

УДК 621.311

## **Повышение эффективности работы промышленных систем электроснабжения при использовании токоограничивающих устройств**

**А.Е. Веселов, В.В. Ярошевич, Г.П. Фастий**

*Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, лаборатория надежности и эффективности оборудования энергосистем; кафедра электроэнергетики Апатитского филиала МГТУ*

**Аннотация.** Проведен анализ разработок в области повышения эффективности функционирования схем электроснабжения промышленных предприятий с точки зрения улучшения качества напряжения при глубоком ограничении токов короткого замыкания с помощью токоограничивающих устройств и коммутационной аппаратуры на базе силовой полупроводниковой техники. Предложены и всесторонне проанализированы новые схемы распределительных электрических сетей 6, 10 и 0,4 кВ с параллельной работой секций сборных шин. Показано, что реализация разработанных схем приводит к существенному улучшению качества электроэнергии и ограничению токов КЗ в промышленных электрических сетях.

**Abstract.** The analysis of developments in the field of increasing efficiency of functioning enterprise electric power supply circuits has been held. The attention has been paid to improving quality of voltage at deep limiting short-circuit currents with current-limiting devices and switching devices based on power semiconductor technology. The new schemes of electricity distribution networks 6, 10 and 0,4 kV with parallel operation of sections of busbars have been proposed and thoroughly analyzed. It has been shown that implementation of the developed schemes leads to substantial improvement in power quality and limit short circuit currents in industrial power networks.

**Ключевые слова:** система электроснабжения (СЭС), автоматическое включение резерва (АВР), токоограничивающие устройства (ТОУ), показатели качества электроэнергии (ПКЭ)

**Key words:** power-supply system, automatic load transfer, current-limiting equipment, quality metrics of electric power

### **1. Введение**

Опыт эксплуатации типовых систем электроснабжения (СЭ) промышленных предприятий, особенно с преобладанием двигательной нагрузки, например, на металлургических, горно-обогатительных комбинатах, свидетельствует о недостаточной устойчивости нагрузки в аварийных и послеаварийных режимах. Использование схемных решений при проектировании СЭ, связанных со стремлением ограничить токи короткого замыкания (КЗ) до уровня безопасной работы коммутационной аппаратуры, таких, как раздельная работа секций сборных шин, применение одиночных и групповых реакторов в цепях питания и на отходящих фидерах, приводит к недопустимо большим посадкам напряжения при нормальных пусках электродвигателей, невозможности осуществления режимов самозапуска и автоматического включения резерва (АВР).

Дробление СЭ на многочисленные секции не позволяет рационально организовать питание потребителей для предотвращения полного расстройтва технологического цикла при аварии на одной из секций сборных шин.

Эффективным является использование различного рода токоограничивающих устройств (ТОУ), позволяющих кардинально улучшить характеристики СЭ в нормальных и аварийных режимах. Прогресс в исследовании и разработке ТОУ позволяет предположить, что будут пересмотрены некоторые концепции радиального построения сетей в сторону объединения на параллельную работу через ТОУ секций сборных шин одного напряжения понижающих трансформаторов на промышленных предприятиях.

### **2. Координация показателей качества электрической энергии и уровней токов короткого замыкания в промышленных электрических сетях**

В системах электроснабжения (СЭ) промышленных предприятий обычно выделяют схемы внешнего и внутреннего электроснабжения. На рис. 1 приведены наиболее характерные схемы внешнего электроснабжения, в которых, в зависимости от мощности предприятия, его удаленности от источника питания и характера нагрузки подвод мощности осуществляется по линиям с напряжением от 6 до 330 кВ.

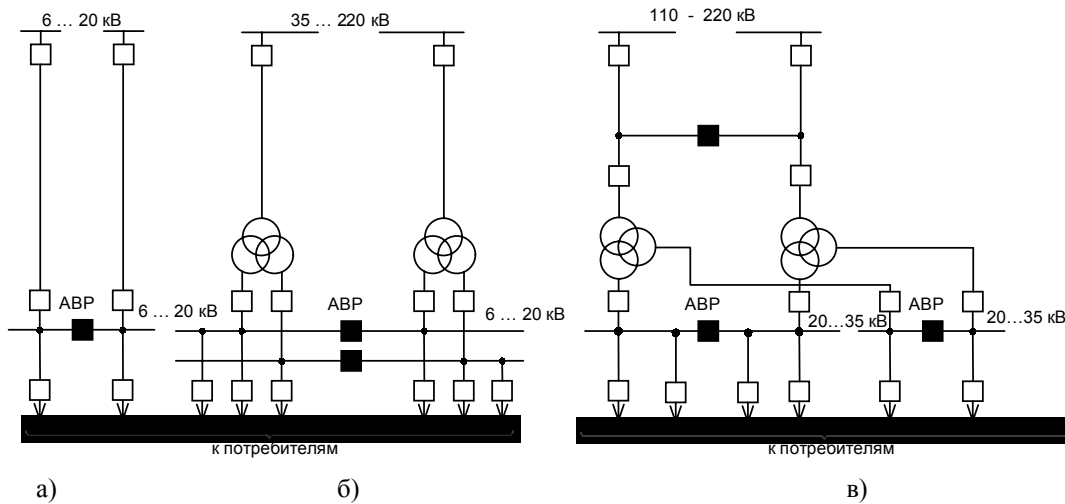


Рис. 1. Характерные схемы электроснабжения промышленных предприятий

В схеме рис. 1а распределение электроэнергии осуществляется без промежуточной трансформации на напряжении 6, 10 и 20 кВ, что характерно для небольших предприятий, расположенных вблизи источников питания. Схема по рис. 1б широко применяется для средних и крупных промышленных предприятий. Трансформаторы на главных понизительных подстанциях (ГПП) в таких схемах могут выполняться двухобмоточными или с расщепленными обмотками низкого напряжения (НН), работающими раздельно или параллельно. Обычно применяется автоматическое резервирование (АВР) секций сборных шин; между секциями или на отходящих линиях, в зависимости от мощности и наличия двигательной нагрузки, могут устанавливаться токоограничивающие реакторы. Для крупных предприятий также используется схема, приведенная на рис. 1в. Мощности трансформаторов ГПП изменяются в широких пределах, достигая 80 МВ·А. Понизительные трансформаторы, начиная с мощности 25 МВ·А, выполняются с двумя расщепленными обмотками НН.

