

Влияние качества электроэнергии на работу электроприемников

Качество электрической энергии/ Автор Суднова В.В.

1 Характерные типы электроприемников

Отклонения ПКЭ от нормируемых значений ухудшают условия эксплуатации электрооборудования энергоснабжающих организаций и потребителей электроэнергии, могут привести к значительным убыткам как в промышленности, так и в бытовом секторе, обуславливают, как уже отмечалось, технологический и электромагнитный ущербы.

От электрических сетей систем электроснабжения общего назначения питаются ЭП различного назначения, рассмотрим промышленные и бытовые ЭП.

Наиболее характерными типами ЭП, широко применяющимися на предприятиях различных отраслей промышленности, являются **электродвигатели** и установки **электрического освещения**. Значительное распространение находят **электротермические** установки, а также **вентильные преобразователи**, служащие для преобразования переменного тока в постоянный. Постоянный ток на промышленных предприятиях применяется для питания двигателей постоянного тока, для электролиза, в гальванических процессах, при некоторых видах сварки и т. д.

Электродвигатели применяются в приводах различных производственных механизмов. В установках, не требующих регулирования частоты вращения в процессе работы, применяются электроприводы переменного тока: **асинхронные и синхронные электродвигатели**.

Установлена наиболее экономичная область применения **асинхронных и синхронных электродвигателей** в зависимости от напряжения. При напряжении до 1 кВ и мощности до 100 кВт экономичнее применять асинхронные двигатели, а свыше 100 кВт - синхронные, при напряжении до 6 кВ и мощности до 300 кВт - асинхронные двигатели, а выше 300 кВт - синхронные, при напряжении 10 кВ и мощности до 400 кВт - асинхронные двигатели, выше 400 кВт – синхронные.

Большое распространение **асинхронных двигателей** обусловлено их простотой в исполнении и эксплуатации и относительно небольшой стоимостью.

Синхронные двигатели имеют ряд преимуществ по сравнению с асинхронными двигателями: обычно используются в качестве источников реактивной мощности, их вращающий момент меньше зависит от напряжения на зажимах, во многих случаях они имеют более высокий КПД. В то же время синхронные двигатели являются более дорогими и сложными в изготовлении и эксплуатации.

Установки **электрического освещения** с лампами накаливания, люминесцентными, дуговыми, ртутными, натриевыми, ксеноновыми применяются на всех предприятиях для внутреннего и наружного освещения, для нужд городского освещения и т.д.

Электросварочные установки переменного тока дуговой и контактной сварки представляют собой однофазную неравномерную и несинусоидальную нагрузку с низким коэффициентом мощности: 0,3 для дуговой сварки и 0,7 для контактной. Сварочные трансформаторы и аппараты малой мощности подключаются к сети 380/220 В, более мощные – к сети 6 – 10 кВ .

Вентильные преобразователи в силу специфики их регулирования являются потребителями реактивной мощности (коэффициент мощности вентильных преобразователей прокатных станов колеблется от 0,3 до 0,8), что вызывает значительные отклонения напряжения в питающей сети; коэффициент несинусоидальности при работе тиристорных преобразователей прокатных станов может достигать значения более 30 % на стороне 10 кВ питающего их напряжения, на симметрию напряжения в силу симметричности их нагрузок вентильные преобразователи не влияют .

Электросварочные установки могут являться причиной нарушения нормальных условий работы для других ЭП. В частности, сварочные агрегаты, мощность которых в настоящее время достигает 1500 кВт в единице, вызывают значительно большие колебания напряжения в электрических сетях, чем, например, пуск асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Кроме того, эти колебания напряжения происходят длительно

и с широким диапазоном частот, в том числе и в самом неприятном для установок **электрического освещения** диапазоне (порядка 10 Гц).

Электротермические установки в зависимости от метода нагрева делятся на группы: дуговые печи, печи сопротивления прямого и косвенного действия, электронные плавильные печи, вакуумные, шлакового переплава, индукционные печи. Данная группа ЭП также оказывает неблагоприятное влияние на питающую сеть, например, дуговые печи, которые могут иметь мощность до 10 МВт, в настоящее время сооружаются как однофазные. Это приводит к нарушению симметрии токов и напряжений (последнее происходит в связи с падениями напряжения на сопротивлениях сети от токов разных последовательностей). Кроме того, дуговые печи, как и вентильные установки, являются нелинейными ЭП с малой инерционностью. Поэтому они приводят к несинусоидальности токов, а, следовательно, и напряжений.

