

# ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОСВЯЗИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

**ШАРОВ Ю.В.**, Московский энергетический институт,  
**КАРТАШЕВ И.И.**, Московский энергетический институт,  
**ТУЛЬСКИЙ В.Н.**, Московский энергетический институт,  
**БОЛЬШАКОВ О.В.**, ОАО «ФСК ЕЭС»

В статье приводится оценка последствий, обусловленных технологией функционирования ЭЭС в сопоставлении параметров качества электроэнергии и показателей надежности электроснабжения

Управление ЭЭС должно быть направлено на поддержание таких параметров режима, при которых обеспечиваются требуемые надежность и качество электроснабжения. Это означает, что не следует, хотя это и возможно, стремиться к поддержанию абсолютной надежности и качества электроснабжения, «загоняя» в необходимые рамки параметры режима ЭЭС. Это экономически нецелесообразно. Действительно, нет необходимости производить электрооборудование с неисчерпаемым ресурсом, с бесконечным сроком службы. Нет необходимости поддерживать напряжение, частоту на постоянном уровне, что потребует больших запасов генерирующих мощностей. Нет необходимости добиваться системной бесперебойности электроснабжения, что имеет смысл в отношении отдельных электроприемников.

При оценке показателей надежности, недоотпуска или недовыработки электроэнергии в большей или меньшей степени подробно учитывают взаимосвязь параметров режима и состояний электрооборудования ЭЭС. Превышение нормативных значений ПКЭ отрицательно влияет на условия функционирования электрооборудования и со временем на его состояние. Ухудшение состояния, как правило, приводит к сокращению срока службы и отказу. Характер изменения состояния очевиден, в некоторых случаях получены и количественные характеристики. Например, зависимость производительности оборудования, количества отказов, срока службы и т.п. от значений ПКЭ, превышающих установленные нормы.

Ниже приведены примеры влияния каждого из нормируемых показателей качества электроэнергии как на функционирование оборудования, так и на надежность электроснабжения.

Впрочем, стремиться к снятию таких характеристик для всех видов оборудования или даже какой-то его части не следует, но следует поддерживать качество электроэнергии на должном уровне. Как известно из основ электромагнитной совместимости, всякое оборудование, подключенное к сети, должно нормально функционировать, не испытывая помех со стороны этой сети и не внося таковых в сеть. Тогда коэффициент влияния КЭ на электрооборудование можно оценивать в относительных единицах как отношение времени работы при ненормативных значениях ПКЭ к общему времени наработки электрооборудования для каждого нормируемого показателя:

$$K_{\text{вл}} = (T_{\text{ф}} - T_{\text{норм}}) / T_{\text{ф}} = (T_{\text{ненорм}} / T_{\text{ф}}) 100, \text{ где}$$

$$T_{\text{ф}} = T_{\text{норм}} + T_{\text{ненорм}} - \text{фактическое относительное время работы}$$

электрооборудования, в процентах;

$$T_{\phi} = (t_{\text{раб}}/t_{\text{набл}})100;$$

$t_{\text{раб}}$  - время работы оборудования, час;

$t_{\text{набл}}$  - время наблюдения, час. (Например: для двухсменного предприятия  $t_{\text{раб}} = 16$  час, а  $t_{\text{набл}} = 24$  час, тогда  $T_{\phi} = 66\%$  при любой длительности наблюдения.);

$T_{\text{норм}}$  - время работы при нормативных значениях ПКЭ;

$T_{\text{ненорм}}$  - время работы при ненормативных значениях ПКЭ (относительное время превышения нормативных значений ПКЭ).

В худшем случае, когда электрооборудование постоянно функционирует при ПКЭ, не соответствующих нормам,  $K_{\text{вл}}=1$ , уменьшаясь с улучшением качества электроэнергии. При  $K_{\text{вл}} < 0,05$  качество электроэнергии соответствует требованиям ГОСТ 13109-97 и, следовательно, не оказывает отрицательного влияния на надежность оборудования. По определению нормы ПКЭ являются уровнями электромагнитной совместимости для кондуктивных электромагнитных помех в системах электроснабжения. Эти нормы должны вноситься в технические условия на присоединение и договора электроснабжения.

