

Основные направления энергосбережения на предприятии и оборудование, используемое для энергосбережения

Компенсация реактивной мощности

Все потребители электроэнергии на предприятии, а также средства преобразования электроэнергии (асинхронные двигатели, трансформаторы, различные типы преобразователей) в своем режиме сопровождаются постоянным возникновением электромагнитных полей нагружают сеть как активной, так и реактивной составляющими полной потребляемой мощности. Эта реактивная составляющая мощности (далее реактивная мощность) необходима для работы оборудования содержащего значительные индуктивности и в то же время является дополнительной нагрузкой на сеть.

Каждый генератор или трансформатор может длительно отдавать без опасности аварии только вполне определенную мощность S , равную произведению его номинального тока I на номинальное напряжение U . Произведение действующих значений тока и напряжения называется полной мощностью.

$$S = UI$$

Полная мощность представляет собой наибольшее значение активной мощности при заданных значениях тока и напряжения. Она характеризует ту наибольшую мощность, которую можно получить от источника переменного тока при условии, что между проходящим по нему током и напряжением отсутствует сдвиг фаз.

Связь между мощностями активной мощностью P , реактивной мощностью Q и полной мощностью S можно определить из векторной диаграммы напряжений (рис. 1), которая называется «треугольником мощностей».

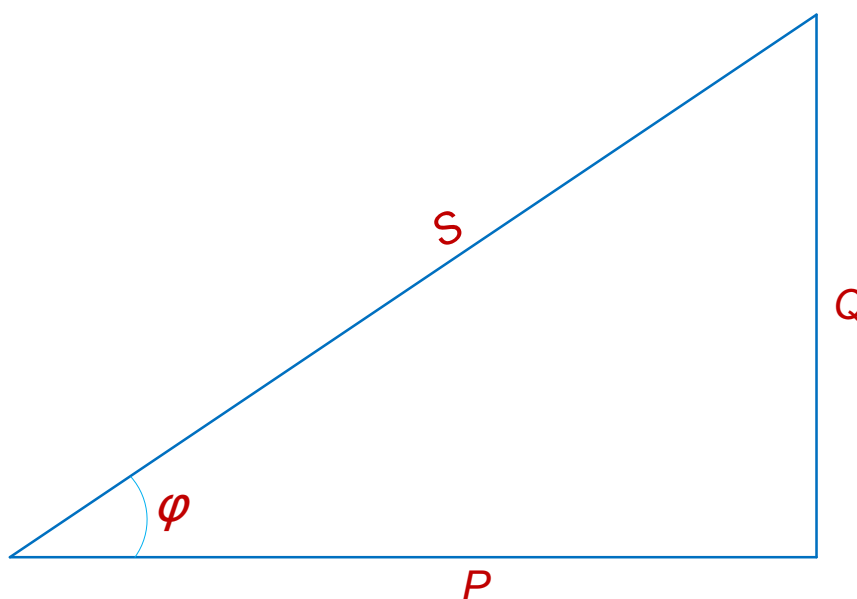


Рис. 1 Треугольник мощностей

Зависимость между активной, реактивной и полной мощностью определяется углом сдвига фаз между током и напряжением в сети, точнее – величиной косинуса этого угла – $\cos\varphi$ (коэффициент мощности).

Из треугольника мощностей следует, что при заданной полной мощности S чем больше реактивная мощность Q , которая проходит через генератор переменного тока или трансформатор, тем меньше активная мощность P , которую он может отдать приемнику.

Так при значении $\cos\varphi = 0,95$ потребляемая нагрузкой реактивная мощность составляет 33% потребляемой активной мощности, при $\cos\varphi = 0,7$ величина потребляемой реактивной мощности практически равна величине активной мощности, а при $\cos\varphi = 0,5$ превышает ее 1,7 раза, значительно увеличивая активные потери в сети.

Таким образом, реактивная мощность не позволяет полностью использовать всю расчетную мощность источников переменного тока для выработки полезно используемой электрической энергии. То же самое относится и к электрическим сетям. Ток, который можно безопасно пропускать по данной электрической сети, определяется, главным образом, поперечным сечением ее проводов. Поэтому если часть проходящего по сети тока идет на создание реактивной мощности, то должен быть уменьшен активный ток, обеспечивающий создание активной мощности, которую можно пропустить по данной сети.