Современная электрическая нагрузка квартиры (коттеджа) характеризуется широким спектром бытовых ЭП, которые по их назначению и влиянию на электрическую сеть можно разделить на следующие группы: **пассивные потребители активной мощности** (лампы накаливания, нагревательные элементы утюгов, плит, обогревателей); ЭП с **асинхронными двигателями**, работающими в **трехфазном режиме** (привод лифтов, насосов - в системе водоснабжения и отопления и др.); ЭП с **асинхронными двигателями**, работающими в **однофазном режиме** (привод компрессоров холодильников, стиральных машин и др.); ЭП с **коллекторными двигателями** (привод пылесосов, электродрелей и др.); **сварочные агрегаты переменного и постоянного тока** (для ремонтных работ в мастерской и др.); **выпрямительные устройства** (для зарядки аккумуляторов и др.); **радиоэлектронная аппаратура** (телевизоры, компьютерная техника и др.); **высокочастотные установки** (печи СВЧ и др.); **лампы люминесцентного освещения**.

Воздействие каждого отдельно взятого бытового ЭП незначительно, совокупность же ЭП, подключаемых к шинам 0,4 кВ трансформаторной подстанции, оказывает существенное влияние на питающую сеть.

2 Влияние отклонений напряжения

Отклонения напряжения оказывают значительное влияние на работу **асинхронных двигателей** (АД), являющихся наиболее распространенными приемниками электроэнергии в промышленности.

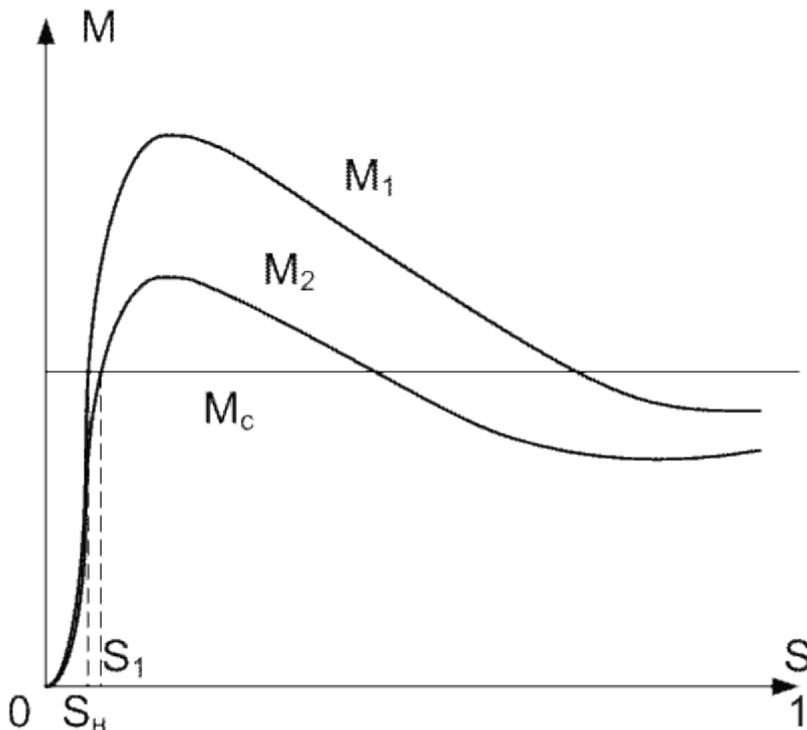


Рис.1. Механическая характеристика двигателя при номинальном (M_1) и пониженном (M_2) напряжениях.

При изменении напряжения изменяется механическая характеристика АД – зависимость его вращающего момента M от скольжения s или частоты вращения (рис.1). С достаточной точностью можно считать, что вращающий момент двигателя пропорционален квадрату

напряжения на его выводах. При снижении напряжения уменьшается вращающий момент и частота вращения ротора двигателя, так как увеличивается его скольжение. Снижение частоты вращения зависит также от закона изменения момента сопротивления M_c (на рис 1 M_c принят постоянным) и от загрузки двигателя. Зависимость частоты вращения ротора двигателя от напряжения можно выразить:

$$n = n_c \left(1 - k_3 \frac{U_{ном}^2}{U^2} S_{ном} \right)$$

где n_c – синхронная частота вращения;

k_3 – коэффициент загрузки двигателя;

$U_{ном}, S_{ном}$ – номинальные значения напряжения и скольжения соответственно.

Из формулы (1) видно, что при малых нагрузках двигателя частота вращения ротора будет больше номинальной частоты вращения (при номинальной нагрузке двигателя). В таких случаях понижения напряжения не приводят к уменьшению производительности технологического оборудования, так как снижения частоты вращения двигателей ниже номинальной не происходит.