**Таблица 1.** Зависимость коэффициента влияния от относительного времени превышения нормативных значений ПКЭ: а) при  $T_{\phi}=66\%$ ; б) при  $T_{\phi}=100\%$

а)

$T_{\text{ненорм}}, \%$	5	10	20				100
$K_{\text{вл}}, \text{о.е.}$	0,076	0,15	0,3	-	-	-	1,52

б)

$T_{\text{ненорм}}, \%$	5	10	20				100
$K_{\text{вл}}, \text{о.е.}$	0,05	0,1	0,2	-	-	-	1,0

Введение такого коэффициента не отменяет необходимости учета и других показателей надежности. Здесь мы исходим из того, что ухудшение качества электроэнергии так или иначе снижает эксплуатационные характеристики системы и ее оборудования и приводит, с одной стороны, к ускоренному износу оборудования, его восстанавливаемым или невосстанавливаемым отказам, а с другой, к снижению надежности электроснабжения. Здесь сохраняется принятый подход при оценке надежности, то есть в привязке показателя надежности ко времени и накоплению статистических результатов.

Так, для оценки влияния нарушений режима на надежность электроснабжения потребителей в некоторых европейских странах предложен такой критерий:

$$t = (\sum P_i t_i / P_{\text{н.макс}}), \text{ где}$$

$\sum P_i t_i$  - суммарное значение недоотпуска электроэнергии в результате всех рассматриваемых аварийных нарушений за установленный интервал времени;

$P_{\text{н.макс}}$  - максимум нагрузки в рассматриваемой системе.

## ПРОВАЛЫ НАПРЯЖЕНИЯ И БЕСПЕРЕБОЙНОСТЬ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Показатели качества электроэнергии и надежности электроснабжения, следуя за параметрами режима ЭЭС, изменяются по случайным законам и оцениваются методами теории вероятностей.

Известна классификация электроприемников (потребителей) по надежности электроснабжения, оцениваемая по длительности перерыва электроснабжения. Перерыв электроснабжения – это кратковременный провал (снижение) или

исчезновение напряжения. Рекомендуемая в ПУЭ по принятой классификации длительность перерыва электроснабжения определяется временем восстановления электрооборудования сети от момента исчезновения напряжения до восстановления напряжения на выводах электроприемника, то есть временем устранения неисправности. Рекомендуемая по ГОСТ 13109-97 длительность провала напряжения определяется суммарным временем срабатывания защиты, выключателя, средств автоматики. Причина явления в обоих случаях, если не рассматривать ошибки персонала, одна - короткие замыкания, способы восстановления напряжения - разные. Более того, ПУЭ, определяя категории электроприемников по надежности электроснабжения, считают провалы напряжения допустимыми. ГОСТ, нормируя провалы по глубине, считает нарушением появление провалов, в том числе и исчезновения напряжения, при их длительности более 30 с. Авторы ПУЭ (7-е издание), учитывая такое противоречие, ввели в требование по надежности электроснабжения первую особую группу электроприемников, перерыв питания которых недопустим или не превышает 50 мс. Таким образом, устранено противоречие между требованиями к системам электроснабжения по качеству электроэнергии и надежности.

Оба показателя характеризуют допустимую бесперебойность (длительность перерыва) электроснабжения. Потребитель вправе выбирать, по какому показателю строить систему электроснабжения, исходя из своих технологических и финансовых возможностей, закрепляя свои намерения в договоре. Энергоснабжающая организация обязана показать свои возможности в части обеспечения бесперебойности питания с учетом своих технологических возможностей еще в технических условиях на присоединение.

Учитывая значимость для ИЭС ААС как надежности электроснабжения, так и качества электроэнергии, процедура решения этого вопроса должна быть прописана в нормативных документах. Например, «Порядок формирования технических условий на присоединение и заключения договоров электроснабжения».