Мощность КЗ на шинах высокого напряжения (ВН) трансформаторов  $S_{кз}^{BH} = \sqrt{3} \cdot U_{ном}^{BH} \cdot I_{кз}^{BH}$  обычно настолько велика, что нелинейные искажения и колебания нагрузки отдельных трансформаторов, за редким исключением, не создают недопустимых возмущений в сети ВН. Мощность КЗ на шинах НН трансформаторов при неучете подпитки тока от двигательной нагрузки составляет

$$S_{кз}^{HH} = \sqrt{3} \cdot U_{ном}^{HH} \cdot I_{кз}^{HH} = (U_{ном}^{HH})^2 / (x_c + x_m) = 1 / (1/S_{кз}^{BH} + U_k / S_{т ном}), \quad (1)$$

где  $U_{ном}^{HH}$  – номинальное напряжение на шинах НН,  $U_k$  – напряжение КЗ трансформатора в о.е. (обычно  $U_k = 0,105$ ),  $x_c = U_{ном}^2 / S_{кз}^{BH}$  и  $x_m = (U_{ном}^2 \cdot U_k) / S_{т ном}$  – реактивные сопротивления системы и трансформатора, приведенные к стороне НН. Приблизительно мощность  $S_{кз}^{HH}$  равна  $9 \cdot S_{т ном}$ , а с учетом подпитки 50%-ной двигательной нагрузки может быть в 1,5 раза больше.

Массовое применение в сетях 6-10 кВ находят ячейки комплектных распределительных устройств (КРУ) с маломасляными и вакуумными выключателями отходящих линий, рассчитанные на мощность КЗ 350 МВ·А в сетях 10 кВ и 200 МВ·А в сетях 6 кВ (предельные токи отключения 20 кА). В последние годы начинают получать распространение выключатели с током отключения 31,5 кА, что позволяет использовать их в сетях с мощностью КЗ соответственно 550 и 330 МВ·А. На вводах к секциям сборных шин и, в редких случаях, на отходящих линиях применяются многоамперные выключатели с  $S_{кз} = 750$  и 1000 МВ·А.

В случае несоответствия реальной мощности  $S_{кз}^{HH}$  и предельной отключающей способности выключателя устанавливают более мощные и дорогие выключатели или применяют меры токоограничения: раздельную работу расщепленных обмоток трансформатора и установку на вводах секций сборных шин одинарных или двояных токоограничивающих реакторов (Ермилов, 1983).

Внутреннее электроснабжение осуществляется по радиальным, магистральным или смешанным схемам на напряжении 6-10 кВ. Вид схемы зависит от количества цеховых подстанций 6-10/0,4 кВ, их мощности и мест расположения. Подстанции выполняются однострановыми или двухтрансформаторными и мощность трансформатора на них доходит до 2500 кВ·А.

Распределение электроэнергии в цехах на напряжении 0,4 кВ осуществляется кабельными линиями или магистральными и распределительными шинопроводами.

Нагрузки электроприемников в соответствии с их влиянием на СЭ, можно условно разделить на симметричные с ровным графиком, несимметричные, нелинейные, резкопеременные.

К симметричным со спокойным графиком нагрузки следует отнести, в основном, силовые общепромышленные установки с асинхронными и синхронными двигателями. Мощность таких двигателей изменяется от долей до десятков мегаватт. Осветительная нагрузка, хотя и относится к однофазной, но благодаря незначительной мощности одного светильника при правильной группировке приборов в трехфазной сети удается достичь практически равномерной нагрузки по фазам.

Электроприемниками с несимметричной нагрузкой являются электросварочные установки переменного тока, электровозы внутрикарьерного и внутрицехового транспорта на переменном токе, мощные однофазные нагрузки электродных печей, печей электрошлакового переплава и индукционного нагрева. Широко распространенные трехфазные дуговые электропечи также вызывают несимметрию нагрузок из-за неустойчивого горения дуги в каждой из трех фаз.

Нелинейную нагрузку составляют всевозможные управляемые и неуправляемые полупроводниковые преобразователи, мощность которых особенно велика в цехах металлургических заводов и предприятий цветной металлургии и химической промышленности.

К резкопеременной нагрузке относятся дуговые электропечи, сварочные установки, крановая нагрузка, управляемые вентильные преобразователи прокатных станов, шахтных подъемников и т.п.

Все возрастающая мощность потребителей с нелинейной, несимметричной и резкопеременной нагрузкой создает проблемы, связанные с ухудшением качества электрической энергии. Остановимся на методах оценки показателей качества электроэнергии (ПКЭ) в СЭ с подобными потребителями.

Согласно ГОСТ 13109-97 "Электрическая энергия. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения", при оценке качества напряжения вводятся следующие показатели: отклонение напряжения  $\delta U$ , размах изменения напряжения  $\delta U_t$  (доза колебаний), коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения  $K_U$ , коэффициент гармонической составляющей напряжения  $K_{U(n)}$ , коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности  $K_{2U}$ , коэффициент несимметрии напряжения по нулевой последовательности  $K_{0U}$ .

Допустимые значения ПКЭ нормируются в процентах в зависимости от длительности существования того или иного возмущения в течение суток.

Отклонения напряжения  $\delta U$  на входе электроприемников (ЭП) в течение 95 % времени измерения (сутки) не должны выходить за пределы  $\pm 5\%$  и не превышать  $\pm 10\%$ . Отклонения напряжения зависят от технических возможностей и законов регулирования централизованных и местных средств регулирования напряжения, а также от суточных диапазонов изменения нагрузки электроприемников. В целом отклонения напряжения на шинах тем меньше, чем меньше результирующее сопротивление цепей питания (больше мощность  $S_{кз}$ ).

Размах изменения напряжения  $\delta U_t$  в процентах определяется по формуле:

$$\delta U_t = (|U_1 - U_2| / U_{ном}) \cdot 100,$$

где  $U_1$  и  $U_2$  – значения следующих друг за другом экстремумов или экстремума и горизонтального участка огибающей действующего значения напряжения.

Учитывать следует только размахи, происходящие с интервалом не более 1 минуты (для периодических изменений – с частотой 1 раз в минуту и более). Для близких к периодическим изменениям напряжения норма на  $\delta U_t$  установлена в зависимости от частоты изменения напряжения

$$f = m/T,$$

где  $m$  – число изменений за время  $T$ .

Доза колебаний измеряется специальными приборами, называемыми фликерметрами. Ее рекомендуется определять в сетях со случайными резкопеременными графиками нагрузок (дуговые сталеплавильные печи, сварочная нагрузка) при питании от этих сетей осветительной нагрузки. Доза колебаний характеризует энергетическое содержание в спектре напряжения составляющих субгармоник, оказывающее отрицательное влияние на зрение человека.

В электрических сетях с промышленными электропотребителями (без осветительной нагрузки) доза фликера не нормируется, а максимальные значения размахов  $\delta U_t$  не должны превышать 5 %.

Величина размахов изменения напряжения зависит от мощности питающей сети и величины размахов реактивной и активной мощностей нагрузки  $\Delta Q$  и  $\Delta P$ . Она может быть рассчитана в процентах по формуле (1)

$$\delta U_t = (\Delta P \cdot r / x + \Delta Q) \cdot 100 / (S_{кз} \cdot z / x),$$

где  $r$ ,  $x$ ,  $z$  и  $S_{кз}$  – сопротивления цепи питания и мощность КЗ в точке сети, в которой определяется колебание напряжения.

Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения в процентах (коэффициент несинусоидальности) определяется по формуле

$$K_U = \frac{100}{U_{ном}} \times \sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_n^2},$$

где  $U_n$  – действующее значение напряжения  $n$ -ой гармоники;  $n$  – порядковый номер гармоник.

Напряжение  $n$ -ой гармоники ( $U_n$ ) в расчетной точке питающей сети может быть оценено по величине тока ( $I_n$ )  $n$ -ой гармоники  $U_n = I_n \cdot n \cdot U_{ном} / S_{кз}$ .

В (Иванов, Соколов, 1987) можно найти выражения для определения данного коэффициента применительно к различным видам нелинейной нагрузки.

Значение коэффициента  $K_U$  нормируется следующим образом: на входе ЭП – 5 % при 95 % времени измерений, но не более 10 %; в точках электрических сетей напряжением до 1 кВ – 5 %, 6-20 кВ – 4 %, 35 кВ – 3 %, 110 кВ и выше – 2 % при времени измерения 95 % и, соответственно, не более 10, 8, 6 и 4 %.

В стандарт на качество электрической энергии вводится показатель – коэффициент  $n$ -ой гармонической составляющей напряжения  $K_{U(n)}$  в процентах, определяющийся по формуле

$$K_{U(n)} = (U_n / U_{ном}) \cdot 100.$$

Его допустимое значение для гармоник нечетного порядка на входе ЭП и в точках электрических сетей напряжением до 1 кВ – 6 %, в сетях 6...20 кВ – 5 %, 35 кВ – 4 %, 110 кВ и выше – 2 %. Для гармоник четного порядка допустимые значения соответственно составляют 3; 2,5; 2 и 1,0 %.

Коэффициенты напряжения обратной последовательности  $K_{2U}$  и нулевой последовательности  $K_{0U}$  не должны превышать на входе ЭП и в точках электрических сетей 2 % в течение 95 % времени и не превышать 4 %. Формулы для их определения можно найти, например, в (Иванов, Соколов, 1987).

Расчетные выражения для всех ПКЭ свидетельствуют об их обратной пропорциональности величине мощности КЗ в точке сети, где определяются эти показатели. Действительно, проблема обеспечения нормативных значений ПКЭ наиболее остро стоит в сетях 6-10 кВ с относительно малыми уровнями токов КЗ.

В практике проектирования СЭ часто используются упрощенные критерии оценки допустимости подключения к сети нагрузки, потребляющей аномальные (резкопеременные, несинусоидальные и несимметричные) токи по отношению мощности этой нагрузки  $S_{ан}$  к мощности  $S_{кз}$ :

$$S_{ан} / S_{кз} \leq 0,01. \quad (2)$$

Выразив  $S_{кз}$  через номинальную мощность понижающих трансформаторов  $S_{т ном}$  и его напряжение КЗ  $U_k = 0,11$  о.е. ( $S_{кз} = S_{т ном} / U_k$ ), запишем (2) в виде

$$S_{ан} / S_{т ном} \leq 0,09, \quad (3)$$

то есть мощность аномальной нагрузки не должна превышать 9 % мощности трансформатора. В случае если нагрузка состоит из вентильных преобразователей ( $S_{пр}$ ), то критерий (3) принимается еще более жестким  $S_{пр} / S_{т ном} \leq 0,045$ .

Итак, для улучшения ПКЭ следует уменьшать сопротивления цепей питания и увеличивать мощность  $S_{кз}$ , а для ограничения токов КЗ необходимы противоположные действия. Противоречивость указанных требований вызывает большие затруднения при обеспечении нормального функционирования СЭ при приемлемых ПКЭ. Рассмотрим основные применяемые способы преодоления существующих противоречий.

На практике наибольшее распространение получило решение, связанное с выделением аномальной нагрузки на отдельный трансформатор (на отдельную расщепленную обмотку трансформатора), с тем, чтобы "плохие" ПКЭ на шинах нагрузки не влияли на прочие ЭП предприятия (города). Вынос аномальных составляющих в сеть ВН предполагает достаточную мощность  $S_{кз}$ . На ряде предприятий внедрена схема с питанием резкопеременной и спокойной нагрузки от разных плеч сдвоенного реактора (Иванов, Соколов, 1987). Разделение нагрузок, как правило, удорожает СЭ из-за недоиспользования мощности трансформаторов, вызывает определенные неудобства в эксплуатации.

Решение проблемы ПКЭ путем увеличения  $S_{кз}$  за счет специального завышения мощности понижающих трансформаторов или отказа от реактирования цепей питания в тех случаях, когда это было признано допустимым при согласовании токов КЗ с отключающей способностью выключателей, на практике почти не применяется.

Тем не менее, в связи с ростом единичной мощности ЭП, искажающих токи, а также и при большой концентрации аномальной нагрузки приходится включать трансформаторы параллельно или использовать трансформаторы с номинальной мощностью 63 МВ·А и более с соединенными параллельно

расщепленными обмотками, когда уровни токов КЗ превышают 40 кА. Ориентируясь на эти случаи, перед электропромышленностью поставлена задача разработки комплектных распределительных устройств 6-10 кВ с малогабаритными выключателями (маломасляными или вакуумными), способных отключать токи КЗ с величиной 50 кА (мощность КЗ при напряжении 6 и 10 кВ соответственно равна 520 и 870 МВ·А).

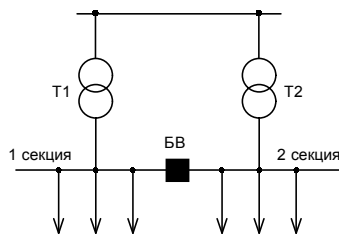


Рис. 2. Параллельная работа секций через быстродействующий выключатель

Стремление решить противоречия между ПКЭ и токами КЗ заявлено в идее параллельной работы двух источников питания (секций сборных шин) через быстродействующий, желателен токоограничивающий выключатель БВ, который при возникновении аварии в одной из сетей отключается без выдержки времени с тем, чтобы коммутационная аппаратура отключала вдвое меньшие токи КЗ (рис. 2).

Здесь в нормальном режиме потребители имеют вдвое меньшее сопротивление цепей питания и как бы вдвое большую мощность  $S_{кз\ норм\ реж.}$ . В качестве выключателя БВ могут быть использованы современные вакуумные выключатели, которые благодаря небольшой инерционности контактной системы, при условии оснащения их индукционно-динамическими электроприводами, способны надежно обесточивать цепь после пропуска одной полуволны тока КЗ. Разрабатываются синхронные выключатели, в которых контакты начинают расходиться в момент прохода тока КЗ через нуль – это обеспечивает быстрое и надежное отключение цепи.