Бесполезная циркуляция электрической энергии между источником переменного тока и приемником, обусловленная наличием в нем реактивных сопротивлений, требует также затраты определенного количества энергии, которая теряется в проводах всей электрической цепи. Повышенная загрузка сетей реактивным током вызывает понижение напряжения в сети, а резкие колебания значения реактивной мощности – колебания напряжения в сети. При этом у трансформаторов при уменьшении $\cos\varphi$ уменьшается пропускная способность по активной мощности вследствие увеличения реактивной нагрузки, а у электроприемников предприятия снижается производительность и даже нарушается работоспособность.

Для компенсации реактивной мощности, применяются специальные компенсирующие устройства, являющиеся источниками реактивной энергии преимущественно ёмкостного характера.

Принцип компенсации поясняется рис. 2.

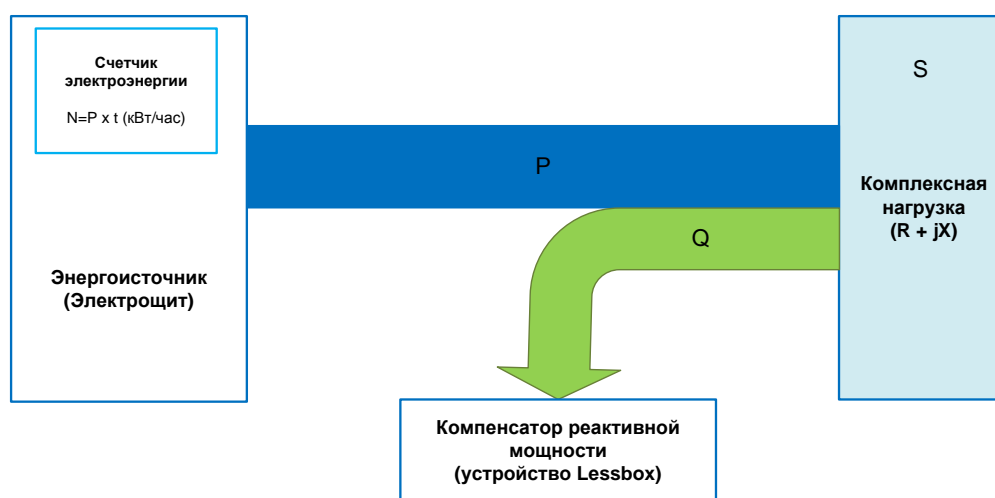


Рис. 2 Схема компенсации реактивной мощности

Реактивной мощностью, обусловленная индуктивным или емкостным характером нагрузки, компенсируются в непосредственной близости от нагрузки Q (см. рис.2), чем исключается ее негативное влияние на энергоснабжение предприятия.

Для компенсации реактивной мощности на предприятии **при индуктивном характере нагрузки** энергопотребителей применяются: **синхронные компенсаторы, электродвигатели и конденсаторные установки.**

По результатам проведенных исследований, приведенных в различных источниках установлено, что большие единичные мощности и худшие по сравнению с конденсаторными установками технико-экономические показатели в диапазоне небольших (до 10 МВА) мощностей компенсации, практически исключают использование в сетях подавляющего числа предприятий синхронных компенсаторов, а использование синхронных двигателей экономически не эффективно для низковольтных сетей (до 1000 В), а также высоковольтных сетей при потребляемых мощностях менее 1500 кВт.

Поэтому в настоящее время для компенсации реактивной мощности на предприятиях широкое использование получили **конденсаторные установки**, достоинством которых является:

- малые удельные потери активной мощности (собственные потери современных низковольтных косинусных конденсаторов не превышают 0,5 Вт на 1000 Вар, при этом в синхронных компенсаторах это значение достигает 10% номинальной мощности компенсатора, а в синхронных двигателях, работающих в режиме перевозбуждения - до 7%);

- отсутствие вращающихся частей;
- простой монтаж и эксплуатация (не нужно фундамента);
- относительно невысокие капиталовложения;
- возможность подбора любой необходимой мощности компенсации;
- возможность установки и подключения в любой точке электросети;
- отсутствие вращающихся частей и, как следствие, - шума во время работы;
- небольшие эксплуатационные затраты.