Восприимчивость некоторых видов электроприемников к провалам напряжения, после которых наступает отказ, может быть проиллюстрирована следующими примерами и таблицей 2:

- для оборудования общего назначения (менее чувствительного)  $\delta U_{\text{пр}} \geq 80\%$  и  $\Delta t_{\text{пр}} \geq 0,5$  с;
- электромагнитные контакторы  $\delta U_{\text{пр}} \geq 50\%$  и  $\Delta t_{\text{пр}} \geq 0,02$  с;
- двигатели с электронным управлением  $\delta U_{\text{пр}} \geq 15\%$  и  $\Delta t_{\text{пр}} \geq 0,02$  с;
- газоразрядные лампы высокого напряжения  $\delta U_{\text{пр}} \geq 20\%$  и  $\Delta t_{\text{пр}} \geq 0,05$  с;
- реле минимального напряжения  $\delta U_{\text{пр}} \geq 20\%$  и  $\Delta t_{\text{пр}} \geq 0,5$  с;
- ПЭВМ, медицинские диагностические приборы  $\delta U \geq 25\%$  и  $\Delta t_{\text{пр}} \geq 0,07$  с;

**Таблица 2.** Допустимое время перерыва электроснабжения для промышленных потребителей

Вид производства	Допустимое время, с
Коксохимическое	1–2
Обогатительное (горнодобывающее)	1
Прокатное (металлургическое)	1
Химическое и нефтехимическое	0,15–3
Производство синтетического каучука	1 – 8
Автомобильное (печи отжига)	0,1
Электроэнергетика (самозапуск асинхронных и синхронных двигателей)	0,1–3

## **ОТКЛОНЕНИЕ ЧАСТОТЫ И БАЛАНСОВАЯ НАДЕЖНОСТЬ**

Частота - общесистемный параметр, то есть в установившемся режиме одинакова для любой точки ЭЭС. Это условие выполнимо, если в ЭЭС соблюдается баланс активной мощности. Поэтому под влиянием изменяющейся нагрузки должна, следуя за этими изменениями, изменяться мощность генераторов. Для этого ЭЭС должна располагать некоторым регулируемым резервом по активной мощности. Значение этого резерва определяется в проектных и эксплуатационных расчетах балансовой надежности, а также в краткосрочных прогнозах. Расчетный минимум резерва принимается как норма для данной ЭЭС, фактически располагаемый резерв активной мощности в ЭЭС позволяет поддерживать в допустимых пределах изменения частоты, так что с увеличением нагрузки автоматически увеличивается и мощность генераторов ЭЭС, а со снижением нагрузки - эта мощность снижается. Регулирование частоты и активной мощности осуществляется средствами первичного и вторичного регулирования этих параметров, которыми оборудованы турбины генераторов.

Процесс регулирования сопровождается изменением частоты, диапазон которого нормируется ГОСТ 13109-97 и ограничен как показатель качества электроэнергии «отклонение частоты» значениями от  $\pm 0,2$  Гц до  $\pm 0,4$  Гц. Важно, что отклонение частоты характеризует эксплуатационную надежность ЭЭС, поскольку всякое изменение, структурное или функциональное, отражается на частоте, а ее отклонения на условиях нормального функционирования, прежде всего, вращающихся машин.

## **ОТКЛОНЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ И НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

Отклонение напряжения - это разность между установившимся напряжением и его номинальным значением, выраженное в процентах от номинального значения. Как показатель качества электроэнергии отклонение напряжения нормируется ГОСТ 13109-97 на выводах электроприемников, то есть у конечного потребителя. Большая часть таких электроприемников получают питание от сетей 380 В через распределительные подстанции 6-10/0,4 кВ. В этих сетях вплоть до подстанций напряжением 110-220/6-10 кВ (верхняя граница сетей МРСК) отклонение напряжения нормируется как расчетная величина, вносимая в договор энергоснабжения. Расчетные нормы отклонений напряжения устанавливаются с учетом ежесуточной наибольшей и наименьшей нагрузки отдельно для зимнего и летнего периода и поддерживаются в сезонном регулировании трансформаторами 6-10/0,4 кВ, оснащенными ПБВ. Ежесуточное регулирование напряжения возлагается на трансформаторы 110-220/6-10 кВ, оснащенные РПН, которые согласно требованиям ПУЭ должны иметь возможность поддерживать на шинах НН: в режиме наибольшей нагрузки - напряжение на 5 % выше номинального (не менее), в режиме наименьшей нагрузки - напряжение не выше номинального.

