

М.А. Шабад

**Расчеты релейной защиты и автоматики
распределительных сетей**

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 621.3
ББК 31.352
М11

М11 **М.А. Шабал**
Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей / М.А. Шабал – М.: Книга по Требованию, 2023. – 296 с.

ISBN 978-5-458-37489-7

ISBN 978-5-458-37489-7

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2023
© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2023

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

В-1. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Распределительные сети предназначены для передачи электроэнергии потребителям и состоят из линий электропередачи, питающих ряд трансформаторных подстанций, или вводов к электроустановкам потребителей, а также из трансформаторных подстанций и распределительных пунктов [1, 2].

Электрические сети различаются по конструктивному выполнению (воздушные и кабельные линии, токопроводы), по роду тока, напряжению (табл. В-1), по режиму нейтралей трансформаторов, конфигурации, назначению. К распределительным сетям относятся сети переменного тока с номинальным напряжением 0,38—35 кВ, а также сети 110 кВ, а иногда и 220—330 кВ, не входящие в так называемую основную сеть энергосистемы и предназначенные для питания трансформаторных подстанций.

Таблица В-1

**Междуфазные напряжения электрических
распределительных сетей трехфазного
тока 50 Гц**

Напряжение, кВ		
номинальное	наибольшее	среднее (для расчета токов к. з.)
0,22/0,127	—	0,22/0,127
0,38/0,22	0,4/0,23	0,4/0,23
0,66/0,38	0,69/0,4	0,69/0,4
3	3,5	3,15
6	6,9	6,3
10	11,5	10,5
20	23,0	20,0
35	40,5	37,0
110	126,0	115,0
150	172,0	154,0
220	252,0	230,0
330	373,0	330,0

Примечание. Номинальные и наибольшие напряжения указаны по ГОСТ 721—74 и 721—77.

Сети 6—35 кВ в СССР работают с изолированной или компенсированной нейтралью и характеризуются малыми токами замыкания на землю. Сети 110 кВ и выше обычно работают с заземленной нейтралью и характеризуются большими токами короткого замыкания (к. з.) на землю. В аналогичном режиме работают и сети 0,38 кВ.

По конфигурации электросети делятся на разомкнутые (радиальные) и замкнутые. Разомкнутые сети имеют одностороннее питание, замкнутые — одно- или многостороннее питание. Промежуточное положение с точки зрения релейной защиты и автоматики занимают

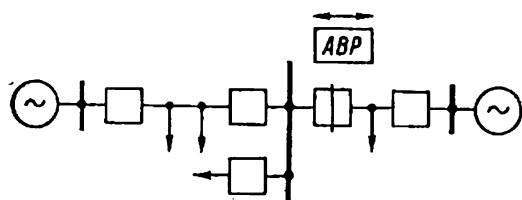


Рис. В-1. Схема участка распределительной сети с устройством АВР двустороннего действия

нормально разомкнутые сети, которые в послеаварийном или ремонтном режиме могут получать питание с противоположной стороны (рис. В-1).

По назначению распределительные сети 6; 10; 35 кВ обычно подразделяют в соответствии с основным потребителем на *сельские, городские*

и *промышленные*. Эти несколько условные названия дают, тем не менее, представление об особенностях и потребителях, и сетей, и их релейной защиты (гл. 1).

Понижающие трансформаторы распределительных сетей различаются мощностями, напряжениями и схемами соединения обмоток (стандартными являются схемы соединения $\Upsilon/\Delta-11$, $\Upsilon/\Upsilon/\Delta-0-11$, а также $\Upsilon/\Upsilon-0$ и $\Delta/\Upsilon-11$), диапазонами и способами регулирования напряжения, напряжениями к. з. (u_k , %). Защита трансформаторов выполняется в зависимости от этих данных (гл. 2).

В-2. ТРЕБОВАНИЯ К РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЕ

Релейная защита элементов распределительных сетей должна отвечать требованиям «Правил устройства электроустановок» [1], которые предъявляются ко всем устройствам релейной защиты: *быстродействия, селективности, надежности и чувствительности*.