Однако в СЭ по рис. 2 с опережающим делением сети уровни ударных токов КЗ, существующих в течение одного полупериода, практически удваиваются. Наиболее чувствительным элементом к ударным токам, особенно в сетях 0,4 кВ, является выключатели. Заводы-изготовители связывают допустимые значения ударного тока выключателя  $i_{ув}$  с допустимым током отключения  $I_{отк\ в}$  формулой

$$i_{ув} = 2,55 \cdot I_{отк\ в}$$

ориентируясь на то, что в сетях ударный коэффициент тока КЗ равен  $k_v = 1,8$  и  $i_v = \sqrt{2} k_v I_{кз} = 2,55 \cdot I_{кз}$ . В результате практически реализовать схему рис. 2 можно только при наличии запаса по отключающей способности выключателя в распределительной сети.

Имеются исследования, свидетельствующие о том, что реально для большинства выключателей  $i_{ув} > 2,55 \cdot I_{отк\ в}$ . Кроме того, возможны специальные изменения их конструкции для повышения  $i_{ув}$ . Следует ожидать, что в ближайшие годы заводы-изготовители электротехнического оборудования проведут корректировки параметра  $i_{ув}$ , а также уточнят реальную динамическую стойкость ошинок КРУ и других элементов, входящих в контуры КЗ. Это позволит расширить число мероприятий по поддержанию ПКЭ на требуемом уровне, уточнить методику выбора параметров элементов СЭ с токоограничивающими бесконтактными коммутационными аппаратами и новыми схемными решениями.

Остановимся также на особенностях применения для обеспечения ПКЭ специальных устройств, предназначенных для компенсации аномальных составляющих токов нагрузки (КУан).

Разработаны и начинают внедряться КУан, устанавливаемые в узлах с нагрузкой, потребляющей аномальные токи (рис. 3).

Они замыкают на себя полностью или частично аномальные составляющие токов нагрузки с тем, чтобы эти токи не создавали падения напряжения на сопротивлении цепи питания и не вызывали соответствующих аномальных составляющих в напряжении узла.

В литературе (Ермилов, 1983; Иванов, Соколов, 1987) имеются описания разработанных типов КУ, предназначенных для компенсации резкопеременных составляющих реактивных токов нагрузки (управляемые статические источники реактивной мощности ИРМ, быстродействующие синхронные компенсаторы), токов высших гармоник (фильтрокомпенсирующие устройства ФКУ, содержащие резонансные LC-звенья), токов обратной последовательности (симметрирующие устройства, выполненные с использованием емкостных и индуктивных элементов).

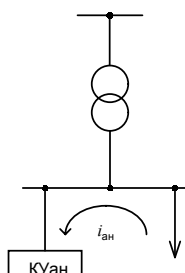


Рис. 3. Принципиальная схема СЭ с компенсацией аномальных токов нагрузки

Затраты на КУ примерно пропорциональны степени превышения ПКЭ нормативных значений. Они непосредственно связаны с мощностью  $S_{кз}$  в сети (токами КЗ). Поэтому в каждом конкретном случае несоответствия ПКЭ требуется технико-экономическое сравнение двух возможных путей решения вопроса: увеличивать  $S_{кз}$  и токи КЗ или устанавливать КУ. Вопрос этот крайне сложен в связи с незавершенностью к настоящему времени разработок КУ различного функционального назначения,

большой стоимостью первых внедряемых образцов КУ, имеющих неопределенностей по показателям надежности их работы.

Здесь важным представляется отметить то обстоятельство, что практически все перечисленные выше типы КУ, разработанные для улучшения ПКЭ, не увеличивают уровни токов КЗ в сети. Они по принципу действия решают важную задачу отфильтровывания аномальных токов нагрузки, не выпуская их в систему, защищая систему от засорения несвойственными ей составляющими токов и напряжений. Поэтому не во всех случаях оправданным является отказ от их установки. Необходимо разумное сочетание мероприятий как в части компенсации, так и по управлению уровнями токов КЗ.

Следует отметить актуальность исследований и разработок, направленных на поиск новых технических решений по оптимальной координации в СЭ токов КЗ и качества электроэнергии. Можно выделить два основных направления совершенствования СЭ (Кучумов, 1977):

– внедрение в распределительных сетях переменного тока электрооборудования нового типа, в частности, токоограничивающих устройств (ТОУ), коммутационной аппаратуры и токоограничителей на базе силовой полупроводниковой техники;

– разработка новых схемных решений, позволяющих с минимальными затратами обеспечить глубокое ограничение токов КЗ при сохранении в нормальном режиме высокого качества электроэнергии.

### 3. Новые схемные решения по построению систем электроснабжения с высоким качеством напряжения

#### 3.1. Параллельная работа трансформаторов или секций сборных шин на напряжении 6-10 кВ

Параллельная работа секций сборных шин 6-10 кВ на главных понизительных подстанциях через шиносоединительные токоограничивающие устройства является одним из главных приемов совершенствования режимов и технико-экономических характеристик систем электроснабжения в нормальном режиме при сохранении на приемлемом уровне токов КЗ.

Параллельная работа секций сборных шин приводит к снижению в нормальном режиме сопротивления цепей питания и, следовательно, уменьшаются отклонения и колебания напряжения, уровни напряжения высших гармоник и обратной последовательности. Появляется возможность значительного снижения мощности устройств, предназначенных для улучшения качества электроэнергии при наличии резкопеременной, нелинейной и несимметричной нагрузок. Улучшаются условия пуска и самозапуска электродвигателей, что повышает надежность электроснабжения. Равномерная загрузка трансформаторов снижает в них активные потери. Благодаря известному эффекту статистического выравнивания графика суммарной нагрузки снижается отношение максимальной нагрузки трансформаторов к их средней (эффективной) нагрузке. Сохраняется бесперебойное электроснабжение при потере питания или кратковременном понижении напряжения на вводе к отдельной секции.

Реализация указанных преимуществ связана с затратами на ТОУ, поэтому в каждом конкретном случае необходимо технико-экономическое обоснование такого мероприятия. Причем в случаях, когда за счет применения ТОУ достигается более высокий уровень ограничения токов КЗ, следует учитывать возможность снижения затрат на коммутационную аппаратуру.

На ГПП могут быть установлены один или два трансформатора, причем в последнем случае они для повышения надежности электроснабжения обычно подключаются к шинам ВН, получающим питание от различных частей энергосистемы. Допустимость параллельной работы секций сборных шин различных трансформаторов должна рассматриваться и согласовываться с энергосистемой в каждом конкретном случае, поскольку при этом могут возникнуть нежелательные уравнивающие токи через трансформаторы, нарушения функционирования устройств релейной защиты и автоматики. При параллельной работе двух секций сборных шин, подключенных к обмоткам отдельного трансформатора непосредственно или через двоярный реактор, таких проблем не возникает.