При этом используются как простые батареи косинусных конденсаторов, так и регулируемые конденсаторные установки, в которых путем отслеживания значения коэффициента мощности осуществляется его коррекция за счёт подключения или отключения необходимого числа батарей конденсаторов.

Однако при использовании конденсаторных установок (в том числе управляемых) возникает ряд проблем значительно снижающих их эксплуатационные свойства и надежность:

- *малое число ступеней коммутации и, как следствие, низкая точность компенсации;*

- *возможность «перекомпенсации» при изменении величины и характера нагрузки в сети (то есть генерация реактивной мощности емкостного характера);*

- *в регулируемых конденсаторных установках управление батареями трехфазных косинусных конденсаторов осуществляется по датчикам установленным на одной из фаз, что значительно снижает точность компенсации по другим фазам;*

- *возможность выхода из строя косинусных конденсаторов из-за наличия высокого уровня гармоник в сети при нелинейной нагрузке потребителей (импульсных стабилизаторов и преобразователей электроэнергии и т.д.), в которых возникают высшие гармоники тока, соизмеримые по своей величине с основной гармоникой;*

- *возможность выхода из строя косинусных конденсаторов из-за образования в совокупности с индуктивностью нагрузки последовательных колебательных контуров, близких по частоте резонанса к частоте одной из высших гармоник. Это приводит к значительному увеличению тока конденсаторов и существенно сокращает их срок*

службы. Перенапряжения, возникающие при резонансе на элементах конденсаторной установки и нагрузки могут привести к пробоев их изоляции;

Кроме того, конденсаторные установки практически не решают задачи уменьшения перекаса фаз функция подавления гармоник при использовании конденсаторных установок, может быть обеспечена только отдельно приобретаемым фильтром гармоник, настроенным на гармоники основной частоты (как правило, 5-ой, 7-ой, 11-ой, 13-ой).

Симметрирование фаз.

Несимметрия токов и напряжений в трехфазной сети это явление, при котором амплитуды фазных напряжений и токов не равны между собой и/или сдвинуты друг относительно друга по фазе отличной от 120 градусов. Несимметрия возникает, как правило, в результате ошибочного распределения нагрузки в фазах внутренних 3-х фазных сетей. Наиболее часто явление перекаса фаз наблюдается на крупных предприятиях, оснащённых однофазными электросварочными устройствами, индукционными, плавильными печами и иными нагревательными установками с высокой потребительской мощностью. При этом возможны 3 варианта.

1. Наиболее ярко несимметрия токов, напряжений и фаз в проявляется в трехфазной сети с изолированной нейтралью (изолированная нейтраль – нейтраль генератора или трансформатора в сетях трехфазного тока напряжением до 1 кВ, не присоединенная к заземляющему устройству или присоединенная к нему через приборы сигнализации, измерения, защиты и подобные им устройства, имеющие большое сопротивление). При различных нагрузках по фазам в нулевом проводе четырехпроводной линии появляется ток, равный геометрической сумме фазных токов. В некоторых случаях (например, при отключении нагрузки одной или двух фаз) по нулевому проводу может протекать ток, равный фазному току нагрузки, что приводит к значительному увеличению активных потерь, а также увеличению вероятности поражения электрическим током персонала эксплуатирующего оборудование. Кроме того, это может привести к разрушению нулевого провода, так как защита от токовых перегрузок нулевых проводников, как правило, не предусмотрена.