Быстродействие релейной защиты должно обеспечивать наименьшее возможное время отключения коротких замыканий. Быстрое отключение к. з. не только ограничивает область и степень повреждения защищаемого элемента, но и обеспечивает сохранение бесперебойной работы неповрежденной части энергосистемы, или электростанции, или подстанции. Быстрое отключение к. з., как известно, предотвращает нарушение устойчивости параллельной работы синхронных генераторов и синхронных электродвигателей, облегчает самозапуск электродвигателей, повышает вероятность успешных действий устройств автоматического повторного включения (АПВ) и автоматического включения резервного питания (АВР).

С е л е к т и в н ы м (избирательным) действием защиты называется такое действие, при котором автоматически отключается только поврежденный элемент электроустановки (трансформатор, линия, электродвигатель и т. п.). Обеспечение селективной работы устройств защиты — одна из важнейших задач, решаемых при проектировании и обслуживании этих устройств.

Требования селективности и быстродействия наиболее просто удовлетворяются при использовании защит, обладающих абсолютной селективностью, как, например, дифференциальные защиты трансформаторов, линий и других элементов энергосистемы. По принципу действия они не срабатывают при к. з. на смежных элементах и поэтому выполняются с мгновенным действием на отключение поврежденного элемента. Но такие защиты не могут использоваться в качестве резервных при к. з. на смежных элементах, для этих целей применяются защиты, обладающие относительной селективностью (максимальные токовые, дистанционные), которые в общем случае должны выполняться с выдержками времени [3]. Время срабатывания этих защит в распределительных сетях выбирается, как правило, только по условию селективной работы при к. з., но могут быть случаи, когда требуется снижение времени отключения к. з. даже в ущерб селективности.

«Правила» [1] допускают неселективное действие защиты, исправляемое последующим действием устройств АПВ или АВР, в следующих случаях:

для быстрого отключения к. з. с целью предотвращения нарушения устойчивой работы энергосистемы или электроустановок потребителей (см. § 1-2, п. 2);

при использовании упрощенных главных электрических схем подстанций с отделителями в цепях трансформаторов (или линий), которые отключаются в *бестоковую паузу*; это же допущение может быть отнесено к линиям, питающим трансформаторы, защищаемые плавкими предохранителями или открытыми плавкими вставками.

Допустимое время отключения к. з. по условиям предотвращения нарушения устойчивости работы энергосистемы или электроустановок потребителей определяется службами (группами) электрических режимов энергосистемы. Приближенно считается, что защита должна действовать без замедления при всех к. з., обуславливающих остаточные напряжения ниже $(0,6 \div 0,7)U_{ном}$ на сборных шинах, через которые осуществляется параллельная работа синхронных машин или питаются ответственные потребители [1].

Быстрое отключение к. з. может потребоваться и для сохранения в целости линий с малым сечением проводов, не обладающих необходимой термической стойкостью при имеющемся уровне токов к. з. (пример 1-1).

Во всех остальных случаях действие защиты может происходить с замедлением до нескольких секунд. Выбор выдержек времени, определяемый требованиями селективности и некоторыми другими условиями, рассматривается ниже.

Надежность функционирования релейной защиты предполагает надежное срабатывание устройства при появлении условий на срабатывание и надежное несрабатывание устройства при их отсутствии. Надежность функционирования релейной защиты должна обеспечиваться устройствами, которые по своим параметрам и исполнению соответствуют назначению и условиям применения, а также надлежащим обслуживанием этих устройств.

Наряду с выполнением всех необходимых мероприятий по обеспечению надежности функционирования устройств релейной защиты должно предусматриваться резервирование возможных отказов защит или выключателей. «Правила» [1] указывают на необходимость установки резервных защит, обеспечивающих *дальнее резервирование*, т. е. способных действовать при к. з. на смежных линиях в случае отказа собственной защиты или выключателя поврежденной линии (шин, трансформатора и т. п.).

Если дальнейшее резервирование при к. з. на каком-либо элементе не обеспечивается, то на этом элементе должно осуществляться *ближнее резервирование*, т. е. установка двух или более независимых устройств защиты, резервирующих друг друга. Как правило, в сетях 110 кВ и выше также выполняются специальные устройства резервирования при отказе выключателей (УРОВ).

