

Н.В. Чернобровов

Релейная защита

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 621.39
ББК 32
Н11

Н11 **Н.В. Чернобровов**
Релейная защита / Н.В. Чернобровов – М.: Книга по Требованию, 2023. – 623 с.

ISBN 978-5-458-57965-0

В книге рассмотрена релейная защита электрических сетей, оборудования электростанций и сборных шин распределительных устройств. Книга предназначена в качестве учебного пособия для учащихся энергетических техникумов и может быть использована студентами электротехнических и энергетических вузов, а также инженерами и техниками, занимающимися эксплуатацией, монтажом и проектированием релейной защиты электростанций и сетей.

ISBN 978-5-458-57965-0

© 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.

Глава первая

ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ О РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЕ

1-1. НАЗНАЧЕНИЕ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

В энергетических системах на электрооборудовании электростанций, в электрических сетях и на электроустановках потребителей электроэнергии могут возникать повреждения и ненормальные режимы.

П о в р е ж д е н и я в большинстве случаев сопровождаются значительным увеличением тока и глубоким понижением напряжения в элементах энергосистемы.

П о в ы ш е н н ы й т о к выделяет большое количество тепла, вызывающее разрушения в месте повреждения и опасный нагрев неповрежденных линий и оборудования, по которым этот ток проходит.

П о н и ж е н и е н а п р я ж е н и я нарушает нормальную работу потребителей электроэнергии и устойчивость параллельной работы генераторов и энергосистемы в целом.

Н е н о р м а л ь н ы е р е ж и м ы обычно приводят к отклонению величин напряжения, тока и частоты от допустимых значений. При понижении частоты и напряжения создается опасность нарушения нормальной работы потребителей и устойчивости энергосистемы, а повышение напряжения и тока угрожает повреждением оборудования и линий электропередачи.

Таким образом, повреждения нарушают работу энергосистемы и потребителей электроэнергии, а ненормальные режимы создают возможность возникновения повреждений или расстройства работы энергосистемы.

Для обеспечения нормальной работы энергетической системы и потребителей электроэнергии необходимо возможно быстрее выявлять и отделять место повреждения от неповрежденной сети, восстанавливая таким путем нормальные условия работы энергосистемы и потребителей.

Опасные последствия ненормальных режимов также можно предотвратить, если своевременно обнаружить отклонение от нор-

мального режима и принять меры к его устранению (например: снизить ток при его возрастании, повысить напряжение при его снижении и т. д.).

В связи с этим и возникает необходимость в создании и применении автоматических устройств, выполняющих указанные операции и защищающих систему и ее элементы от опасных последствий повреждений и ненормальных режимов.

Первоначально в качестве защитных устройств применялись плавкие предохранители. Однако по мере роста мощности и напряжения электрических установок и усложнения их схем коммутации такой способ защиты стал недостаточным, в силу чего были созданы защитные устройства, выполняемые при помощи специальных автоматов — релее, получившие название релейной защиты.

Релейная защита является основным видом электрической автоматики, без которой невозможна нормальная и надежная работа современных энергетических систем. Она осуществляет непрерывный контроль за состоянием и режимом работы всех элементов энергосистемы и реагирует на возникновение повреждений и ненормальных режимов.

При возникновении повреждений защита выявляет и отключает от системы поврежденный участок, воздействуя на специальные силовые выключатели, предназначенные для размыкания токов повреждения.

При возникновении ненормальных режимов защита выявляет их и в зависимости от характера нарушения производит операции, необходимые для восстановления нормального режима, или подает сигнал дежурному персоналу.

В современных электрических системах релейная защита тесно связана с электрической автоматикой, предназначенной для быстрого автоматического восстановления нормального режима и питания потребителей.

К основным устройствам такой автоматики относятся: автоматы повторного включения (АПВ), автоматы включения резервных источников питания и оборудования (АВР) и автоматы частотной разгрузки (АЧР).

Рассмотрим более подробно основные виды повреждений и ненормальных режимов, возникающих в электрических установках, и их последствия.

1-2. ПОВРЕЖДЕНИЯ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ

Большинство повреждений в электрических системах приводит к коротким замыканиям фаз между собой или на землю (рис. 1-1). В обмотках электрических машин и трансформаторов, кроме того, бывают замыкания между витками одной фазы.