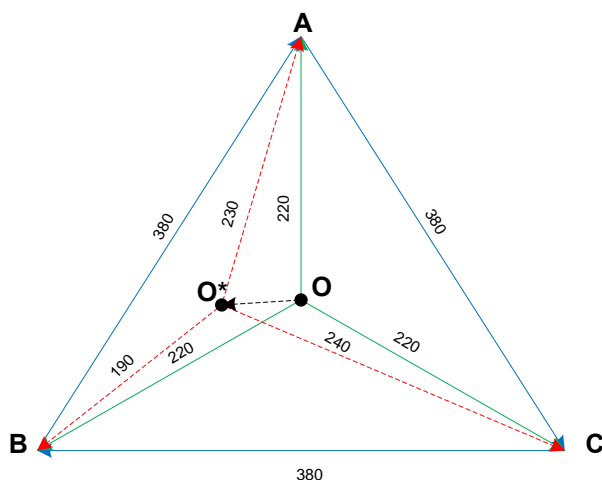


Рис. 3 Векторная диаграмма напряжений при перекасе фаз

Идеальную модель, отображающую взаимосвязь и взаиморасположение фазных и линейных напряжений в сети с изолированной нейтралью можно изобразить в виде равностороннего треугольника (рис.3) с вершинами «А», «В», «С» и центром «0». Векторы АВ, ВС и СА (лежащие на сторонах треугольника) – это линейные напряжения (380В).

Векторы (сплошные линии), проведенные из центра треугольника к его вершинам - 0А, 0В и 0С - это фазные напряжения. В идеале они равны между собой $0A=0B=0C$ и сдвинуты друг относительно друга на угол 120° , Данная модель является идеальной и перекося фазных напряжений в ней отсутствует.

Так как к сети подключают множество потребителей, в том числе однофазных, то в каждый случайный момент времени можно ожидать, что нагрузки в различных фазах будут различны.

Причем если даже однофазные нагрузки по величине одинаковы, то их включение под нагрузку или отключение не может происходить синхронно. Различие фазных нагрузок по величине и характеру создает условия для возникновения перекося фазных напряжений.

Графически это будет выглядеть следующим образом (пунктирные линии на рис. 3): точка 0 в центре треугольника, из которой исходят векторы идеальных фазных напряжений величиной 220В 0А, 0В и 0С, - смещается относительно центра треугольника в точку 0*. Смещаются и сами векторы фазных напряжений на произвольный угол друг относительно друга. Напряжение на каждой из фаз меняется с величины в 220 В, например, на 190В, 240В и 230В соответственно.

Перекося фаз (фазных напряжений) в сети с изолированной нейтралью, как правило, характеризуется неизменностью или одинаковостью линейных напряжений источника и значительным различием по величине фазных напряжений. То есть равносторонний треугольник, образуемый векторами линейных напряжений остается равносторонним треугольником, это означает, что значение трех линейных напряжений соответствует 380В, возможны незначительные отклонения значений, которые являются допустимыми.

2. В сетях с глухозаземленной нейтралью, которые применяются на напряжение до 1 кВ для одновременного питания трехфазных и однофазных нагрузок, включаемых на фазные напряжения, нейтраль трансформатора или генератора присоединяется к заземляющему устройству непосредственно или через малое сопротивление (например, через трансформатор тока). При неравномерных нагрузках по фазам, напряжение на наиболее загруженных фазах «проседает» (т.е. фазные напряжения не равны по амплитуде), но напряжение на менее загруженных фазах, если и возрастает, то очень незначительно. В связи с тем, что нейтраль надежно заземлена отсутствует и смещение нуля, характерное для сетей с изолированной нейтралью (см. рис. 3).

3. В случае обрыва нейтрали в сетях с глухозаземленной нейтралью, или значительном увеличении сопротивления заземлителя, также как в первом случае (сети с изолированной нейтралью) будут наблюдаться явления смещения нуля и изменения межфазных углов

Перекося напряжений сильно сказываются на работе оборудования.

Основную часть трехфазных потребителей (потребителей, питающихся от линейного напряжения) составляют электродвигатели. Система управления и контроля запуска таких трехфазных потребителей, как правило, подключается к фазному напряжению. При перекосях фаз система управления запуском электродвигателя, которая контролирует длительность и факт запуска, работает неустойчиво, т.е. спонтанно выдает команды на его пуск или останов. Диапазон изменения фазного напряжения жестко регламентируется эксплуатационной документацией (как правило, не допускается перекося более $\pm 7,5 \div 10 \%$ от номинала). Если перекося превысил допустимый предел, то системы

управления запуском дает сбой. При восстановлении уровня фазного напряжения происходит очередной запуск и так далее.