В тех случаях, когда полное обеспечение дальнего резервирования связано со значительным усложнением защиты или технически невозможно, «Правила» допускают не резервировать отключения к. з. за трансформаторами, на реактированных линиях, в конце длинного смежного участка линии напряжением 6—35 кВ, а также на линиях напряжением 110 кВ и выше при наличии ближнего резервирования. Допускается осуществлять дальнейшее резервирование только при наиболее частых видах повреждения (например, при к. з. на землю в сетях 110 кВ и выше, которые составляют примерно 85 % всех видов к. з.). Допускается предусматривать неселективное действие защиты при к. з. на смежных элементах (при дальнем резервном действии) с обесточением в отдельных случаях подстанций; при этом следует по возможности обеспечивать исправление этих неселективных отключений действием устройств АПВ или АВР.

Чувствительностью релейной защиты называют ее способность реагировать на все виды повреждений и аварийных режимов, которые могут возникать в пределах основной защищаемой зоны и зоны резервирования. Оценка чувствительности основных типов релейных защит должна производиться при помощи коэффициентов чувствительности, значения которых для разных типов защиты и реле указываются в «Правилах» [1]. Определение коэффициентов чувствительности производится при наиболее неблагоприятных видах повреждения, но для реально возможного режима работы электрической системы. Все короткие замыкания при этом рассматриваются как *металлические*, т. е. не учитываются возможные переходные сопротивления в месте к. з. и в том числе сопротивление электрической дуги [1].

Если при расчете коэффициентов чувствительности выясняется, что возможно неселективное действие защиты последующего (питающего) элемента из-за отказа вследствие недостаточной чувствительности защиты предыдущего элемента, то чувствительность этих защит необходимо согласовывать между собой. Методы и примеры согласования чувствительности однотипных и разнотипных защит смежных элементов, обеспечивающие их селективную работу, рассматриваются в соответствующих главах книги. Вместе с тем «Правила» допускают не согласовывать между собой чувствительность тех ступеней защит смежных элементов, которые предназначены для дальнего резервирования, если неотключение к. з. вследствие недостаточной чувствительности защиты последующего (питающего) элемента, например, автотрансформатора, может привести к тяжелым последствиям. Решение об отказе согласования чувствительности защит должно утверждаться руководством энергетического предприятия наряду с решениями о вынужденном выполнении неселективных защит или других отступлений от основных требований к релейной защите.

В-3. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К РАСЧЕТУ (ВЫБОРУ УСТАВОК) РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

Расчет релейной защиты заключается в выборе рабочих параметров срабатывания (рабочих уставок) как отдельных реле, так и комплектных устройств релейной защиты, а в будущем — multifunctional устройств защиты. Во всех существующих и разрабатываемых устройствах защиты должна быть предусмотрена возможность плавного или ступенчатого изменения параметров срабатывания в определенных пределах.

В настоящее время выбор рабочих уставок защиты принято производить в расчете на «наихудший случай» (реально возможный), учитывая, что неправильное действие защиты даже при маловероятном сочетании обстоятельств может привести к большому ущербу в народном хозяйстве.

При выполнении расчетов релейной защиты в распределительных сетях необходимо строго соблюдать действующие «Правила» [1], «Руководящие указания по релейной защите» [4—6], а также директивные указания Главного технического управления, выпускаемые в виде противоаварийных и эксплуатационных циркуляров, решений и сборников [7].

К сожалению, специальные руководящие указания по релейной защите распределительных сетей ниже 35 кВ пока что отсутствуют. Поэтому, рассматривая примеры расчета защит в сетях 6 и 10 кВ, автор использовал указания [1—9], опыт эксплуатации релейной защиты в этих сетях [10—11], типовые разработки ведущих проектных и научных институтов, техническую информацию заводов-изготовителей. При этом надо отметить, что некоторые рекомендации, а также расчетные коэффициенты, принятые в примерах, нуждаются в дальнейшей проверке в условиях эксплуатации.