В сетях 220 кВ и выше (сети ФСК) ограничения по отклонениям напряжения вводятся по условиям возможных перенапряжений, прикладываемых к оборудованию сетей (высший предел напряжения) и обеспечения пропускной способности и устойчивости электропередачи (низший предел напряжения). Эти пределы характеризуются, соответственно, положительными и отрицательными допустимыми отклонениями напряжения, рассчитанными для основных узлов ЭЭС и принимаемыми как норма. Поддерживают отклонения напряжения в расчетных пределах как с помощью РПН трансформаторов и автотрансформаторов, так и средствами компенсации реактивной мощности. Выход за пределы допустимых отклонений напряжения приводит к отказу основного оборудования, вызванному нарушением изоляции при

перенапряжениях, или нарушению синхронной связи систем.

## **ВЛИЯНИЕ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ НА НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ**

Качество электроэнергии нормируется для сетей всех напряжений по коэффициенту искажения синусоидальной формы кривой напряжения и коэффициенту  $n$ -ой гармонической составляющей до 40-й гармоники включительно. В расчетах надежности несинусоидальность токов и напряжений не учитывается, порой исходя из ложного предположения незначительного влияния этих параметров на надежность функционирования электрооборудования ЭЭС, но, главным образом, в связи с отсутствием методического обеспечения решения таких задач.

Безусловно, основная установленная мощность источников высших гармоник тока размещается у потребителя, но существенная доля их - в сетях. Это трансформаторы, ток холостого хода которых содержит до 40 % токов высших гармоник (3, 5 и 7-я), устройства FACTS, генерирующие в основном нечетные гармоники. Уровень токов высших гармоник в электрических сетях определяется суммарным влиянием на электрооборудования как тех, так и других.

Практика зафиксировала многочисленные ситуации нарушения нормальных условий функционирования электрооборудования, вызванные резонансными явлениями в ЭЭС. Это обусловлено, в общем случае, двумя следующими факторами:

- наличием источников высших гармоник тока (ВГ), создаваемых нелинейными элементами ЭЭС, в том числе и электроприемниками, причем спектр ВГ включает не только кратные основной частоте (50 Гц), но и промежуточные гармоники;
- наличием емкостных элементов ЭЭС, в том числе и конденсаторами, необходимыми для компенсации реактивной мощности с целью обеспечения нормальных уровней напряжения и повышения коэффициента мощности.

Как известно, резонансные явления становятся причиной перенапряжений и сверхтоков на элементах ЭЭС. Конфигурация ЭЭС непрерывно изменяется, изменяются и ее частотные характеристики, которые заранее неизвестны. Резонансы могут возникать на нескольких частотах. При этом значения токов и напряжений могут быть незначительными и неопасными для работы подключенного электрооборудования. Например, работа конденсаторов длительно допустима при  $U=1,1U_{ном}$  и  $I=1,3I_{ном}$  на основной частоте. Резонансы при достаточно больших активных сопротивлениях системы могут не представлять опасности для установленного оборудования.

В задачах оценки надежности функционирования ЭЭС при наличии гармонических составляющих не учитывать подобные явления нельзя и, конечно, решение таких задач должно носить локальный характер. Для локализации этих событий необходимо оценить качество электроэнергии и установить:

- возможны ли резонансные явления в рассматриваемой ЭЭС?
- в какой части ЭЭС резонансы наиболее вероятны и на каких частотах?
- на какие источники ВГ тока может реагировать ЭЭС появлением резонансных явлений?
- каковы параметры режима (токи, напряжения) в узлах или ветвях ЭЭС, где наблюдаются резонансы?

Высшие гармонические составляющие тока, генерируемые нелинейными электроприемниками, приводят к негативным, а иногда к необратимым последствиям.

Из результатов, полученных исследователями этой проблемы и характеризующих надежность электроснабжения, остановимся на тех, которые в наибольшей степени, при превышении показателями качества электроэнергии норм, установленных ГОСТ 13109-97, влияют на электрооборудование ЭЭС, ее системы защиты и автоматики, телекоммуникационные системы связи и управления. Последнее очень важно для обеспечения надежности.

Высшие гармоники тока:

- создают дополнительные потери в трансформаторах и вращающихся электрических машинах, которые могут быть причиной выхода из строя этих видов электрооборудования;
- приводят к разрушению нулевых рабочих проводников кабельных линий 0,38 кВ вследствие их перегрузки токами гармоник кратных трем  $n=3*(2*K+1)$ , где  $K = 0,1,2...$  Эти токи в трехфазных цепях совпадают по фазе и образуют нулевую последовательность. В результате общий ток в нейтрали составляет:

$$I_N = 3\sqrt{I_3^2 + I_9^2 + I_{15}^2 + \dots} ;$$

- создают дополнительные потери в батарее конденсаторов и кабеле. При несинусоидальных токах батареи конденсаторов одновременно являются элементами, абсорбирующими гармоники, генерируемые нелинейными электроприемниками, так как сопротивление конденсатора обратно пропорционально частоте  $f$ :  $x_c=1/\omega C$ , а потери в них пропорциональны частоте приложенного напряжения  $\Delta P = U^2 \omega C \operatorname{tg}\delta$ , что также справедливо и для кабелей.

