнита выключателя, поток масла золотника двигателя приводного

механизма направляющего аппарата гидротурбины и т.д. Исполнительные элементы автоматических управляющих устройств требуют для своего функционирования относительно больших мощностей. Поэтому важное значение приобретают их энергетические показатели. Относительно высокая выходная мощность и необходимость значительного усиления мощности сигнала при его преобразовании в управляющее воздействие являются главными особенностями исполнительных элементов автоматических управляющих устройств. В отличие от других функциональных элементов они часто представляют собой преобразователи электрической энергии в механическое перемещение.

В качестве исполнительных элементов в основном применяются: мощные магнитные и полупроводниковые усилители, бесконтактные тиристорные переключатели; мощные электромагнитные реле постоянного и переменного тока, специальные конструкции которых обычно называются контакторами, электродвигатели постоянного и переменного тока; электрогидравлические устройства (золотники с электромагнитным приводом).

Устройства отображения информации для оператора являются исполнительными элементами автоматических информационных устройств. Их особенности обуславливаются специфичностью процесса быстрого и достоверного доведения до сознания человека поступающей информации. Устройства отображения информации находятся на диспетчерских пунктах управления процессом производства и распределения электроэнергии. К ним относятся устройства световой и звуковой сигнализации, визуальные цифровые индикаторы и цифropечатающие устройства, проекционные устройства с электронно-лучевыми трубками и экранами, элементы щитов с управляемыми мнемоническими схемами электростанций и энергосистем и др [1].

2. Элементы отображения информации.

Отображение информации представляет собой или, главным образом, визуальное воспроизведение сигналов, или их фиксирование (регистрацию). Соответственно и элементы отображения информации можно разделить на элементы воспроизведения и фиксирования сигналов. Характерными устройствами отображения аналоговой информации являются аналоговые измерительные приборы, визуально воспроизводящие сигналы, и самопишущие измерительные приборы и осциллографы, фиксирующие непрерывно изменяющиеся информационные параметры,

Цифровые индикаторы являются элементами отображения информации в удобной для восприятия человека десятичной системе счисления. Они состоят из газоразрядных ламп или индикаторов на жидких кристаллах, счетчиков и бесконтактных ключей, преобразующих цифровой сигнал в единичной или двоичной системе счисления в сигнал десятичного числа. Применяются в основном две разновидности индикаторных ламп: декатроны и цифровые индикаторные лампы.

Более удобными для отображения информации являются *цифровые индикаторные лампы*. Катоды цифровой лампы выполнены в виде цифр и расположены друг над другом в такой последовательности, чтобы любой из светящихся катодов был хорошо виден со стороны сетчатого анода. Зажигается тот из катодов, который подключается к отрицательному выводу источника питания с помощью обычно бесконтактного транзисторного ключа схемы управления цифровыми лампами. Цифровые лампы имеют и электроды в виде знаков (плюс, минус, точка, запятая) и символов (V , A , HZ и др.).

По функциональным возможностям различаются несколько разновидностей индикаторов. Простейший из них с непосредственным управлением от двоично-десятичного дешифратора содержит интегральные.

Существуют *световодные цифровые индикаторы*, представляющие собой жгуты тонких световолокон, свитые так, что их торцы на одном из концов жгута - светящиеся точки - образуют десятичную цифру. С

противоположного конца - передающего - жгут подсвечивается лампой накаливания, зажигание которой соответствует цифре разряда десятичного числа. Существуют и проекционные цифровые экраны [8].

Цифросинтезирующие индикаторы представляют собой набор засвечиваемых на темном фоне или затеняемых на световом фоне линий (полосок), образующих десятичную цифру. Цифра синтезируется из семи полосок, подсвечиваемых лампами накаливания или представляющих собой люминесцентные лампы. Семи-сегментные цифровые лампы накаливания выпускаются промышленностью типа ИВ, они высвечивают ряд букв, а также знаки плюс и минус.