Для двигателей, работающих с полной нагрузкой, понижение напряжения приводит к уменьшению частоты вращения. Если производительность механизмов зависит от частоты вращения двигателя, то на выводах таких двигателей рекомендуется поддерживать напряжение не ниже номинального. При значительном снижении напряжения на выводах двигателей, работающих с полной нагрузкой, момент сопротивления механизма может превысить вращающий момент, что приводит к “опрокидыванию” двигателя, т.е. к его остановке. Во избежание повреждений двигатель необходимо отключить от сети.

Снижение напряжения ухудшает и условия пуска двигателя, так как при этом уменьшается его пусковой момент.

Практический интерес представляет зависимость потребляемой двигателем активной и реактивной мощности от напряжения на его выводах.

В случае снижения напряжения на зажимах двигателя реактивная мощность намагничивания уменьшается (на 2 – 3 % при снижении напряжения на 1 %), при той же потребляемой мощности увеличивается ток двигателя, что вызывает перегрев изоляции.

Если двигатель длительно работает при пониженном напряжении, то из-за ускоренного износа изоляции срок службы двигателя уменьшается. Приблизительно срок службы изоляции T можно определить по формуле:

$$T = \frac{T_{ном}}{R} \quad (2)$$

где $T_{ном}$ – срок службы изоляции двигателя при номинальном напряжении и номинальной нагрузке;

R – коэффициент, зависящий от значения и знака отклонения напряжения, а также от коэффициента загрузки двигателя и равный:

$$R = (47\delta U^2 - 7.55\delta U + 1)k_3^2, \text{ при } -0,2 < \delta U < 0; \quad (3)$$

$$R = k_3^2 \text{ при } 0,2 \geq \delta U > 0; \quad (4).$$

Поэтому с точки зрения нагрева двигателя более опасны в рассматриваемых пределах отрицательные отклонения напряжения.

Снижение напряжения приводит также к заметному росту реактивной мощности, теряемой в реактивных сопротивлениях рассеяния линий, трансформаторов и АД.

Повышение напряжения на выводах двигателя приводит к увеличению потребляемой им реактивной мощности. При этом удельное потребление реактивной мощности растет с уменьшением коэффициента загрузки двигателя. В среднем на каждый процент повышения напряжения потребляемая реактивная мощность увеличивается на 3 % и более (в основном за счет увеличения тока холостого хода двигателя), что в свою очередь приводит к увеличению потерь активной мощности в элементах электрической сети.

Лампы накаливания характеризуются номинальными параметрами: потребляемой мощностью $P_{ном}$, световым потоком $F_{ном}$, световой отдачей $\eta_{ном}$ (равной отношению

излучаемого лампой светового потока к ее мощности) и средним номинальным сроком службы $T_{ном}$. Эти показатели в значительной мере зависят от напряжения на выводах ламп накаливания. При отклонениях напряжения на 10% эти характеристики приближенно можно описать следующими эмпирическими формулами:

$$P_{o.e.} = \frac{P}{P_{ном}} = \left(\frac{U}{U_{ном}}\right)^{1.53} \quad (5)$$

$$F_{o.e.} = \frac{F}{F_{ном}} = \left(\frac{U}{U_{ном}}\right)^{3.67} \quad (6)$$

$$T_{o.e.} = \frac{T}{T_{ном}} = \left(\frac{U}{U_{ном}}\right)^{-14.8} \quad (7)$$

$$\eta_{o.e.} = \frac{\eta}{\eta_{ном}} = \left(\frac{U}{U_{ном}}\right)^{2.14} \quad (8)$$

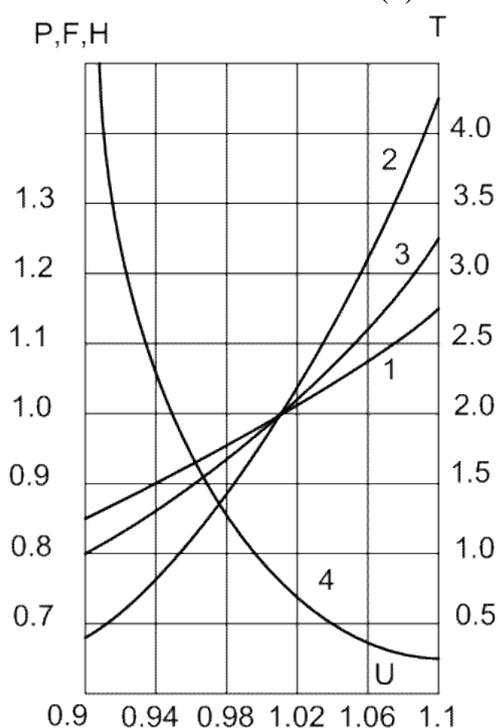


Рис.2. Зависимости характеристик лампы накаливания от напряжения: 1 – потребляемая мощность, 2 – световой поток, 3 – световая отдача, 4 – срок службы.