Основными причинами повреждений являются: нарушения изоляции, вызванные старением ее, неудовлетворительным со-

стоянием, перенапряжениями и механическими повреждениями (обрыв проводов, наброс на провода и др.), и о ш и б к и п е р с о - н а л а при операциях (отключение разъединителей под нагрузкой, включение под напряжение на оставленную закоротку и т. п.).

Все повреждения являются следствием конструктивных недостатков или несовершенства оборудования, некачественного его изготовления, дефектов монтажа, ошибок при проектировании, неудовлетворительного или неправильного ухода за оборудованием,

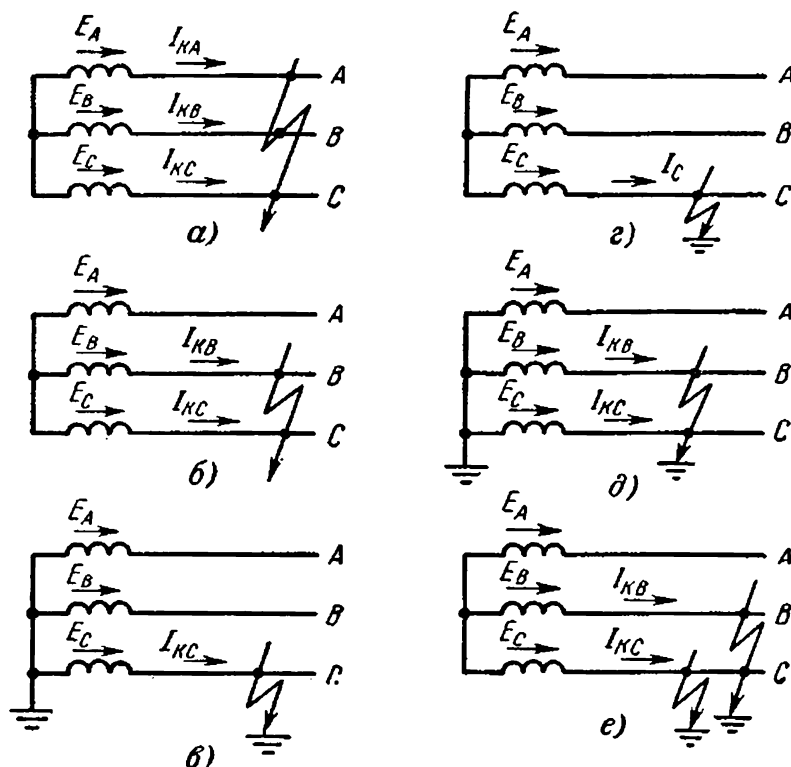


Рис. 1-1. Виды повреждений в электрических установках.

a, б, в и д — трехфазное, двухфазное, однофазное и двухфазное на землю к. з.; *г и е* — замыкания одной фазы и двух фаз на землю в сети с изолированной нейтралью.

ненормальных режимов работы оборудования. Поэтому повреждения нельзя считать неизбежными, но в то же время нельзя и не учитывать возможность их возникновения.

Короткие замыкания (к. з.) являются наиболее опасным и тяжелым видом повреждения. При к. з. э. д. с. E источника питания (генератора) замыкается «накоротко» через относительно малое сопротивление генераторов, трансформаторов и линий (см., например, рис. 1-1, *a—в*).

Поэтому в контуре замкнутой накоротко э. д. с. возникает большой ток $I_{к.з.}$, называемый током короткого замыкания.

Короткие замыкания подразделяются на трехфазные, двухфазные и однофазные в зависимости от числа замкнувшихся фаз; замы-

кания с землей и без земли; замыкания в одной и двух точках сети (рис. 1-1).

При к. з. вследствие увеличения тока возрастает падение напряжения в элементах системы, что приводит к понижению напряжения во всех точках сети, так как напряжение в любой точке M (рис. 1-2, а) $\dot{U}_M = \dot{E} - I_{к.з} z_M$, где $\dot{E}$ — э. д. с. источника питания, а z_M — сопротивление от источника питания до точки M .