Дисплеи - электронные устройства с электронно-лучевой трубкой (экраном) - воспроизводят информацию в цифровой, алфавитной и графической формах. Экран состоит из строк, в каждой из которых размещается несколько десятков алфавитно-цифровых знаков. Они формируются набором светящихся на экране точек, соответствующие комбинации которых определяются специальным знакогенератором, представляющим собой логическую схему (программируемую логическую матрицу), на которую из постоянного запоминающего устройства поступают коды алфавитно-цифровых знаков. Дисплей обычно является принадлежностью универсальной или специализированной цифровой ЭВМ.

Мнемосхемы - наиболее удобны для фиксирования дискретных сигналов об изменениях электрических схем (отключениях и включениях вычислителей синхронных генераторов, линий электропередачи) электрических станций и электроэнергетической системы. Они состоят из мнемосимволов (горизонтальных полос, квадратов и др.), изменяющих окраску или положение под воздействием дискретных сигналов, поступающих от соответствующих информационных автоматических устройств [6].

3. Исполнительные усилители.

Исполнительными элементами автоматических управляющих устройств непрерывного действия, прежде всего различных автоматических регуляторов,

обычно являются мощные выходные усилители. Используются транзисторные, тиристорные, магнитные и комбинированные, как правило, реверсивные [с изменением направления (знака) выходного постоянного тока] усилители.

Тиристорные и магнитные усилители по принципу действия, а транзисторные часто в целях повышения энергетического использования недостаточно мощных транзисторов функционируют как устройства с фазовым или времяимпульсным управлением.

Вопросы для самопроверки по теме 3.2.2.

«Исполнительные элементы автоматических устройств»

1. Каково назначение исполнительных элементов автоматических устройств?
2. Как отображается на диспетчерском пункте электроэнергетической системы дискретная информация о состоянии электрической схемы электроэнергетической системы?
3. Почему в исполнительных элементах непрерывного действия транзисторы обычно работают в режиме переключения?
4. Как функционирует тиристорный исполнительный элемент релейного действия?

Варианты тестов по теме 3.2.2.

«Исполнительные элементы автоматических устройств»

1. Исполнительный элемент – это ...
2. Устройством отображения информации могут являться ...
3. Цифровые являются элементами отображения информации.
4. Исполнительные усилители – это ...

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основой построения содержания дисциплины является принцип функционального разделения автоматических устройств электроэнергетических систем на функциональные элементы соответственно основным типовым операциям, выполняемым в автоматическом устройстве над сигналами в процессе получения, передачи и переработки, отображения и использования информации.

Дисциплина «Элементы автоматических устройств» является базой для дисциплин связанных с автоматикой энергосистем, релейной защитой. Поэтому в учебном пособии рассмотрены вопросы, касающиеся функциональных элементов устройств автоматического и автоматизированного управления в электроэнергетике. Уделено внимание активным аналоговым функциональным элементам на основе интегральных операционных усилителей и цифровым элементам на интегральных микросхемах и особенно программным на микропроцессорах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Овчаренко Н.И. Автоматика энергосистем : учеб.: рек. Мин. обр. РФ/ Н. И. Овчаренко; под ред. А. Ф. Дьякова. - 3-е изд., испр. - М.: Изд-во Моск. энергет. ин-та, 2009. - 476 с.
2. Булкин А.Е. Автоматическое регулирование энергоустановок : учеб. пособие : рек. Мин. обр. РФ/ А. Е. Булкин. - М.: Изд-во Моск. энергет. ин-та, 2009. - 508 с.
3. Марголин В.И. Физические основы микроэлектроники: учеб: рек. УМО/ В. И. Марголин, В. А. Жабрев, В. А. Тупик. - М.: Академия, 2008. - 400 с.
4. Дьяков А. Ф. Микропроцессорная автоматика и релейная защита электроэнергетических систем: учеб. пособие / А. Ф. Дьяков, Н. И. Овчаренко. - 2-е изд., стер. - М.: Изд-во Моск. энергет. ин-та, 2010. - 336 с
5. Браммер Ю.А. Импульсные и цифровые устройства: учеб. для сред. спец. завед.: Доп. Мин. обр. РФ / Ю.А. Браммер, И.Н. Пащук. – 7-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2003. – 352 с
6. Дьяков А. Ф. Микропроцессорная релейная защита и автоматика электроэнергетических систем [Текст] : учеб. пособие: рек. УМО / А. Ф. Дьяков, Н. И. Овчаренко. - М. : Изд-во Моск. энергет. ин-та, 2000. - 199 с.
7. Костиков В.Г. Источники электропитания электронных средств. Схемотехника и конструирование: учебник: рек. Мин. обр. РФ / В.Г. Костиков, Е.М. Парфенов, В.А. Шахнов. – 2-е изд. – М.: Горячая линия-Телеком, 2001. – 344 с.
8. Овчаренко Н.И. Элементы автоматических устройств энергосистем: в 2 кн.: учеб. для вузов / Н. И. Овчаренко. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1995 – 254 с.
9. Овчаренко Н.И. Аппаратные и программные элементы автоматических устройств энергосистем: учеб. пособие / Н. И. Овчаренко. – М.: НИЦ ЭНАС, 2004. – 508 с