Так как сопротивления элементов сети имеют индуктивный характер, то применение установок компенсации реактивной мощности и наличие нелинейных электроприемников создает условия для резонансных явлений (как по току, так и по напряжению) на отдельных элементах СЭС. Это отрицательным образом может отразиться на работоспособности отдельных элементов системы вплоть до выхода их из строя под влиянием сверхтоков и перенапряжений. Кроме того, увеличение коэффициента искажения синусоидальной формы кривой напряжения ( $K_U$ ) приводит к старению изоляции, качество которой характеризуется  $\operatorname{tg}\delta$  диэлектрика. Работа конденсаторов с  $K_U=5\%$  в течение двух лет приводит к увеличению  $\operatorname{tg}\delta$  в два раза. Проведенными измерениями для кабелей показано, что при  $K_U=7\%$  за 2,5 года ток утечки возрастает более чем на 30%, а за 3,5 года - более чем на 40%;

- приводят к ложному срабатыванию предохранителей и автоматических выключателей вследствие дополнительного нагрева внутренних элементов защитных устройств. Этот процесс обусловлен протеканием несинусоидальных токов, и, следовательно, действием поверхностного эффекта и эффекта близости. На практике встречались случаи ложных срабатываний выбранных в соответствии с требованиями ПУЭ автоматических выключателей, защищающих линии питания компьютерного оборудования (при нагрузке, составляющей 80-85% уставки теплового расцепителя автоматического выключателя). Известны случаи ложных срабатываний релейных защит от токов нулевой последовательности, реагирующих на токи 3-й и кратной ей гармоник, образующих нулевую последовательность;
- приводят к вибрация в электро-машинных системах. Наличие высших гармоник в напряжении питания электродвигателей является причиной возникновения в магнитном потоке составляющих на частотах высших

гармоник, которые в свою очередь будут наводить гармоники ЭДС и, как следствие этого, в обмотках ротора появляются высшие гармоники тока. Эти гармоники взаимодействуют с основным магнитным потоком, создавая дополнительные механические моменты на валу электрической машины. В результате создаются гармонические пульсации вращающего момента на валу двигателя. В экстремальных случаях может возникнуть вибрация на резонансной частоте вращающейся массы ротора, приводящая к накоплению усталости металла и возможному разрушению вала электродвигателя;

- приводят к нарушению условий питания импульсной нагрузки и вызывают деформацию синусоиды напряжения, питающей электроприемник. Синусоида напряжения становится «плоской», так как в момент импульса тока увеличивается падение напряжения на внутреннем сопротивлении сети.

### ВЛИЯНИЕ НЕСИММЕТРИИ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ

Несимметрия - параметр режима, как и все показатели качества электроэнергии, влияет на состояние электрооборудования в том случае, если он превосходит установленные ГОСТ 13109-97 значения. Несимметрия напряжений основной частоты оценивается, как и для всех ПКЭ на суточном интервале времени, по соотношению напряжений обратной и нулевой последовательностей к напряжению прямой последовательности. Коэффициент напряжения по обратной и нулевой последовательности в процентах установленный для сетей всех уровней напряжения равен 2 %, но не более 4 %.

**Таблица 3.** Электроприемники, создающие несимметрию напряжения

№ п/п	Вид электроприемника	$U_{ном}$ , кВ	$K_{2U}$ , %
1.	ДСП-100	220 35	1,3 4,5
2	ДСП-40	110 35	1,4 4,0
3.	Однофазные электро-термические установки	10 110	18 4,6
4.	Тяговые подстанции переменного тока	6 10	1,4 2,0
5.	Прокатный стан 1700	0,4	1-5
6.	Сварочные машины		

Основная причина - это несимметрия токов в сети, что обусловлено неравенством нагрузки по фазам. Значительная часть электроприемников присоединяется к сетям 380 В и имеют одно или двухфазное исполнение. Таковыми могут быть и бытовые, и промышленные электроприемники. К ним относятся осветительные приборы, бытовые приборы, электросварочные аппараты, промышленные механизмы небольшой мощности. Несимметрию напряжений можно наблюдать и в сетях 6-10 кВ как

результат несимметрии нагрузки в сетях 380 В. Подключенные к сетям 6-10 кВ электроприемники имеют трехфазное исполнение. Однако и среди них имеются такие, которые способны создавать несимметрию (Таблица 3).