На рис. 4 приведена схема понизительной двухтрансформаторной подстанции с четырьмя секциями сборных шин и двумя ТОУ, установленными для соединения на параллельную работу расщепленных обмоток отдельных трансформаторов. Показаны связи между секциями шин различных трансформаторов с нормально разомкнутыми выключателями, которые включаются при потере питания одного из трансформаторов. Подключение ТОУ непосредственно на шины обмоток низкого напряжения трансформатора до вводных выключателей секций

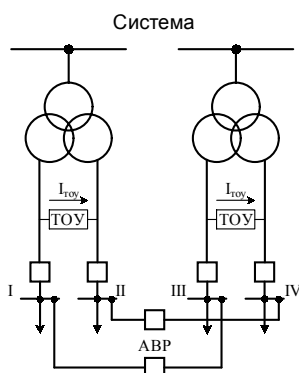


Рис. 4. Двух-трансформаторная подстанция с параллельной работой через ТОУ расщепленных обмоток трансформатора

обеспечивает нормальное функционирование схемы после отключения одной из секций сборных шин.

Требуемая проходная мощность ТООУ может быть оценена по максимально возможному току, протекающему через цепь с ТООУ при небалансе нагрузок секций. При одинаковых нагрузках  $I_{ТООУ} = 0$ . При отличающихся нагрузках переток равен  $I_{ТООУ} = 0,5 \cdot (I_1 - I_2)$ , и он максимален при наибольшей возможной нагрузке одной секции и нулевой на другой:  $I_{ТООУ \text{ расч}} = 0,5 \cdot I_{\text{секц max}}$ .

Считая в послеаварийном режиме при отказе одного из трансформаторов и срабатывании АВР возможной достаточно длительную 40%-ную перегрузку трансформатора ( $I_m = 1,4 \cdot I_{\text{ном}}$ ) можно принять  $I_{\text{секц max}} = 0,7 \cdot I_{\text{м ном}}$  и  $S_{ТООУ \text{ ном}} = 0,35 \cdot S_{\text{м ном}}$ . Без учета перегрузки ТООУ в послеаварийном режиме достаточно иметь  $S_{ТООУ \text{ ном}} = 0,25 \cdot S_{\text{м ном}}$ .

В схеме рис. 4 уровни токов КЗ зависят от токоограничивающих характеристик ТООУ. Если применяются ТООУ, обеспечивающие быстрый разрыв цепи после возникновения аварии, например, тиристорный выключатель с блоком искусственной коммутации (ТВ с ИК), реакторно-тиристорные устройства (РТУ), то токи, отключаемые выключателями аварийной секции, соответствуют раздельной работе секций. Ударные значения токов КЗ могут превышать их значения при раздельной работе. Это зависит от того, как суммируются токи, текущие от трансформатора, двигательной нагрузки (если она имеется) и ТООУ. При применении в качестве ТООУ ТВ с искусственной коммутацией или жидкометаллических предохранителей-токоограничителей (ЖМТ) токоограничение и разрыв цепи обычно оканчивается к моменту формирования ударного тока секции ( $\Delta t = 0,01 \text{ с}$ ) – нет увеличения ударного тока. ТООУ типа РТУ, хотя и имеют несколько затянутый процесс токоограничения, также не более чем на 10 % увеличивают ударное значение аварийного тока секции.

Итак, коммутирующая аппаратура в схеме СЭ по рис. 4 может быть рассчитана на аварийные токи КЗ при раздельной работе секций. Не требуется также пересмотр традиционных решений в области релейной защиты и автоматики СЭ. При необходимости еще более глубокого ограничения тока КЗ с сохранением того же качества напряжения в нормальном режиме можно применить предложенные в (Кучумов, Утегулов, 1976) схемы СЭ, содержащие в цепях связи обмоток трансформаторов и секций сборных шин двоянные реакторы (СР) или двухобмоточные реактор-трансформаторы с большим коэффициентом электромагнитной связи между обмотками (рис. 5 а,б,в).

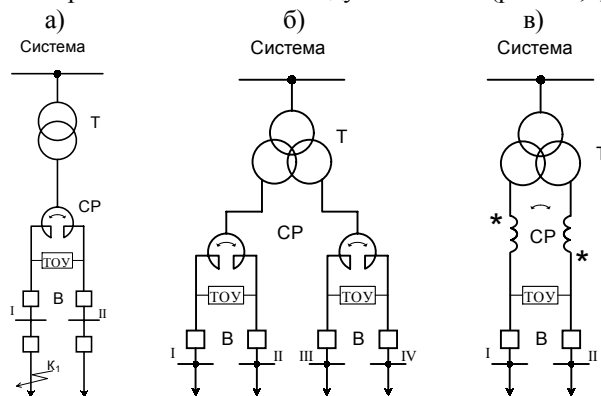


Рис. 5. Системы электроснабжения со специальными реакторами в цепи питания и ТООУ

Соединение через ТООУ плечей СР делает токи в них одинаковыми, что позволяет сопротивление цепи питания в нормальном режиме, например, для схемы рис. 5а, записать

$$X_{\text{нр}} = X_c + X_m + 0,5 \cdot (1 - k_{\text{св}}) \cdot X_{\text{ср}},$$

где  $X_c$ ,  $X_m$ ,  $X_{\text{ср}}$  – индуктивное сопротивление соответственно системы питания (обычно  $X_c \ll X_m$ ), трансформатора и одного плеча СР. Благодаря встречной намотке витков в СР при реально достижимых коэффициентах электромагнитной связи  $k_{\text{св}} = 0,95$  вносимое СР в цепь сопротивление становится весьма малым – на реакторе не будет падения напряжения, отсутствуют потери реактивной мощности.

При КЗ разрыв цепи с ТООУ увеличивает сопротивление цепи питания  $X_{\text{кз}}$  до значения  $X_{\text{ав}} = X_c + X_m + X_{\text{ср}}$ , что при реальных значениях  $X_{\text{ср}} = (1,0 \dots 1,5) \cdot X_m$  позволяет более чем в два раза уменьшить токи КЗ.

В случае применения трансформатора с расщепленными обмотками схему рис. 5б целесообразно заменить на схему рис. 5в, в которой вместо СР включается двухобмоточный трансформатор с идентичными и встречно включенными обмотками (реактор-трансформатор РТ). В нормальном режиме здесь также нет дополнительного реактирования цепи питания при тесной электромагнитной связи обмотки РТ, а в режиме КЗ имеем сопротивление  $X_{\text{РТ ав}} = X_c + 1,875 \cdot X_m + X_{\text{РТ}}$ , которое заметно превышает сопротивление  $X_{\text{СР ав}}$  при равенстве  $X_{\text{ср}} = X_{\text{РТ}}$ . Увеличение сопротивления  $X_m$  в 1,875 раза принято в соответствии с расчетами для реального коэффициента расщепления обмоток выпускаемых трансформаторов  $k_p = 3,5$ .