Из кривых на рис.2. видно, что со снижением напряжения наиболее заметно падает световой поток. При повышении напряжения сверх номинального увеличивается световой поток F , мощность лампы P и световая отдача η , но резко снижается срок службы ламп T и в результате они быстро перегорают. При этом имеет место и перерасход электроэнергии. Изменения напряжения приводят к соответствующим изменениям светового потока и освещенности, что, в конечном итоге, оказывает влияние на производительность труда и утомляемость человека.

Люминесцентные лампы менее чувствительны к отклонениям напряжения. При повышении напряжения потребляемая мощность и световой поток увеличиваются, а при снижении – уменьшаются, но не в такой степени как у ламп накаливания. При пониженном напряжении условия зажигания люминесцентных ламп ухудшаются, поэтому срок их службы, определяемый распылением оксидного покрытия электродов, сокращается как при отрицательных, так и при положительных отклонениях напряжения.

При отклонениях напряжения на 10% срок службы люминесцентных ламп в среднем снижается на 20 – 25%. Существенным недостатком люминесцентных ламп является потребление ими реактивной мощности, которая растет с увеличением подводимого к ним напряжения.

Отклонения напряжения отрицательно влияют на качество работы и срок службы бытовой **электронной техники** (радиоприемники, телевизоры, телефонно-телеграфная связь, компьютерная техника).

Вентильные преобразователи обычно имеют систему автоматического регулирования постоянного тока путем фазового управления. При повышении напряжения в сети угол регулирования автоматически увеличивается, а при понижении напряжения уменьшается. Повышение напряжения на 1 % приводит к увеличению потребления реактивной мощности преобразователем примерно на 1-1,4%, что приводит к ухудшению коэффициента мощности. В то же время другие показатели вентильных преобразователей с повышением напряжения улучшаются, и поэтому выгодно повышать напряжение на их выводах в пределах допустимых значений.

Электрические печи чувствительны к отклонениям напряжения. Понижение напряжения электродуговых печей, например, на 7 % приводит к удлинению процесса плавки стали в 1,5 раза. Повышение напряжения выше 5% приводит к перерасходу электроэнергии.

Отклонения напряжения отрицательно влияют на работу **электросварочных машин**: например, для машин точечной сварки при изменении напряжения на 15% получается 100 % - ный брак продукции.

3 Влияние колебаний напряжения

К числу ЭП, чрезвычайно чувствительных к колебаниям напряжения относятся **осветительные приборы, особенно лампы накаливания и электронная техника.**

Стандартом определяется воздействие колебаний напряжения на осветительные установки, влияющие на зрение человека. Мигание источников освещения (фликер-эффект) вызывает неприятный психологический эффект, утомление зрения и организма в целом. Это ведет к снижению производительности труда, а в ряде случаев и к травматизму.

Наиболее сильное воздействие на глаз человека оказывают мигания с частотой 3 - 10 Гц, поэтому допустимые колебания напряжения в этом диапазоне минимальны - менее 0,5 % .

При одинаковых колебаниях напряжения отрицательное влияние ламп накаливания проявляется в значительно большей мере, чем газоразрядных ламп. Колебания напряжения более 10 % могут привести к погасанию газоразрядных ламп. Зажигание их в зависимости от типа ламп происходит через несколько секунд и даже минут.

Колебания напряжения нарушают нормальную работу и уменьшают срок службы **электронной аппаратуры**: радиоприемников, телевизоров, телефонно-телеграфной связи, компьютерной техники, рентгеновских установок, радиостанций, телевизионных станций и т.д.

При значительных колебаниях напряжения (более 15%) могут быть нарушены условия нормальной работы **электродвигателей**, возможно отпадание контактов магнитных пускателей с соответствующим отключением работающих двигателей.

Колебания напряжения с размахом 10 – 15 % могут привести к выходу из строя **батарей конденсаторов**, а также **вентильных преобразователей.**

Влияние колебаний напряжения на отдельные приемники электроэнергии изучены еще недостаточно. Это затрудняет технико - экономический анализ при проектировании и эксплуатации систем электроснабжения с резко переменными нагрузками.

4 Влияние несимметрии напряжений

Несимметрия напряжений, как уже отмечалось, вызывается чаще всего наличием несимметричной нагрузки. Несимметричные токи нагрузки, протекающие по элементам системы электроснабжения, вызывают в них несимметричные падения напряжения. Вследствие этого на выводах ЭП появляется несимметричная система напряжений. Отклонения напряжения у ЭП перегруженной фазы могут превысить нормально допустимые значения, в то время как отклонения напряжения у ЭП других фаз будут находиться в нормируемых пределах. Кроме ухудшения режима напряжения у ЭП при несимметричном режиме существенно ухудшаются условия работы как самих ЭП, так и всех элементов сети, снижается надежность работы электрооборудования и системы электроснабжения в целом.