Наибольшее снижение напряжения происходит в месте к. з. и в непосредственной близости от него. В точках сети, удаленных от места повреждения, напряжение снижается в меньшей степени.

Происходящие в результате к. з. увеличение тока и снижение напряжения приводят к ряду опасных последствий:

а) Ток к. з. $I_{к.з}$ согласно закону Джоуля — Ленца выделяет в активном сопротивлении r цепи, по которой он проходит в течение времени t , тепло $Q = kl^2rt$.

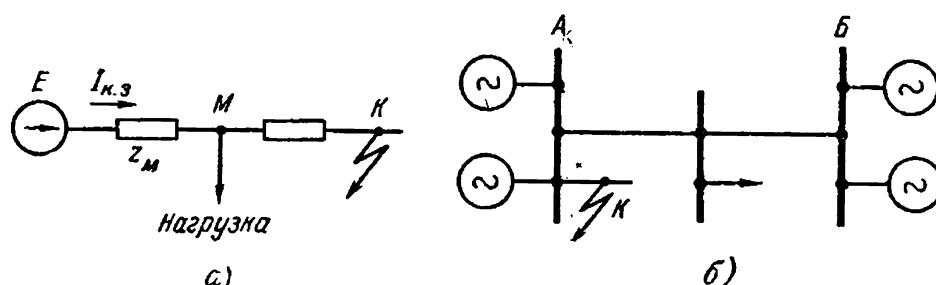


Рис. 1-2. Влияние понижения напряжения при к. з.

а — на работу потребителей; б — на энергосистему.

В месте повреждения это тепло и пламя электрической дуги производят большие разрушения, размеры которого тем больше, чем больше ток $I_{к.з}$ и время t .

Проходя по неповрежденному оборудованию и линиям электропередачи, ток к. з. $I_{к.з}$ нагревает их выше допустимого предела, что может вызвать повреждение изоляции и токоведущих частей.

б) Понижение напряжения при к. з. нарушает работу потребителей.

Основным потребителем электроэнергии являются асинхронные электродвигатели. Момент вращения двигателей пропорционален квадрату напряжения на их зажимах: $M_d = kU^2$.

Поэтому при глубоком снижении напряжения момент вращения электродвигателей может оказаться меньше момента сопротивления механизмов, что приводит к их остановке.

Нормальная работа осветительных установок, составляющих вторую значительную часть потребителей электроэнергии, при снижении напряжения также нарушается.

Особенно чувствительны к понижениям напряжения вычислительные и управляющие электронные машины, широко внедряемые в последнее время.

в) Вторым, наиболее тяжелым последствием снижения напряжения является нарушение устойчивости параллельной работы

генераторов. Это может привести к распаду системы и прекращению питания всех ее потребителей. Причины такого распада можно пояснить на примере системы, приведенной на рис. 1-2, б. В нормальном режиме механический момент вращения турбин уравнивается противодействующим моментом, создаваемым электрической нагрузкой генераторов, в результате чего скорость вращения всех турбогенераторов постоянна и равна синхронной. При возникновении к. з. в точке K у шин электростанции A напряжение на них станет равным нулю, в результате этого электрическая нагрузка, а следовательно, и противодействующий момент генераторов также станут равными нулю. В то же время в турбину поступает прежнее количество пара (или воды) и ее момент остается неизменным. Вследствие этого скорость вращения турбогенератора начнет быстро увеличиваться, так как регулятор скорости турбины действует медленно и не сможет предотвратить ускорения вращения турбогенераторов станции A .

В иных условиях находятся генераторы станции B . Они удалены от точки K , поэтому напряжение на их шинах может быть близким к нормальному. Вследствие того что генераторы электростанции A разгрузились, вся нагрузка системы ляжет на генераторы станции B , которые при этом могут перегрузиться и уменьшить скорость вращения. Таким образом, в результате к. з. скорость вращения генераторов электростанций A и B становится различной, что приводит к нарушению их синхронной работы.

При длительном к. з. может также произойти нарушение устойчивости работы асинхронных электродвигателей. При понижении напряжения скорость вращения асинхронных электродвигателей уменьшается. Если скольжение превзойдет критическое, двигатель перейдет в область неустойчивой работы и произойдет его опрокидывание и полное торможение.