В случае применения схем СЭ с СР и РТ (рис. 5) в аварийных режимах КЗ при разрыве цепи с ТОУ возникают перенапряжения на неаварийных секциях. Они максимальны при отсутствии нагрузки на неаварийной секции и тем выше, чем больше величины  $X_{cp}$  и  $X_{PT}$ , а также  $k_{ce}$ . Выполненные исследования (Кучумов, Утегулов, 1976) показали, что при сопротивлении  $X_{cp}$  и  $X_{PT}$ , меньших 15 % и  $k_{ce} < 0,9$  кратковременные перенапряжения в течение режима КЗ ( $\Delta t = 0,1 - 0,3$  с) не превышают  $1,35 U_{ном}$ , что можно считать допустимым.

Параллельная работа через ТОУ секций сборных шин 6-10 кВ двух и более трансформаторов, выводы которых подключены к одной точке энергосистемы, не вызывает принципиальных затруднений. Возможные варианты включения ТОУ на двухтрансформаторной подстанции показаны на рис. 6. В схеме рис. 6б для соединения четырех секций применены три ТОУ (четыре ТОУ при кольцевой схеме соединения секций). При числе соединяемых параллельно секций больше двух целесообразно применение ТОУ с тиристорными ключами или быстродействующими выключателями на присоединениях к секциям и общим для всех присоединений токоограничивающим элементом, например, групповые реакторно-тиристорные ТОУ. Условно такое соединение показано на рис. 6в.

Параллельная работа через ТОУ на напряжении 6-10 кВ двух и более однотипных трансформаторов, питающихся от разных точек энергосистемы, затруднена, как уже указывалось выше, опасностью появления уравнильных токов при неравенстве модулей и фаз векторов напряжения на стороне ВН. Применительно к расчетной схеме рис. 7 ток  $I_{yp}$  может быть выражен ( $Z_{TOY} = 0$ ):

$$I_{yp} \approx |\Delta \dot{U}_{12}| / (X_{T1} + X_{T2}), \text{ где } |\Delta \dot{U}_{12}| = \sqrt{\Delta U^2 + (U_1 \cdot \text{tg} \delta_U)^2}.$$

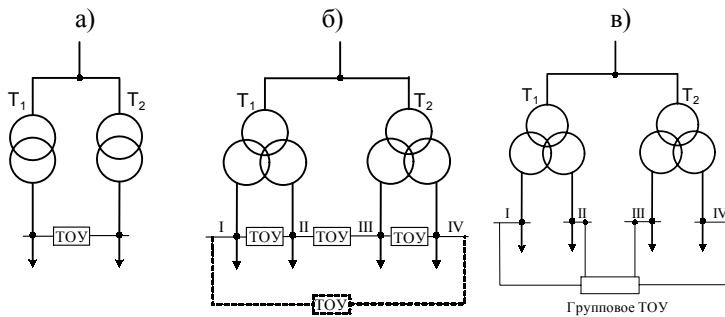


Рис. 6. Схемы включения токоограничивающих устройств на двухтрансформаторных подстанциях

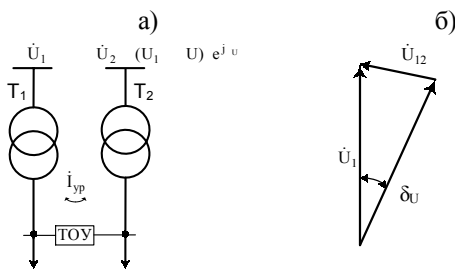


Рис. 7. Расчетная схема для определения уравнильных токов (а) и векторная диаграмма напряжений (б)

При  $X_{T1} = X_{T2} = 0,1$  о.е.,  $U_1 = 1,0$  и  $\delta_U = 0$  имеем  $I_{yp} = 5\Delta U$ , т.е. при  $\Delta U = 2\%$  уравнильный ток равен 10 % номинального тока трансформатора. При  $\Delta U = 0$  и  $\delta_U \neq 0$   $I_{yp} \approx 5 \cdot \text{tg} \delta_U \approx 5 \cdot \delta_U$  (рад), т.е. уже при  $\delta_U = 0,02$  рад ( $1,15^\circ$ ) имеем  $I_{yp} = 0,1 I_{ном}$ .

Составляющие уравнильных токов, обусловленные неравенством модулей напряжений, можно частично устранить путем переключения отпаяк одного из трансформаторов, оборудованных устройством РПН. Для компенсации углового сдвига требуются трансформаторы с продольно-поперечным регулированием напряжения, что вряд ли будет применяться в СЭ. Указанные соображения должны учитываться при принятии решения об установке шиносоединительных ТОУ на двухтрансформаторных подстанциях.

### 3.2. Параллельная работа трансформаторов через замкнутые сети 0,38 кВ

На номинальном напряжении 0,38 кВ распределяется около 80 % мощности, потребляемой в промышленности и в быту. В то же время нельзя признать, что применяемые схемы распределения энергии на этом напряжении совершенны и не могут быть улучшены с целью снижения затрат на их сооружение, потерь активной мощности и повышения качества электроэнергии.

В настоящее время повсеместно практикуется раздельная работа трансформаторов 6-10/0,4 кВ в нормальных режимах. Причиной этого является стремление ограничить уровни токов КЗ, упростить выполнение защиты сети при КЗ, применить более дешевые автоматы. Однако раздельная работа трансформаторов приводит к таким негативным последствиям, как их неравномерная и низкая нагрузка, неудовлетворительное в ряде случаев качество напряжения из-за маломощности сети 0,38 кВ.



Требование неполной загрузки трансформаторов 6-10/0,4 кВ заложено в нормах проектирования. Согласно (*Инструкция...*, 1976) при значительном количестве потребителей I категории подстанции выполняются преимущественно двухтрансформаторными с АВР на шинах 0,4 кВ из расчета загрузки трансформаторов в нормальном режиме на  $0,65 \div 0,75$  %, чтобы кратковременно обеспечить питание всех потребителей при выходе из строя одного из трансформаторов. В случае питания нагрузок II категории и возможности быстрого использования централизованного резерва трансформаторов для их замены при авариях допускается применение одностранформаторных подстанций с загрузкой трансформаторов до 90-95 %. Однако на практике средняя загрузка трансформаторов в промышленности не превышает 30 %, что обусловлено неизбежными ошибками прогнозирования нагрузки при проектировании, тенденциями совершенствования технологии и, соответственно, расхода электроэнергии. Отключение части ненагруженных трансформаторов при существующих принципах построения сетей затруднено.

В свете сказанного, вновь привлечено внимание к пересмотру норм проектирования в направлении создания предпосылок для полного использования установленной мощности трансформаторов в максимальных режимах и экономии тем самым материальных и трудовых ресурсов, затрачиваемых на излишнюю трансформаторную мощность (*Шевченко, Менчик, 1987*).