В сетях высокого напряжения несимметрия может быть обусловлена конструкцией линии в силу неравенства ее сопротивлений по фазам. Для симметрирования сопротивлений фаз линии проводят транспозицию фазных проводов, что требует сооружения специальных транспозиционных опор.

Еще одна причина несимметрии напряжений - это неполнофазные режимы в сетях с изолированной нейтралью. Их относят к особым, но допустимым по условиям эксплуатации режимам, В ущерб несимметрии напряжений на приемном конце такой линии на эти режимы идут ради сохранения электроснабжения потребителей. К таким же особым режимам следует отнести режимы с замыканием на землю одной из фаз в сетях с изолированной

нейтралью.

Несимметрия трехфазной системы напряжений приводит к возникновению токов обратной последовательности  $I_{2U}$ , а в 4-х проводных сетях - и токов нулевой последовательности  $I_{0U}$ .

Токи  $I_{2U}$  вызывают дополнительный нагрев вращающихся машин, создавая отрицательный вращающий момент, снижают скорость вращения асинхронных двигателей и производительность приводимых ими механизмов. Снижение скорости вращения, то есть увеличение скольжения АД, сопровождается увеличенным потреблением реактивной мощности и, как следствие, снижением напряжения.

При несимметрии напряжений в 2 % срок службы асинхронных двигателей ввиду дополнительных потерь активной мощности сокращается на 10,8 %, синхронных - на 16,2 %, трансформаторов - на 4 %, конденсаторов - на 20 %. Чтобы избежать дополнительного нагрева, нагрузка двигателя (момент на валу) должна быть снижена.

Согласно публикации МЭК 892 номинальная нагрузка двигателя допускается при  $K_{2U} < 1$  %. При коэффициенте обратной последовательности 2 % нагрузка двигателя должна быть снижена до 96 %, при 3 % - до 90 %, при 4 % - до 83 % и при 5 % - до 76 %. Эти цифры справедливы при условии, когда двигатель работает с постоянной нагрузкой, т.е. в установившемся тепловом режиме.

Исследования, проведенные в энергосистемах Урала и Сибири, где источником несимметрии являются электрифицированные железные дороги (ЭЖД), горно-обогатительные комбинаты, лесопромышленные комплексы, показали, что  $K_{2U}$  (максимальное значения) достигал в пределах полигонов Западно-Сибирской электрифицированной железной дороги: 1,5% в сетях 220 кВ, 7,5 % - в сетях 27,5 кВ и 9,2 % - в сетях 10,5 кВ. Аналогичные значения были замерены в сетях Южно-Уральской и Восточно- Сибирской ЭЖД.

Под воздействием этих искажений был зарегистрирован преждевременный выход из строя крупных синхронных машин, насосных станций в западной части Иркутской энергосистемы. Нарушения работы устройств сигнализации и блокировки на Южно- Уральской ЭЖД.

Опасные условия для эксплуатации четырехпроводных сетей напряжением 0,38 кВ с однофазной нагрузкой (коммунально-бытовые сети, сети жилых зданий и поселков) создаются за счет смещения нейтрали, обусловленного повышенным сопротивлением нулевого провода. Крайний аварийный режим - режим, обусловленный обрывом нулевого провода, когда фазные напряжения (220 В) возрастают до междуфазных (380 В) или близких к ним.

## **ВЛИЯНИЕ КОЛЕБАНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС**

Колебания напряжения в сетях возникают, главным образом, при работе резкопеременных нагрузок: управляемых тиристорных преобразователей с широким диапазоном и большой скоростью регулирования напряжения, ДСП, мощных сварочных агрегатов и другого промышленного оборудования. Колебания напряжения - это повторяющиеся изменения напряжения, размах (амплитуда) которых не превышает 10 % номинального напряжения в диапазоне частот от 0 до 25-35 Гц. При таких изменениях напряжения, приложенных к осветительным установкам, их можно наблюдать визуально, так как они вызывают мерцание (фликер) светового потока. Допустимые размахи зависят от их амплитуды и частоты изменения.