С увеличением скольжения реактивная мощность, потребляемая асинхронными двигателями, растет, что может привести после отключения к. з. к дефициту реактивной мощности и как следствие этого к лавинообразному снижению напряжения во всей системе и прекращению ее работы.

Аварии с нарушением устойчивости системы по величине ущерба, наносимого электроснабжению, являются самыми тяжелыми.

Рассмотренные последствия к. з. подтверждают сделанный выше вывод, что они являются тяжелым и опасным видом повреждения, требующим быстрого отключения (см. § 1-4).

Замыкание на землю одной фазы в сети с изолированной нейтралью. На рис. 1-1, г видно, что замыкание на землю не вызывает короткого замыкания, так как э. д. с. E_C поврежденной фазы C не шунтируется появившимся в точке K соединением с землей. Возникающий при этом ток в месте повреждения замыкается через емкость проводов относительно земли и имеет поэтому, как правило, небольшую величину, например несколько десятков ампер. Линейные

напряжения при этом виде повреждения остаются неизменными (см. гл. 9).

Благодаря этому по своим последствиям однофазное замыкание на землю в сетях с изолированной нейтралью существенно отличается от к. з. Оно не отражается на работе потребителей и не нарушает синхронной работы генераторов. Однако этот вид повреждения создает ненормальный режим, вызывая перенапряжения, что представляет опасность с точки зрения возможности нарушения изоляции относительно земли двух неповрежденных фаз и перехода однофазного замыкания на землю в междуфазное к. з.

1-3. НЕНОРМАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ

К ненормальным относятся режимы, связанные с отклонениями от допустимых значений величин тока, напряжения и частоты, опасные для оборудования или устойчивой работы энергосистемы.

Рассмотрим наиболее характерные ненормальные режимы.

а) **Перегрузка оборудования**, вызванная увеличением тока сверх номинального значения. Номинальным называется максимальный ток, допускаемый для данного оборудования в течение неограниченного времени.

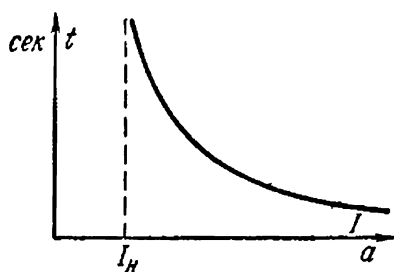


Рис. 1-3. Зависимость допустимой длительности перегрузки от величины тока $t = f(I)$.

I_n — номинальный ток оборудования.

Если ток, проходящий по оборудованию, превышает номинальное значение, то за счет выделяемого им дополнительного тепла температура токоведущих частей и изоляции через некоторое время превосходит допустимую величину, что приводит к ускоренному износу изоляции и ее повреждению. Время, допустимое для прохождения повышенных токов, зависит от их величины. Характер этой зависимости показан на рис. 1-3 и определяется кон-

струкцией оборудования и типом изоляционных материалов. Для предупреждения повреждения оборудования при его перегрузке необходимо принять меры к разгрузке или отключению оборудования.

б) **Снижение частоты**, вызываемое недостатком генераторной мощности, обычно возникает при внезапном отключении части работающих генераторов. При снижении частоты понижается производительность механизмов и нарушается технологический процесс тех агрегатов, для которых имеет значение постоянство скорости вращения электродвигателей.

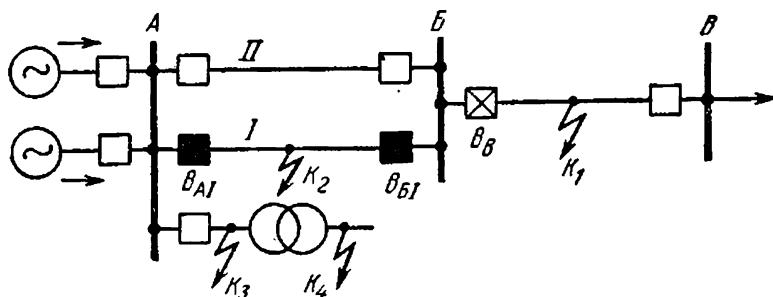
Глубокое снижение частоты (ниже 47—45 гц) ведет к тяжелым авариям с прекращением работы всей энергетической системы. Для предотвращения такой аварии необходимо восстановить баланс генерируемой и потребляемой мощностей путем быстрого (авто-

в) **Повышение напряжения** сверх допустимого значения возникает обычно на гидрогенераторах при внезапном отключении их нагрузки. Разгрузившийся гидрогенератор увеличивает скорость вращения, что вызывает возрастание э. д. с. статора до опасных для его изоляции значений. Защита в таких случаях должна снизить ток возбуждения генератора или отключить его.