Известно, что режим «пуска в ход» асинхронного двигателя характеризуется кратковременной работой обмоток статора в режиме короткого замыкания. Частые повторные пуски будут вызывать значительный перегрев изоляции и существенно увеличивать электропотребление из сети. Возможные негативные последствия такого режима работы - либо отказ в запуске, либо отказ оборудования вследствие перегорания обмоток двигателя.

У однофазных потребителей низкое напряжение является причиной тусклого света осветительных приборов, длительного запуска двигательных приборов, сбоев в работе компьютеров и т.д. Высокое напряжение вызывает отказы электроприемников из-за износа изоляции, отключение их защитными устройствами, перегорание предохранителей.

По информации приведенной по результатам измерений, небольшая асимметрия напряжения (например, до 2%) на зажимах асинхронного двигателя приводит к значительному увеличению потерь мощности (до 33% в статоре и 12% в роторе), что в свою очередь, вызывает дополнительный нагрев обмоток и снижает срок службы их изоляции (на 10,8%), а при перекосах в 5% общие потери возрастают в 1,5 раза и, соответственно, растет потребляемый ток. Причем, дополнительные потери, обусловленные несимметрией напряжений, не зависят от нагрузки двигателя.

Длительная допустимая мощность для двигателей до 7 кВт при несимметрии напряжений 5% снижается по сравнению с номинальной на 10 — 15%, а при несимметрии 10% — на 25 — 45%. Еще одно отрицательное действие несимметрии напряжения выражается в возникновении дополнительной вибрации, вследствие чего сокращается срок службы отдельных деталей двигателя, в том числе и его обмотки. В симметричном режиме основная причина вибрации — неуравновешенность вращающихся частей, несоосность валов. При несимметрии напряжений возникает дополнительная вибрация, которая соизмерима или больше, чем вибрация в симметричном режиме. Суммарная вибрация может превысить допустимый уровень. Расчеты показывают, что в некоторых случаях допустимая несимметрия напряжений лимитируется не условиями нагрева, а условиями механической перегрузки при колебаниях корпуса двигателя.

Если перекос фаз невозможно обеспечить путем равномерного распределения нагрузки по фазам, и при этом его наличие приводит к нарушению технологических процессов, то его устранение обеспечивается обычно путем включения **мощного трехфазного стабилизатора напряжения** (фактически представляющего собой три самостоятельных фазных стабилизатора) или установки специального **трехфазного симметрирующего трансформатора**.

Однако включение фазных стабилизаторов фактически не решает поставленную задачу, так как они сами провоцируют несимметрию трехфазной системы. Помимо своего основного недостатка трехфазные стабилизаторы напряжения потребляют значительное количество электроэнергии и требуют значительных сервисных расходов, так как обладают низкой надежностью – и электромеханические, и электронные стабилизаторы напряжения имеют быстроизнашивающиеся и часто отказывающиеся детали. но такое решение является более дорогим

Поэтому обычно предпочтение отдается симметрирующему трансформатору. Симметрирующий трансформатор выполняет функции:

- устранение перекоса фазных напряжений,
- равномерное распределение нагрузок по фазам;
- обеспечение заданной величины фазных напряжений.

Однако включение симметрирующего трансформатора приводит к ряду дополнительных проблем:

- в связи с тем, что включение симметрирующего трансформатора производится в разрыв проводов сети, в случае выхода его из строя нарушается энергоснабжения всего предприятия;

- симметрирующий трансформатор по своему принципу должен функционировать в недогруженном режиме, что приводит к тому, что он становится мощным источником реактивной мощности индуктивного характера в сети предприятия, которую необходимо дополнительно компенсировать.