Качественно отличается действие несимметричного режима по сравнению с симметричным для таких распространенных трехфазных ЭП, как **асинхронные двигатели.** Особое

значение для них имеет напряжение обратной последовательности. Сопротивление обратной последовательности электродвигателей примерно равно сопротивлению заторможенного двигателя и, следовательно, в 5 – 8 раз меньше сопротивления прямой последовательности. Поэтому даже небольшая несимметрия напряжений вызывает значительные токи обратной последовательности. Токи обратной последовательности накладываются на токи прямой последовательности и вызывают дополнительный нагрев статора и ротора (особенно массивных частей ротора), что приводит к ускоренному старению изоляции и уменьшению располагаемой мощности двигателя (уменьшению к.п.д. двигателя). Так, срок службы полностью загруженного асинхронного двигателя, работающего при несимметрии напряжения 4%, сокращается в 2 раза. При несимметрии напряжения 5% располагаемая мощность двигателя уменьшается на 5 – 10%.

При несимметрии напряжений сети в **синхронных машинах** наряду с возникновением дополнительных потерь активной мощности и нагревом статора и ротора могут возникнуть опасные вибрации в результате появления знакопеременных вращающих моментов и тангенциальных сил, пульсирующих с двойной частотой сети. При значительной несимметрии вибрация может оказаться опасной, а в особенности при недостаточной прочности и наличии дефектов сварных соединений. При несимметрии токов, не превышающей 30%, опасные перенапряжения в элементах конструкций, как правило, не возникают.

Правила технической эксплуатации электрических сетей и станций указывают, что “длительная работа генераторов и синхронных компенсаторов при неравных токах фаз допускается, если разница токов не превышает 10% номинального тока статора для турбогенераторов и 20% для гидрогенераторов. При этом токи в фазах не должны превышать номинальных значений. Если эти условия не выполняются, то необходимо принимать специальные меры по уменьшению несимметрии”.

В случае наличия токов обратной и нулевой последовательности увеличиваются суммарные токи в отдельных фазах элементов сети, что приводит к увеличению потерь активной мощности и может быть недопустимо с точки зрения нагрева. Токи нулевой последовательности протекают постоянно через заземлители. При этом дополнительно высушивается и увеличивается сопротивление заземляющих устройств. Это может быть недопустимым с точки зрения работы релейной защиты, а также из-за усиления воздействия на низкочастотные установки связи и устройства железнодорожной блокировки.

Несимметрия напряжения значительно ухудшает режимы работы многофазных **вентильных выпрямителей**: значительно увеличивается пульсация выпрямленного напряжения, ухудшаются условия работы системы импульсно-фазового управления тиристорных преобразователей.

Конденсаторные установки при несимметрии напряжений неравномерно загружаются реактивной мощностью по фазам, что делает невозможным полное использование установленной конденсаторной мощности. Кроме того, конденсаторные установки в этом случае усиливают уже существующую несимметрию, так как выдача реактивной мощности в сеть в фазе с наименьшим напряжением будет меньше, чем в остальных фазах (пропорционально квадрату напряжения на конденсаторной установке).

Несимметрия напряжений значительно влияет и на однофазные ЭП, если фазные напряжения неравны, то, например, лампы накаливания, подключенные к фазе с более высоким напряжением, имеют больший световой поток, но значительно меньший срок службы по сравнению с лампами, подключенными к фазе с меньшим напряжением. Несимметрия напряжений усложняет работу релейной защиты, ведет к ошибкам при работе счетчиков электроэнергии и т.д.

5 Влияние несинусоидальности напряжения

ЭП с нелинейными вольт-амперными характеристиками потребляют из сети несинусоидальные токи при подведении к их зажимам синусоидального напряжения. Токи высших гармоник, проходя по элементам сети, создают падения напряжения в сопротивлениях этих элементов и, накладываясь на основную синусоиду напряжения, приводят к искажениям формы кривой напряжения в узлах электрической сети. В связи с этим ЭП с нелинейной вольт-амперной характеристикой часто называют источниками высших гармоник.

Наиболее серьезные нарушения КЭ в электрической сети имеют место при работе мощных управляемых **вентильных преобразователей**. При этом порядок высших гармонических составляющих тока и напряжения в сети определяется по формуле

$$n = mk \pm 1$$

где **m** – число фаз выпрямления;

k – последовательный ряд натуральных чисел (0,1,2 ...).

В зависимости от схемы выпрямления **вентильные преобразователи** генерируют в сеть следующие гармоники тока: при 6-фазной схеме – до 19-го порядка; при 12-фазной схеме – до 25-го порядка включительно.

Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения в сетях с **электродуговыми сталеплавильными и руднотермическими печами** определяется в основном 2, 3, 4, 5, 7-й гармониками.

Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения **установок дуговой и контактной сварки** определяется в основном 5, 7, 11, 13-й гармониками.

Токи 3-й и 5-й гармоник **газоразрядных ламп** составляют 10 и 3 % от тока 1-й гармоники. Эти токи совпадают по фазе в соответствующих линейных проводах сети и, складываясь в нулевом проводе сети 380/220 В, обуславливают ток в нем, почти равный току в фазном проводе. Остальными гармониками для газоразрядных ламп можно пренебречь.

Исследования кривой тока намагничивания **трансформаторов**, включенных в сеть синусоидального напряжения, показали, что при трехстержневом сердечнике и соединениях обмоток U/U; и /U; в электрической сети имеются все нечетные гармоники, в том числе гармоники, кратные трем. Гармоники, кратные трем, обусловлены несимметрией намагничивающих токов по фазам:

$$I_{\mu A} = I_{\mu C} \approx 1.5 I_{\mu B} \quad (10)$$

Действующее значение намагничивающего тока трансформатора:

$$I_{\mu} = (I_{\mu A} + I_{\mu B} + I_{\mu C}) / 3 \quad (11)$$

Токи намагничивания образуют системы токов прямой и обратной последовательности, которые по абсолютной величине одинаковы для гармоник, кратных трем. Для других нечетных гармоник токи обратной последовательности составляют около 0,25 токов прямой последовательности.

Если на вводы трансформаторов подается несинусоидальное напряжение возникают дополнительные составляющие высших гармоник тока. Трансформаторы ГПП дают 5-ю гармонику небольшой величины.

В целом несинусоидальные режимы обладают теми же недостатками, что и несимметричные.

Высшие гармоники тока и напряжения вызывают дополнительные потери активной мощности во всех элементах системы электроснабжения: в **линиях электропередачи, трансформаторах, электрических машинах, статических конденсаторах**, так как сопротивления этих элементов зависят от частоты.

Так, например, емкостное сопротивление конденсаторов, устанавливаемых в целях компенсации реактивной мощности, с повышением частоты подводимого напряжения уменьшается. Поэтому, если в напряжении питающей сети есть высшие гармоники, то сопротивление конденсаторов на этих гармониках оказывается значительно ниже, чем на частоте 50 Гц. Из-за этого в конденсаторах, предназначенных для компенсации реактивной мощности, даже небольшие напряжения высших гармоник могут вызвать значительные токи гармоник. На предприятиях с большим удельным весом нелинейных нагрузок батареи конденсаторов работают плохо. Они или отключаются защитой от перегрузки по току или за короткий срок выходят из строя из-за вспучивания банок (или ускоренного старения изоляции). Известны случаи, когда на предприятиях с развитой кабельной сетью напряжением 6–10 кВ батареи конденсаторов оказываются в режиме резонанса токов (или близких к этому режиму) на частоте какой – либо из гармоник, что приводит к опасной перегрузке их по току.

Высшие гармоники вызывают:

- паразитные поля и электромагнитные моменты в **синхронных и асинхронных двигателях**, которые ухудшают механические характеристики и КПД машины. В

результате необратимых физико-химических процессов, протекающих под воздействием полей высших гармоник, а также повышенного нагрева токоведущих частей наблюдается:

- ускоренное старение изоляции электрических машин, трансформаторов, кабелей;
- ухудшение коэффициента мощности ЭП;
- ухудшение или нарушение работы **устройств автоматики, телемеханики, компьютерной техники и других устройств с элементами электроники**;
- погрешности измерений **индукционных счетчиков электроэнергии**, которые приводят к неполному учету потребляемой электроэнергии;
- нарушение работы самих **вентильных преобразователей** при высоком уровне высших гармонических составляющих.
- Наличие высших гармоник неблагоприятно сказывается на работе не только электрооборудования потребителей, но и **электронных устройствах в энергосистемах**.
- Для некоторых установок (система импульсно-фазового управления вентильными преобразователями, комплектные устройства автоматики и др.) допустимые значения отдельных гармоник тока (напряжения) указываются изготовителем в паспорте изделия.

Кривая напряжения, подводимого к ЭП, не должна содержать высших гармоник в установившемся режиме работы электросети. Следует подчеркнуть, что в условиях работы ЭП, несинусоидальность напряжения проявляется совместно с действиями других влияющих факторов и поэтому необходимо рассматривать всю совокупность факторов совместно.

6 Влияние отклонения частоты

Жесткие требования стандарта к отклонениям частоты питающего напряжения обусловлены значительным влиянием частоты на режимы работы электрооборудования, ход технологических процессов производства и, как следствие, технико-экономические показатели работы промышленных предприятий.