Для выполнения расчета релейной защиты (выбора уставок) прежде всего необходимы полные и достоверные исходные данные, к которым относятся:

- схема защищаемой сети и режимы ее работы (с указанием, как создаются рабочие и ремонтные режимы — автоматически или неавтоматически);

- сопротивления и э. д. с. (или напряжения) питающей системы для максимального и минимального режимов ее работы;

- режимы заземления нейтралей силовых трансформаторов;

- параметры линий, трансформаторов, реакторов и т. д.;

- значения максимальных рабочих токов линий, трансформаторов и т. д. в рабочих, ремонтных и послеаварийных режимах;

- характеристики электроприемников (особенно крупных электродвигателей);

- типы выключателей;

- типы и параметры измерительных трансформаторов тока и трансформаторов напряжения с указанием мест их установки в схеме сети;

- типы и параметры срабатывания (уставки) существующих устройств релейной защиты и автоматики на смежных элементах (как питающих, так и отходящих);

- типы и принципиальные схемы устройств релейной защиты и автоматики, подлежащих расчету.

Для обеспечения селективности рабочие уставки защит смежных элементов должны быть согласованы между собой. Поэтому выбор уставок следует производить, как правило, не для одного элемента, а для участка сети. При необходимости расчета уставок защиты одного вновь включаемого элемента надо согласовать выбранные уставки с уставками существующих защит, по возможности не изменяя последних. Следует избегать «сменных уставок», изменяемых в связи с изменением режима сети, так как производить смену уставок автоматически — сложно, а вручную — требует много времени и повышает вероятность ошибок в настройке защиты.

В общем случае релейная защита не должна ограничивать возможности полного использования основного электрического оборудования сети. Однако при разработке режимов работы сети, в свою очередь, должны учитываться и технические возможности типовых устройств релейной защиты. Не исключено, что по результатам расчета уставок некоторые редкие режимы могут быть запрещены, чтобы не усложнять релейную защиту.

При выборе первичных схем электроустановок и сетей следует учитывать условия выполнения более простой и надежной релейной защиты и возможности предотвращения или ликвидации нарушений, обеспечиваемые автоматикой. Последнее также подчеркивает необходимость комплексного рассмотрения вопросов релейной защиты и противоаварийной автоматики сети (АПВ, АВР, делительных устройств и др.).

Немаловажное значение имеет оформление материалов расчета релейной защиты и автоматики.

Расчет уставок должен состоять, как правило, из разделов:

1. Исходные данные (с указанием источников информации).

2. Расчет токов к. з.

3. Выбор уставок (с необходимым графическим материалом в виде схем, карт селективности и др.).

4. Результаты расчета. Этот раздел должен содержать окончательно выбранные уставки и другие данные для регулировки (максимальные токи к. з., коэффициенты возврата реле и т. п.), а также при необходимости указания по изменению проектной схемы защиты, замене некоторых типов реле и т. д.

Рекомендуется прикладывать к расчету схему сети с условными обозначениями типов релейной защиты и указанием выбранных уставок. В характерных точках сети на схеме могут быть приведены значения токов к. з.

На основании расчета составляются задания на наладку защиты каждого из элементов сети.

Задание на наладку защиты должно содержать:

1) наименование и технические данные защищаемого элемента (необходимые для расчета токов к. з. и уставок защиты);

2) тип, коэффициент трансформации, схему соединения и место установки трансформаторов тока и при необходимости трансформаторов напряжения;

3) номера принципиальных схем релейной защиты, автоматики и управления защищаемого элемента, дату их выпуска и наименование организации, выпустившей эти схемы (или одну общую схему);

4) рабочие уставки основных реле тока и напряжения (с указанием номеров позиций в схеме и типов реле) в первичных и вторичных величинах, коэффициенты возврата, максимальные вторичные величины для проверки надежности работы контактной системы реле; для токовых реле, имеющих ступенчатую регулировку тока срабатывания, дополнительно указываются ориентировочные числа витков или номера контактных разъёмных соединений, требующие уточнения при настройке реле; для токовых реле, имеющих обратную зависимость времени действия от тока, дополнительно указываются ток и время срабатывания, соответствующие независимой части характеристики, а при необходимости особенно точной настройки — еще несколько контрольных точек (тока и времени) в зависимой части характеристики (например, при вынужденном уменьшении степени селективности);

5) для реле направления мощности задаются максимальные токи и напряжения, при которых должен отсутствовать «самоход» на срабатывание реле, мощность срабатывания (чувствительность) при угле максимальной чувствительности, значение максимального тока для проверки надежности работы контактов (формы задания для более сложных реле и панелей защиты приведены в соответствующих инструкциях по наладке);

6) рабочие уставки вспомогательных реле: время замыкания реле времени, время срабатывания и возврата специальных промежуточных реле с замедлением действия, ток срабатывания специальных

промежуточных реле и реле времени, включаемых в цепи трансформаторов тока.