Кроме отмеченных ненормальных режимов, имеются и другие, ликвидация которых возможна при помощи релейной защиты.

а) Селективность

На рис. 1-4 показаны примеры селективного отключения повреждений. Так, при к. з. в точке K_1 защита должна отключить по-



врежденную линию выключателем B_B , т. е. выключателем, ближайшим к месту повреждения. При этом все потребители, кроме питавшихся от поврежденной линии, остаются в работе.

Таким образом, требование селективности является основным условием для обеспечения надежного питания потребителей. Несе-

лективное действие защиты приводит к развитию аварий и поэтому является ее существенным недостатком. Как будет показано ниже, неселективные отключения могут допускаться, но только в тех случаях, когда это диктуется необходимостью и не отражается на питании потребителей.

б) Быстрота действия

Отключение к. з. должно производиться с возможно большей быстротой для ограничения размеров разрушения оборудования, повышения эффективности автоматического повторного включения линий и сборных шин, уменьшения продолжительности снижения напряжения у потребителей и сохранения устойчивости параллельной работы генераторов, электростанций и энергосистемы в целом. Последнее из перечисленных условий является главным.

Допустимое время отключения к. з. по условию сохранения устойчивости зависит от ряда факторов. Важнейшим из них является величина остаточного напряжения на шинах электростанций и узловых подстанций энергосистемы. Чем меньше остаточное напряжение, тем хуже условия устойчивости и, следовательно, тем быстрее нужно отключать к. з. *Наиболее тяжелыми по условиям устойчивости являются трехфазные к. з. и двухфазные к. з. на землю в сети с глухозаземленной нейтралью, так как при этих повреждениях происходят наибольшие снижения всех междуфазных напряжений.*

В современных энергосистемах для сохранения устойчивости требуется весьма малое время отключения к. з. Так, например, на электропередачах 300—500 кВ необходимо отключать повреждение за 0,1—0,12 сек после его возникновения, а в сетях 110—220 кВ за 0,15—0,3 сек. В распределительных сетях 6 и 10 кВ к. з., отделенных от источников питания большим сопротивлением, можно отключать со временем примерно 1,5—3 сек, так как они не влияют на устойчивость системы.

Точная оценка допустимого времени отключения производится с помощью специальных расчетов устойчивости, проводимых для этой цели.

В качестве приближенного критерия (меры) необходимости применения быстродействующих защит Правила устройства электроустановок (ПУЭ) [Л. 1] рекомендуют определять остаточное напряжение на шинах электростанций и узловых подстанций, при трехфазных к. з. в интересующей нас точке сети. *Если остаточное напряжение получается меньше 60% номинального, то для сохранения устойчивости следует применять быстрое отключение повреждений, т. е. применять быстродействующую защиту.*

Полное время отключения повреждения $t_{откл}$ складывается из времени работы защиты $t_з$ и времени действия выключателя $t_в$, разрывающего ток к. з., т. е. $t_{откл} = t_з + t_в$. Таким образом, для ускорения отключения нужно ускорять действие как защиты, так

и выключателей. Наиболее распространенные выключатели действуют со временем 0,15—0,06 сек.

Чтобы обеспечить при таких выключателях указанное выше требование об отключении к. з., например, с $t = 0,2$ сек, защита должна действовать с временем 0,05—0,12 сек, а при необходимости отключения с $t = 0,12$ сек и действии выключателя с 0,08 сек время работы защиты не должно превышать 0,04 сек.

Защиты, действующие с временем до 0,1—0,2 сек, считаются быстродействующими. Современные быстродействующие защиты могут работать с временем 0,02—0,04 сек.

Требование быстродействия является в ряде случаев определяющим условием, обеспечивающим устойчивость параллельной работы электростанций и энергосистем.