Электромагнитная составляющая ущерба обусловлена увеличением потерь активной мощности в электрических сетях и ростом потребления активной и реактивной мощностей. Известно, что снижение частоты на 1 % увеличивает потери в электрических сетях на 2 % . Технологическая составляющая ущерба вызвана в основном недовыпуском промышленными предприятиями своей продукции и стоимостью дополнительного времени работы предприятия для выполнения задания. Согласно экспертным оценкам значение технологического ущерба на порядок выше электромагнитного.

Анализ работы предприятий с непрерывным циклом производства показал, что большинство основных технологических линий оборудовано механизмами с постоянным и вентиляторным моментами сопротивлений, а их приводами служат **асинхронные двигатели**. Частота вращения роторов двигателей пропорциональна изменению частоты сети, а производительность технологических линий зависит от частоты вращения двигателя.

Степень влияния частоты на производительность ряда механизмов может быть выражена через потребляемую ими активную мощность:

$$P = af^n \quad (4)$$

где a - коэффициент пропорциональности, зависящий от типа механизма;

f - частота сети;

n – показатель степени.

В зависимости от значений показателя степени n , ЭП можно разбить на следующие группы:

1. механизмы с постоянным моментом сопротивления - поршневые насосы, компрессоры, металлорежущие станки и др.; для них $n=1$;
2. механизмы с вентиляторным моментом сопротивления - центробежные насосы, вентиляторы, дымососы и др.; для них $n=3$; на ТЭС, КЭС, АЭС обычно это двигатели насосов питательной воды, циркуляционных насосов, дымовых вентиляторов, маслонасосов и т. д.
3. механизмы, для которых $n=3,5-4$ - центробежные насосы, работающие с большим статическим напором (противодавлением), например, питательные насосы котельных .

ЭП 2-й и 3-й групп, наиболее подверженные влиянию частоты, имеют регулировочные возможности, благодаря которым потребляемая ими мощность из сети остается практически неизменной.

Наиболее чувствительны к понижению частоты **двигатели собственных нужд электростанций**. Снижение частоты приводит к уменьшению их производительности, что сопровождается снижением располагаемой мощности генераторов и дальнейшим дефицитом активной мощности, и снижением частоты (имеет место лавина частоты).

Такие ЭП, как **лампы накаливания, печи сопротивления, дуговые электрические печи** на изменение частоты практически не реагируют.

Отклонения частоты отрицательно влияют на работу **электронной техники**: отклонение частоты более +0,1 Гц приводит к яркостным и геометрическим фоновым искажениям телевизионного изображения, изменения частоты от 49,9 до 49,5 Гц влечет за собой почти четырехкратное увеличение допустимого размаха телевизионного сигнала к фоновой помехе. Изменение частоты до 49,5 Гц требует существенного ужесточения требований к отношению сигнал/фоновая помеха во всех звеньях телевизионного тракта – от оборудования аппаратно-студийного комплекса до телевизионного приемника, выполнение которых сопряжено со значительными материальными затратами.

Кроме этого, пониженная частота в электрической сети влияет и на срок службы оборудования, содержащего элементы со сталью (электродвигатели, трансформаторы, реакторы со стальным магнитопроводом), за счет увеличения тока намагничивания в таких аппаратах и дополнительного нагрева стальных сердечников.

Для предотвращения общесистемных аварий, вызванных снижением частоты предусматриваются специальные устройства автоматической частотной разгрузки (АЧР), отключающие часть менее ответственных потребителей. После ликвидации дефицита мощности, например, после включения резервных источников, специальные устройства частотного автоматического повторного включения (ЧАПВ) включают отключенных потребителей, и нормальная работа системы восстанавливается.

Поддержание нормальной частоты, соответствующей требованиям стандарта является технической, а не научной задачей, основной путь решения которой – ввод генерирующих мощностей с целью создания резервов мощности в сетях энергоснабжающих организаций.

7 Влияние электромагнитных помех

В системах электроснабжения общего назначения нашли широкое применение электронные и микроэлектронные системы управления, микропроцессоры и ЭВМ, что привело к снижению уровня помехоустойчивости систем управления ЭП и резкому возрастанию количества их отказов. Основной причиной отказов является воздействие электромагнитных переходных помех, возникающих при электромагнитных переходных процессах как в сетях энергосистем, так и в городских, и промышленных электрических сетях. Длительность протекания переходных процессов составляет от нескольких периодов тока промышленной частоты до нескольких секунд, а эффективная полоса частот помех может достигать десятков мегагерц.