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....	3
Введение.....	5
Модуль 1 «Системы и устройства элементов автоматических устройств».....	6
Тема 1.1. Автоматические системы, устройства и функциональные элементы.....	6
Вопросы для самопроверки по теме 1.1. «Автоматические системы, устройства и функциональные элементы»	17
Варианты тестов по теме 1.1. «Автоматические системы, устройства и функциональные элементы»	17
Тема 1.2. Характеристики элементов автоматических устройств	18
Вопросы для самопроверки по теме 1.2. «Характеристики элементов автоматических устройств»	26
Варианты тестов по теме 1.2. «Характеристики элементов автоматических устройств»	26
Модуль 2 «Функциональные технологические элементы автоматических устройств»	28
Тема 2.1. Функциональные элементы передающей части автоматических устройств	28
Вопросы для самопроверки по теме 2.1. «Функциональные элементы передающей части автоматических устройств»	42
Варианты тестов по теме 2.1. «Функциональные элементы передающей части автоматических устройств»	42
Тема 2.2. Фильтры симметричных составляющих	43
Вопросы для самопроверки по теме 2.2. «Фильтры симметричных составляющих»	53
Варианты тестов по теме 2.2. «Фильтры симметричных составляющих»	53
Тема 2.3. Измерительные преобразователи мощности	54

Вопросы для самопроверки по теме 2.3. «Измерительные преобразователи мощности»	67
Варианты тестов по теме 2.3. «Измерительные преобразователи мощности» ..	67
Модуль 3 «Обработка сигналов. Измерительная часть автоматических устройств»	68
Тема 3.1. Элементы сравнения сигналов. Измерительные органы автоматических устройств	68
Тема 3.1.1. Элементы сравнения сигналов	68
Вопросы для самопроверки по теме 3.1.1. «Элементы сравнения сигналов» ...	81
Варианты тестов по теме 3.1.1. «Элементы сравнения сигналов»	82
Тема 3.1.2. Измерительные органы автоматических устройств	82
Вопросы для самопроверки по теме 3.1.2. «Измерительные органы автоматических устройств»	95
Варианты тестов по теме 3.1.2. «Измерительные органы автоматических устройств»	95
Тема 3.2. Элементы логической части и обработки цифровых сигналов. Исполнительные элементы автоматических устройств	96
Тема 3.2.1. Элементы логической части и обработки цифровых сигналов	96
Вопросы для самопроверки по теме 3.2.1. «Элементы логической части и обработки цифровых сигналов»	101
Варианты тестов по теме 3.2.1. «Элементы логической части и обработки цифровых сигналов»	102
Тема 3.2.2. Исполнительные элементы автоматических устройств	102
Вопросы для самопроверки по теме 3.2.2. «Исполнительные элементы автоматических устройств»	106
Варианты тестов по теме 3.2.2. «Исполнительные элементы автоматических устройств»	106
Заключение	107
Библиографический список.....	108

Наталья Сергеевна Бодруг

Старший преподаватель кафедры энергетики АмГУ

Изд-во АмГУ. Подписано к печати _____ Формат 60 x 84/16. Усл. печ. л. ____,
уч.-изд. л. ____. Тиража . Заказ _____