Колебания напряжения отрицательно сказываются на зрительном восприятии предметов, деталей, графических изображений, и, в конечном счете,



на производительности труда и зрении работников. Воздействие миганий ламп зависит от типа светильника. При одинаковых колебаниях напряжения отрицательное влияние на лампы накаливания проявляется в значительно большей мере, чем на газоразрядные лампы. При размахах изменений напряжения более 10 % наблюдаются погасания газоразрядных ламп: при больших размахах (свыше 15 %) могут отпадать контакты магнитных пускателей. При таких колебаниях наблюдается выход из строя конденсаторов и вентиля преобразовательных агрегатов.

Колебания напряжения отрицательно сказываются на работе большого числа электроприемников. Так, на одном из предприятий, к шинам 10 кВ которого подключена ДСП-40, а также индукционные печи и синхронные двигатели, питающиеся от преобразовательных агрегатов, размахи изменений напряжения достигали 12 %. При этом возникали брак продукции установок высокочастотного нагрева и разрушение сердечников индукционных плавильных печей, отключались системы автоматического управления режимом и синхронные электродвигатели.

При колебаниях напряжения снижается производительность электролизных установок, сокращается срок их службы вследствие повышения износа анодов. На заводах химического волокна вследствие колебаний частоты вращения асинхронных двигателей намоточных устройств синтетические нити рвутся либо становятся разной толщины, что приводит к браку и недоотпуску продукции. При питании печей сопротивления от тиристорных преобразователей колебания напряжения приводят к колебанию тока нагрузки, а иногда и к возникновению неустойчивого режима системы автоматического регулирования температуры.

Колебания амплитуды и фазы напряжения, вызываемые работой прокатных станов, вызывают колебания электромагнитного момента, активной и реактивной мощностей синхронных генераторов блок-станций (ТЭС) предприятий, создавая крутильные колебания валов турбогенераторов, и это отрицательно сказывается на экономичности работы станции в целом. Известны случаи возникновения неустойчивой работы системы автоматического регулирования возбуждения и реактивной мощности синхронных генераторов и двигателей и даже ложной работы форсировки возбуждения.

Кратковременные колебания напряжения при применении дуговой электросварки практически не влияют на качество сварочного шва, что объясняется инерционностью тепловых процессов в металле. Колебания и отклонения напряжения в сетях, питающих машины контактной сварки, существенно сказываются на качестве точечной сварки. Как показали исследования, для различного вида свариваемых деталей допустимые колебания напряжения находятся в пределах не более 3-5 %.

Колебания амплитуды и, в большей мере, фазы напряжения вызывают вибрации электродвигателей, механических конструкций, трубопроводной арматуры. В последнем случае снижается усталостная прочность металла, сокращается срок его службы. Так, при размахах изменения напряжения с частотой примерно 1 Гц, в 2 раза превышающих допустимые согласно ГОСТ 13109-97, срок службы трубопроводов вследствие пульсаций напора насоса сокращается на 5-7 %.

Таким образом, промышленное оборудование, являясь источником колебаний напряжения, в основном и несет на себе тяжесть последствий в виде преждевременного износа оборудования, брака или недоотпуска продукции, что оценивается как ущерб производства.

## **ВЫВОДЫ**

Надежность функционирования электрооборудования определяется уровнем электромагнитной совместимости в точке его подключения, когда его помехоустойчивость и уровень влияния на качество электроэнергии при заданных показателях качества электроэнергии в электрической сети сбалансированы, то есть не приводят к отрицательным последствиям (ухудшению характеристик, нагреву, отказу и т.п.), приводящим к электротехническому и технологическому ущербу.

Коэффициент влияния ПКЭ на электрооборудование для нормируемых ПКЭ можно оценивать как отношение времени наработки электрооборудования при ненормативных значениях к его общему времени работы для каждого нормируемого показателя, а для ненормируемых ПКЭ - как частотность событий, оцениваемых по данным статистической обработки на длительном интервале времени, предшествующем регулируемому периоду.