Исходя из опыта проектирования и эксплуатации промышленных распределительных электрических сетей разработаны "Рекомендации по проектированию внутрицехового электроснабжения с параллельной работой трансформаторов", согласно которым признано целесообразным рассредоточивать трансформаторы 6-10/0,4 кВ по площади цеха и соединять их друг с другом по кратчайшему расстоянию через магистрально-распределительные шинопроводы (ШМА) так, чтобы они создавали схему сети 0,38 кВ типа "кольцо" или "разомкнутое кольцо". Количество трансформаторов в замкнутой СЭ (ЗСЭ) должно быть не менее трех, чтобы отказ одного из них не приводил к недопустимой перегрузке оставшихся в работе трансформаторов. Желательна параллельная работа однотипных трансформаторов и осуществление их питания от одного источника 6-10 кВ (шины ГПП) во избежание протекания через сеть ЗСЭ уравнительных токов.

Согласно выполненным оценкам, применение параллельной работы цеховых трансформаторов позволяет на 25-30 % уменьшить их суммарную установленную мощность за счет использования более высокого коэффициента загрузки при параллельной работе и меньшей требуемой резервной мощности на случай выхода одного из них из строя, а также снижения суммарной нагрузки из-за несовпадения максимумов нагрузок в зонах обслуживания отдельных трансформаторов. В ЗСЭ выше качество напряжения, повышается надежность срабатывания автоматов при однофазных КЗ, появляется возможность отключения части ненагруженных трансформаторов при одно- и двухсенных режимах работы промышленного предприятия. Сооружение ЗСЭ позволяет также избежать негативных последствий от неизбежных ошибок на стадии проектирования в определении расчетной нагрузки предприятия, поскольку при выявлении излишней запроектированной мощности, в процессе выхода объекта на фактическую нагрузку, ее можно не вводить и передать на другие объекты.

Пример схемы СЭ промышленного предприятия с двумя отдельно работающими секциями сборных шин на ГПП и с двумя ЗСЭ 0,4 кВ, подключенной к этим секциям, показан на рис. 8. Нагрузка 0,4кВ распределяется от ШМА, образующих кольцевую сеть, и частично от шин КТП. Подключение ЗСЭ к ГПП может быть выполнено, как показано на рис. 8, одним многоамперным или несколькими кабелями.

В цепях ШМА используется только один автомат А<sub>Ш</sub>. Потребители I категории, которые обычно составляют небольшую долю нагрузки, подключены к отдельному РП, имеющему питание от двух различных ЗСЭ.

В ЗСЭ точкой с наибольшим ожидаемым током КЗ являются шины 0,4 кВ КТП. При отдельной работе трансформаторов расчетные токи при максимально ожидаемой мощности КЗ на шинах 6-10 кВ  $S_{кз} = 500$  МВ·А не превышают 16, 25, 38 кА соответственно для КТП с трансформаторами мощностью 630, 1000 и 1600 кВ·А. В ЗСЭ за счет подпитки точки КЗ через шинопроводы от соседних КТП расчетные токи увеличиваются. Их предельные значения для КТП указанных типов могут быть приняты на уровне 100 кА для ударного тока, что соответствует предельно допустимому значению для ошиновки КТП и приемлемо для применяемой коммутационной аппаратуры 0,4 кВ.

При расчете КЗ в сети 0,4 кВ, как известно, необходим учет всех активных и реактивных сопротивлений цепи КЗ, включая сопротивления контактных соединений, катушек автоматов. Следует также обратить внимание на то, что неучет сопротивлений системы  $X_c = U_{ном}^2 / S_{кз}$  при ожидаемом уровне ударного тока КЗ порядка  $i_y = 100$  кА приводит к завышению тока на 7 и 18 % при  $S_{кз} = 500$  и 200 МВ·А соответственно.

В ЗСЭ с трансформаторами  $S_{т ном} = 630 \div 1600$  кВ·А следует использовать шинопроводы новой конструкции типа ШМА-4 на номинальный ток 1250 и 1600 А. Их погонные параметры составляют соответственно  $\dot{Z} = (0,034 + j \cdot 0,016)$  мОм/м и  $\dot{Z} = (0,015 + j \cdot 0,026)$  мОм/м. Существенно большие погонные

сопротивления имеют применяемые в сетях 0,4 кВ на отдельных участках со сложным профилем трассы одножильные многоамперные кабели.

В сетях 0,4 кВ значительное влияние на токи КЗ оказывает электрическая дуга, вносящая в цепь КЗ активное сопротивление. В упомянутых выше "Рекомендациях" по проектированию ЗСЭ предложена методика учета дуги путем введения в цепь КЗ эквивалентного фазного напряжения дуги  $U_d = 50$  В.

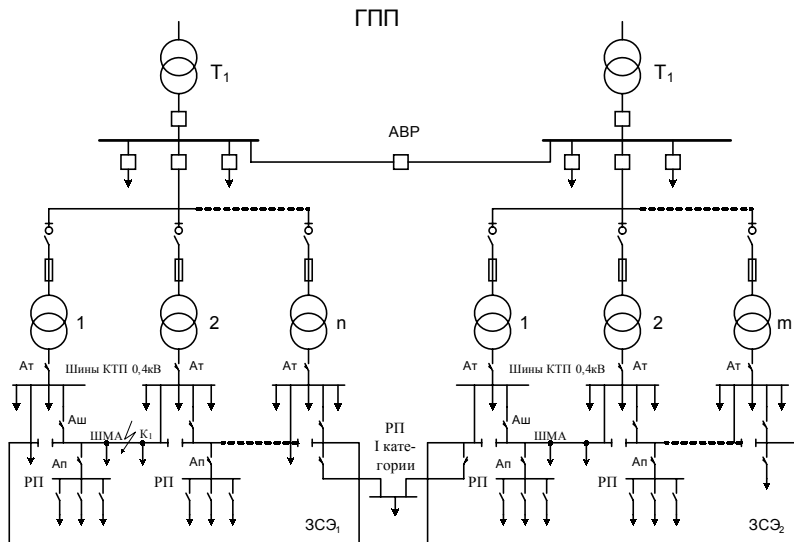


Рис. 8. Принципиальная схема системы электроснабжения с ЗСЭ 0,4 кВ

Векторное уравнение для контура КЗ (рис. 9а) с учетом совпадения фаз векторов  $U_d$  и  $I_d$  имеет вид

$$\dot{U} = U_d + I_d \cdot r_{кз} + j \cdot I_d \cdot x_{кз}. \quad (4)$$

Его численное решение относительно тока  $I_d$  целесообразно представить

$$I_d = K_d \cdot I_{мет}, \quad (5)$$

где  $I_{мет} = U/Z_{кз}$  – известное решение для металлического КЗ,  $K_d$  – коэффициент, зависящий от фазного угла сопротивления контура КЗ  $\varphi_{кз} = \arctg x_{кз}/r_{кз}$  – рис. 9б. Наибольший эффект учета дуги достигается при преобладании в контуре КЗ активного сопротивления. При реальных для ЗСЭ параметрах сетей ( $\varphi_{кз} = 50-70^\circ$ ) имеем согласно (5) снижение тока металлического КЗ на 10-15%.