В примечании к заданию могут указываться расчетные условия, для которых выбраны рабочие уставки: максимальные рабочие токи защищаемого элемента, режимы его работы и т. п. При необходимости указываются сменные уставки. В задании следует привести и конкретные указания по эксплуатации устройств релейной защиты и автоматики (если таковые имеются), которые затем будут включены в инструкцию для оперативного дежурного персонала.

Задание должно быть согласовано с организацией, эксплуатирующей энергетический объект, от которого получает питание защищаемый элемент.

Все сделанные расчеты и задания на наладку должны регистрироваться в специальных журналах.

Для правильной организации труда расчетчика на его рабочем месте должны находиться необходимые *справочные материалы*: краткий математический справочник, электротехнический справочник, характеристики реле, панелей защиты и плавких предохранителей (характеристики зависимых реле и предохранителей должны быть построены в достаточно большом масштабе), характеристики трансформаторов тока, расчетные кривые для расчета токов к. з. в сетях с местными электростанциями, литература по релейной защите.

У расчетчика должны быть сосредоточены также местные справочные материалы: сборник параметров основных элементов энергосистемы или электросети (постоянно корректируемый и пополняемый по мере сооружения новых линий, установки новых трансформаторов); схемы сети; таблицы максимальных рабочих токов линий и трансформаторов; карта уставок, представляющая собой упрощенную принципиальную схему сети с обозначением типов релейной защиты и автоматики и их уставок (в крупных сетях выполняют несколько карт уставок: для сетей 110, 35, 10 кВ и т. п.).

Полезны материалы, облегчающие труд расчетчика при массовых расчетах: номограммы для расчетов токов к. з. в распределительных сетях 6 и 10 кВ, формы таблиц для проведения типовых расчетов релейной защиты основных элементов сети и т. п.

В крупных энергосистемах и энергообъединениях сейчас широко используются электронно-вычислительные машины (ЭВМ) для расчетов электрических величин при к. з. и сложных видах повреждений, а также для выбора уставок некоторых типов релейной защиты и автоматики, главным образом, в основной части системы. Для расчетов релейной защиты распределительных сетей, в особенности сложных замкнутых сетей с двумя и более источниками питания, с параллельными линиями 110 кВ и выше также целесообразно использовать ЭВМ. Полученные результаты расчетов на ЭВМ должны оформляться таким образом, чтобы ими легко можно было воспользоваться повторно.

И наконец необходимо подчеркнуть, что расчеты релейной защиты требуют не только определенных знаний и навыков, но и в большой степени аккуратности и внимательности.

РАСЧЕТЫ ЗАЩИТ ЛИНИЙ 6 И 10 КВ СЕЛЬСКИХ, ГОРОДСКИХ И ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОСЕТЕЙ

1-1. ОСНОВНЫЕ УСЛОВИЯ РАСЧЕТА МАКСИМАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ ЛИНИЙ

Защита от коротких замыканий линий 6 и 10 кВ распределительных сетей осуществляется преимущественно с помощью максимальных токовых защит.

В соответствии с применяемыми типами реле максимальные токовые защиты могут иметь не зависимое от тока время срабатывания (реле тока типа РТ-40 и реле времени типа РВ или РВМ) или обратно зависимое от тока время срабатывания (реле тока типов РТ-80, ЛТЗ, РТВ). Последние имеют ограниченно зависимую характеристику $t_p = f(I_p)$, причем переход на независимую часть характеристики происходит у разных типов реле при различных кратностях тока I_p по отношению к току срабатывания реле $I_{с.р.}$. Сокращенно называют эти защиты с зависимой (рис. 1-1) или независимой (рис. 1-2) характеристикой. Характеристики реле типов РТ-80 и РТВ приведены в приложении.