- симметрирующий трансформатор имеет значительный вес и габариты, например, симметрирующий трансформатор на 160 кВА имеет вес 250 кг, размеры 710x610x640 мм

Фильтрация высших гармоник

Решение задачи повышения производительности труда на современных промышленных предприятиях, а также интенсификация и усложнение технологических процессов привело к тому, что все большую долю в общем объеме суммарных нагрузок наряду с асинхронными двигателями занимают резкопеременные и нелинейные нагрузки мощные вентильные преобразователи, электропечные установки, сварочные комплексы и других устройства, которые при всей своей экономичности и технологической эффективности оказывают отрицательное влияние на гармонический состав напряжения в сети.

Пример фактической формы сетевого напряжения с учетом влияния высших гармоник приведен на рис. 5.

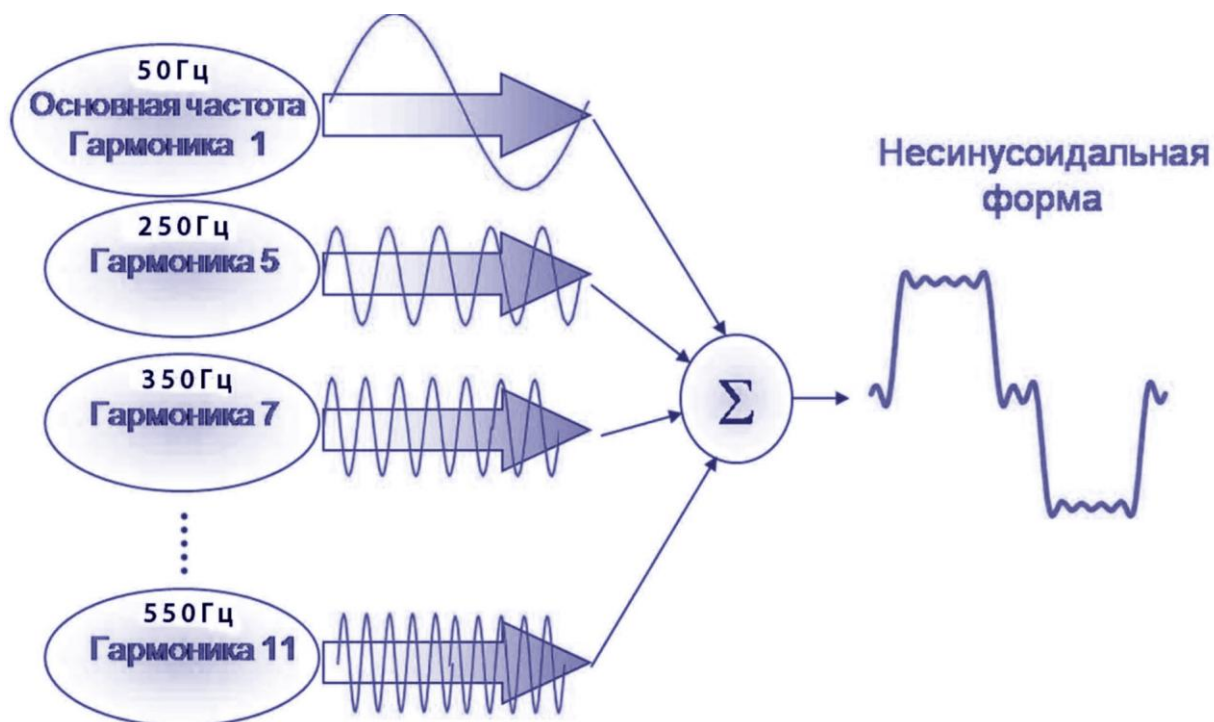


Рис. 5 Искажение формы сетевого напряжения из-за наличия гармоник

Проблемы в сети, обусловленные наличием гармоник:

- снижение вращающего момента на валу асинхронных двигателей;
- повышенные потери на перегрев двигателя и возможное повреждение изоляционных материалов;
- дополнительная вибрация в двигателях переменного тока, снижающая ресурс их эксплуатации;
- повышенные потери в обмотках и магнитопроводе трансформаторов, приводящие к выходу последних из строя;
- сокращение срока службы электрооборудования из-за интенсификации теплового и электрического старения изоляции
- появление постоянной составляющей тока или напряжения может вызвать насыщение обмоток и увеличение тока намагничивания;
- нарушение работоспособности компенсаторов реактивной мощности, перегрев косинусных конденсаторов и увеличение тока через них, что снижает срок службы.