Оценку ударного тока КЗ при учете переходного сопротивления в месте КЗ предлагается проводить по приближенным формулам

$$i_{ДУ} = \sqrt{2} \cdot k_y \cdot I_d, \quad k_y = 1 + \exp[-0,01 \omega(r_{кз} + R_d)/X_{кз}], \quad R_d = U_d / I_d. \quad (6)$$

Ударные токи  $i_{ДУ}$  по сравнению с  $i_{мет}$  у снижаются на 18-20%.

Кардинально решить задачи ограничения в ЗСЭ токов КЗ и одновременного нераспространения провалов напряжения при КЗ за пределы зоны обслуживания одного трансформатора, даже в случае высокой плотности нагрузки  $W = I$  кВ·А/м<sup>2</sup> и более (длинах  $l_{III} \leq 10 \div 30$  м) можно с помощью ТОУ, включаемых в рассечку каждого из ШМА. Наиболее перспективным типом ТОУ для сетей 0,4 кВ являются жидко-металлические самовосстанавливающиеся токоограничители ЖМТ. Целесообразные места включения ЖМТ показаны на рис. 10. Они устанавливаются последовательно с автоматами в цепях ШМА и их количество соответствует числу трансформаторов ЗСЭ.

При КЗ, например, в зоне обслуживания трансформатора  $T_2$  (точки  $K_1, K_2, K_3$ ) быстро срабатывают ЖМТ<sub>1</sub> и ЖМТ<sub>2</sub>, практически исключая подпитку тока от трансформаторов  $T_1$  и  $T_3$  к моменту  $t_{кз} \approx 0,01$  с, когда наблюдается ударное значение тока КЗ в неблагоприятной фазе. Наибольший ток КЗ здесь, как и в разомкнутых СЭ, определяется только подпиткой от одного питающего трансформатора. Расчеты и испытания показали, что линейные автоматы  $A_{ли}$  при этом остаются во включенном состоянии. Короткое замыкание на отходящей линии (точка  $K_1$ ) обычно отключается за время, меньшее 0,1 с – на шинах восстанавливается напряжение, а спустя 0,2-0,4 с, после перехода ЖМТ в проводящее состояние, вновь собирается нормальная схема ЗСЭ.

В случае КЗ непосредственно на КТП или ШМА (точки  $K_2$  и  $K_3$ ) авария ликвидируется отключением вводного автомата  $A_{Т2}$ , с выдержкой времени  $\Delta t_{AT}$ . При этом теряют питание нагрузки в зоне обслуживания трансформатора  $T_2$ . Во избежание в данном случае включения неаварийной части ЗСЭ на неустранимое КЗ через самовосстанавливающийся ЖМТ следует предусмотреть выработку команды на

отключение автоматов  $A_{ш12}$  и  $A_{ш23}$  с выдержкой времени  $\Delta t_{АШ} \geq \Delta t_{АТ}$  и блокировку этой команды, если напряжение на ШМА восстанавливается за время  $\Delta t < \Delta t_{АШ}$ .

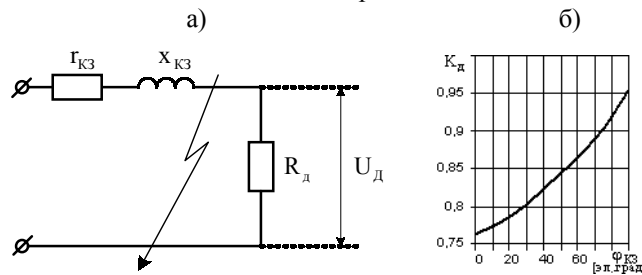


Рис. 9. Схема для расчета тока трехфазного КЗ (а), зависимость  $K_d = f(\varphi_{K3})$

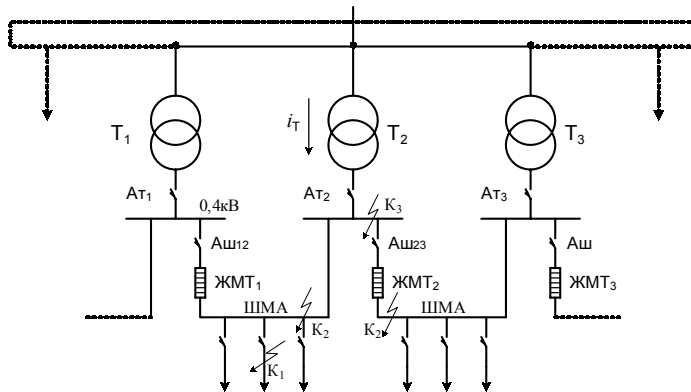


Рис. 10. Схема замкнутой системы электроснабжения с жидкометаллическими токоограничителями

Предварительные расчеты показали, что при новом проектировании или реконструкции действующих предприятий с использованием ЗСЭ с параллельной работой понижающих трансформаторов может быть достигнут существенный экономический эффект. Перспективным представляется массовое применение схем с использованием ЖМТ, вследствие их компактности, высоких токоограничивающих свойств, простоты эксплуатации и способности к самовосстановлению.

#### 4. Выводы

На настоящем этапе развития техники возможно создание систем электроснабжения с параллельной работой на предприятиях секций сборных шин или однотипных трансформаторов для получения высокого уровня качества электроэнергии при сохранении или даже ограничении токов КЗ на уровне, соответствующем подпитке точки КЗ только от одного трансформатора и двигателей нагрузки аварийной секции.

Системы электроснабжения, обладающие указанными свойствами, могут быть реализованы на базе бесконтактных коммутирующих и токоограничивающих аппаратов.

Параллельная работа секций шин 6-10 кВ через шиносоединительные ТООУ позволяет решить проблему обеспечения высокого качества электроэнергии в нормальных режимах при существенном ограничении токов КЗ.

#### Литература

- Ермилов А.А. Основы электроснабжения промышленных предприятий. М., Энергоатомиздат, 208 с., 1983.  
 Иванов В.С., Соколов В.И. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий. М., Энергоатомиздат, 336 с., 1987.  
 Инструкция по проектированию электроснабжения промышленных предприятий (СН-174-75). М., Стройиздат, с.53, 1976.  
 Кучумов Л.А. О путях преодоления противоречивых требований повышения качества электрической энергии и уменьшения уровней токов короткого замыкания. Проблемы технической электродинамики, вып.64, с.61-63, 1977.  
 Кучумов Л.А., Утегулов Н.И. Применение в распределительных электрических сетях двоярных реакторов в сочетании с токоограничивающими устройствами. Электричество, № 12, с.8-13, 1976.  
 Шевченко В.В., Менчик В.В. Проблемы повышения эффективности использования трансформаторов в системах электроснабжения промышленных предприятий. Промышленная энергетика, № 9, с.27-30, 1987.