Более пологие характеристики, например у реле РТВ-IV — РТВ-VI, позволяют лучше обеспечить селективность защиты с плавкими предохранителями и автоматами относительно мощных отходящих элементов. Более крутые характеристики позволяют наилучшим образом произвести согласование с независимыми защитами питающих элементов. У полупроводниковой токовой защиты типа ЛТЗ имеется возможность выбора одной из обратно зависимых от тока характеристик времени срабатывания с переходом на независимую часть при кратности тока от 1,4 (подобно РТВ-I) до 3 (подобно РТВ-IV). У другой полупроводниковой токовой защиты типа ТЗВР зависимая от тока часть характеристики срабатывания представляет собой наклонную *прямую* линию (характеристика *в* на рис. 1-1, *а*). Крутизна наклона характеристики может изменяться (примеры 1-3 и 1-10). Большие возможности выбора характеристик срабатывания токовых защит предусмотрены в многофункциональном защитном устройстве типа ЯРЭ-2201 (пример 1-26).

Расчет максимальной токовой защиты заключается в выборе тока срабатывания защиты (первичного), тока срабатывания реле (для принятой схемы защиты и типа реле),

времени срабатывания защиты (с независимой характеристикой) или характеристики срабатывания токовых реле (для защиты с зависимой характеристикой).

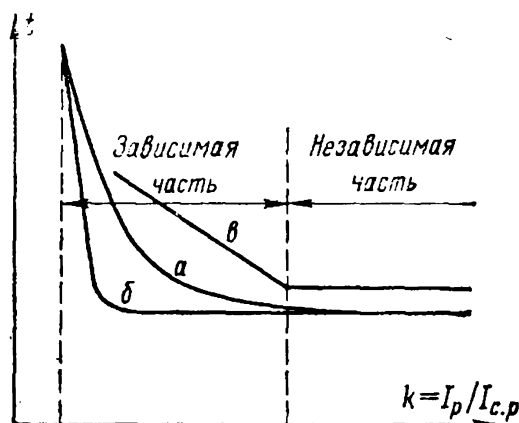


Рис. 1-1. Зависимые от тока характеристики срабатывания максимальной токовой защиты с реле типа РТ-80 (а), РТВ-1 (б) и защиты типа ТЗВР (в)

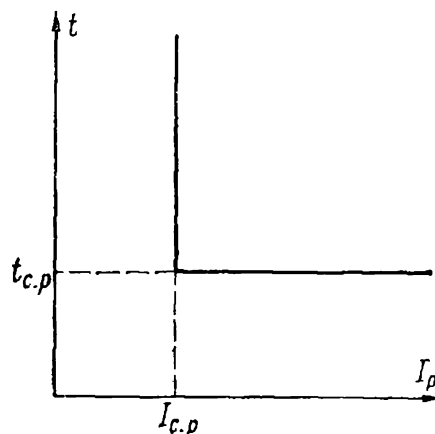


Рис. 1-2. Независимая от тока характеристика срабатывания максимальной токовой защиты

Кроме того, производится расчетная проверка трансформаторов тока (§ 1-3), а также проверка термической стойкости защищаемого элемента при выбранном времени срабатывания защиты (примеры 1-1 и 1-18).

А. Выбор тока срабатывания

Уставки по току максимальной токовой защиты должны обеспечивать:

несрабатывание защиты на отключение защищаемой линии при послеаварийных перегрузках;

согласование действия (по току и по времени) с защитами питающих («последующих») и отходящих («предыдущих») элементов;

необходимую чувствительность при всех видах к. з. в основной защищаемой зоне и в зоне резервирования.

1. Условие несрабатывания на отключение при послеаварийных перегрузках. Для того чтобы обеспечить это условие, следует рассмотреть все возможные послеаварийные режимы.

а. *Отключение с выдержкой времени близкого трехфазного к. з. на отходящем элементе* (Л2 на рис. 1-3). В момент к. з. одновременно срабатывают токовые реле защит 2 и 1, но из-за разного времени действия прежде срабатывает защита 2. Ток, проходящий через защиту 1 после отключения к. з., может оказаться значительно большим, чем перед аварией. Это объясняется тем, что двигатели нагрузки Н подстанции 2, затормозившиеся или остановившиеся во