Характеристикой электромагнитных переходных помех являются провалы и импульсы напряжения, кратковременные перенапряжения. Для этих ПКЭ стандарт не устанавливает допустимых численных значений, однако, рассматривает эти помехи в рамках проблемы электромагнитной совместимости.

Электромагнитные переходные помехи, сопровождающиеся провалами напряжения, возникают, в основном, при однофазных коротких замыканиях воздушных линий вследствие перекрытия изоляции. Эти повреждения либо самоликвидируются, либо устраняются при кратковременном отключении с последующим автоматическим повторным включением (АПВ). Кроме того, причиной возникновения провалов напряжения являются междуфазные замыкания, возникающие в результате атмосферных явлений, а также отключения питающих линий и конденсаторов. Количество провалов напряжения с глубиной до 20 % достигает в распределительных сетях 55 – 60 %. Свыше 60 % остановов механизмов приходится на провалы напряжения с глубиной более 20 %.

Причиной возникновения электромагнитных переходных помех в системах электроснабжения общего назначения могут быть перенапряжения, возникающие при

однофазных замыканиях на землю, при коммутациях батарей конденсаторов и резонансных фильтров, при отключении ненагруженных кабельных линий и трансформаторов, при одновременной коммутации контактов выключателей и другой коммутационной аппаратуры, при неполнофазных режимах работы электрической сети вследствие различных причин, приводящих к феррорезонансным явлениям. Восприимчивость электронного оборудования и ЭВМ к перенапряжениям зависит как от АЧХ ЭП, так и от АЧХ электромагнитных помех.

Увеличение мощности энергосистем и количества воздушных линий, применяемых для повышения надежности электроснабжения промышленных предприятий, приводит к снижению надежности функционирования сложных электронных систем управления и возрастанию числа отказов помехочувствительных ЭП.

Как уже отмечалось, при значениях всех ПКЭ по напряжению, отличных от нормируемых, происходит ускоренное старение изоляции электрооборудования, в результате возрастает интенсивность потоков отказов с течением времени. Так, при несинусоидальности кривой напряжения сети даже при резонансной настройке дугогасящих аппаратов, через место замыкания на землю проходит ток высших гармоник, и может произойти прожигание кабеля в месте первого повреждения. В этом случае возможно возникновение, как показывает опыт эксплуатации, одновременно двух и более аварий из-за перенапряжений. При низком КЭ имеет место взаимозависимость отказов элементов, например, когда отрицательное влияние нелинейных, несимметричных и ударных нагрузок скомпенсировано с помощью соответствующих корректирующих устройств при отключении того или иного устройства. Так, выход из строя быстродействующего статического компенсатора вызывает появление несимметрии, колебаний и гармоник напряжения, которые ранее компенсировались, что, в свою очередь, чревато возникновением ложных срабатываний релейных защит, аварийным выходом из строя некоторых видов электрооборудования и другими аналогичными отрицательными последствиями. Сбои в каналах передачи информации по силовым цепям при наличии гармоник приводят к подаче неправильных команд на управление коммутационной аппаратурой. Таким образом, КЭ существенно влияет на надёжность электроснабжения, поскольку аварийность в сетях с низким КЭ выше, чем в случае, когда ПКЭ находятся в допустимых пределах.

Реактивная энергия, производимая в сети в единицу времени, может считаться реактивной мощностью. Вычисляется она так же, как и активная – произведением реактивной составляющей тока на напряжение.

Реактивной же составляющей тока является та, которая не совпадает с напряжением по своей фазе. Величина «несовпадения» характеризуется углом сдвига фаз. В случае с чистой индуктивностью сдвиг фаз составляет максимум – 90°. Это означает, что когда напряжение достигает самого большого своего значения, ток только начинает расти.

А если в цепи расположен конденсатор (ёмкость), то напряжение, напротив, будет отставать от тока на 90 градусов по причине того, что для возникновения падения напряжения конденсатору требуется зарядить свои обкладки.

Точно так же источник и конденсатор в одной цепи будут обмениваться реактивной энергией, которая ни на что не будет тратиться.

В реальной цепи не бывает чисто активной или чисто реактивной нагрузки, поэтому полная мощность всегда состоит из активной и реактивной составляющей, а угол сдвига фаз находится в пределах между нулем и 90°.

Реактивная составляющая тока равна его произведению на синус угла сдвига фаз, а активная – произведению на косинус этого угла:

$$Q = I \cdot \sin \varphi; P = I \cdot \cos \varphi$$

Полную мощность можно найти по теореме Пифагора:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2};$$

При этом, реактивную мощность, в отличие от активной, нельзя исчислять в ваттах, потому что она неэффективна. Поэтому для реактивной мощности придумали особую единицу измерения – вольт-амперы реактивные (ВАРы). А полная измеряется в вольт-амперах, без уточнения характера нагрузки.