Создание селективных быстродействующих защит является важной и трудной задачей техники релейной защиты. Эти защиты получаются достаточно сложными и дорогими, поэтому они должны применяться только в тех случаях, когда более простые защиты, работающие с выдержкой времени, не обеспечивают требуемой скорости действия.

В целях упрощения допускается применение простых быстродействующих защит, не обеспечивающих необходимой селективности. При этом для исправления неселективности используется АПВ, быстро включающее обратно неселективно отключившийся элемент.

Требование к времени действия защиты от ненормальных режимов зависит от их последствий. Часто ненормальные режимы носят кратковременный характер и ликвидируются сами, например кратковременная перегрузка при пуске асинхронного электродвигателя. В таких случаях быстрое отключение не только не является необходимым, но может причинить ущерб потребителям. Поэтому отключение оборудования при ненормальном режиме должно производиться только тогда, когда наступает действительная опасность для защищаемого оборудования, т. е. в большинстве случаев с выдержкой времени.

в) Чувствительность

Для того чтобы защита реагировала на отклонения от нормального режима, которые возникают при к. з. (увеличение тока, снижение напряжения и т. п.), она должна обладать определенной чувствительностью в пределах установленной зоны ее действия. Каждая защита (например, I на рис. 1-5) должна отключать повреждения на том участке *АВ*, для защиты которого она установлена (первый участок защиты I), и, кроме того, должна действовать при к. з. на следующем, втором участке *ВВ*, защищаемом защитой II. Действие защиты на втором участке называется дальним резервированием. Оно необходимо для отключения к. з. в том случае, если защита II или выключатель участка *ВВ* не сра-

ботает из-за неисправности. Резервирование следующего участка является важным требованием. Если оно не будет выполняться, то при к. з. на участке *БВ* и отказе его защиты или выключателя повреждение останется неотключенным, что приведет к нарушению работы потребителей всей сети.

Действие защиты *I* при к. з. на третьем участке не требуется, так как при отказе защиты третьего участка или его выключателя должна подействовать защита *II*. Одновременный отказ защиты на двух участках (третьем и втором) маловероятен, и поэтому с таким случаем не считаются.

Некоторые типы защит по принципу своего действия не работают за пределами первого участка. Чувствительность таких защит должна обеспечить их надежную работу в пределах первого участка. Для обеспечения резервирования второго участка в этом случае устанавливается дополнительная защита, называемая резервной.

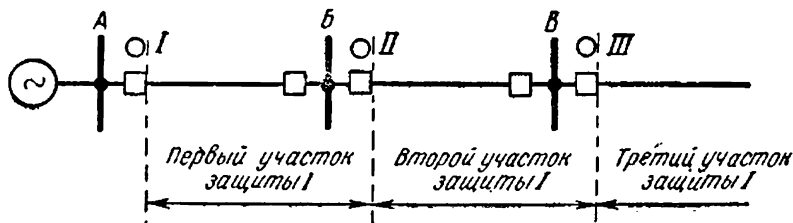


Рис. 1-5. Зоны действия защиты.

Каждая защита должна действовать не только при металлическом к. з., но и при замыканиях через переходное сопротивление, обусловливаемое электрической дугой.

Чувствительность защиты должна быть такой, чтобы она могла подействовать при к. з. в минимальных режимах системы, т. е. в таких режимах, когда изменение величины, на которую реагирует защита (ток, напряжение и т. п.), будет наименьшей. Например, если на станции *А* (рис. 1-2, б) будет отключен один генератор, то ток к. з. уменьшится, но чувствительность защит должна быть достаточной для действия и в этом минимальном режиме.

Таким образом, чувствительность защиты должна быть такой, чтобы она действовала при к. з. в конце установленной для нее зоны в минимальном режиме системы и при замыканиях через электрическую дугу.

Чувствительность защиты принято характеризовать коэффициентом чувствительности $k_{\text{ч}}$. Для защит, реагирующих на ток к. з.,

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{к.з. мин}}}{I_{\text{с.з}}}, \quad (1-1)$$

где $I_{\text{к.з. мин}}$ — минимальный ток к. з.; $I_{\text{с.з}}$ — наименьший ток, при котором защита начинает работать (ток срабатывания защиты).