Одним из наиболее перспективных способов уменьшения токов и напряжений высших гармоник в сетях промышленных предприятий является применение силовых фильтров высших гармоник, представляющих собой последовательное соединение индуктивного и емкостного сопротивлений, настроенных в резонанс на фильтруемую гармонику. Широкое распространение получили наборы фиксированных фильтров на 5,7,11,13 гармоники, которыми дополняются конденсаторные установки, используемые для компенсации реактивной мощности.

При этом наиболее перспективным является использование **фильтрокомпенсирующих устройств** (ФКУ), представляющие собой пассивные LC фильтры, настроенные на частоты гармоник основной частоты. Параметры фильтров подбирают таким образом, чтобы звенья были настроены в резонанс на частоты фильтруемых гармоник, а их емкости позволяли бы генерировать необходимую реактивную мощность на промышленной частоте. Достоинством ФКУ является:

- возможность компенсации заданных гармоник (выявленных по результатам обследования сети предприятия);
- возможность (ограниченная) компенсации реактивной мощности, в том числе динамической (для автоматических ФКУ).

Однако ФКУ обладают целым рядом недостатков:

- *невозможность адаптации фильтров к изменяющемуся во времени частотному спектру гармоник в сети предприятия из-за фиксированной частоты настройки;*
- *невысокое качество компенсации реактивной мощности (в том числе из-за малого числа ступеней регулирования, вследствие того, что основной задачей ФКУ является компенсация гармоник;*
- *высокая чувствительность к точности настройки. При неточной настройке звеньев, эффективность ее резко уменьшается и даже может иметь место увеличения уровня гармоник в сети.*
- *большие габариты и высокая стоимость ФКУ. Например ФКУ, настроенная на 5-ю гармонику при номинальном токе основной гармоники 240 А имеет вес 3240 кг и габариты 1450x1545x2980);*
- *отсутствие функции устранения перекоса фаз.*

Оборудование LESSBOX

Оборудование **LESSBOX** позволяет обеспечить комплексное решение задачи энергосбережения по всем указанным выше направлениям

Компенсация реактивной мощности, симметрирования фаз и подавления гармоник в сети предприятия реализованы в энергосберегающих устройствах **LESSBOX**, как **единое оригинальное техническое решение**.

Устройства **LESSBOX** содержат в своем составе батареи коммутируемых косинусных конденсаторов, широкополосные трансформаторы, быстродействующие коммутаторы, разрядники, измерители гармонического состава напряжения сети, контроллер, управляемый фильтр гармоник, измерительные трансформаторы, фазокомпенсирующие модули, измерители тока и напряжения и другие вспомогательные элементы.

Схема подключения устройства **LESSBOX** в сеть приведена на Рис 6.

После включения устройства **LESSBOX** по программе контроллера производится анализ гармонического состава сети, и вырабатываются команды коммутации для управляемого фильтра гармоник.

При этом в отличие от ФКУ, управляемые фильтры гармоник устройства **LESSBOX** автоматически адаптируют свою настройку к изменению гармонического состава сетевого напряжения (например, в связи с включением вновь приобретенного мощного оборудования с нелинейным вентильным преобразователем с изменяемым углом отсечки), при этом остаточный уровень гармоник не превышает 5%.

По завершению отработки фильтра гармоник, контроллером вырабатываются команды управления батареями косинусных конденсаторов индивидуально в каждой из фаз (в отличие от группового управления в конденсаторных установках). При этом для исключения последовательного резонанса (в цепи косинусный конденсатор – индуктивные элементы сети) и исключения перегрузки косинусных конденсаторов, контроллером производится оценка сигнала поступающего с анализатора гармонического состава сигнала, и, при необходимости, формируется команда для подключения подстроечных косинусных конденсаторов для отстройки от частоты паразитного резонанса.

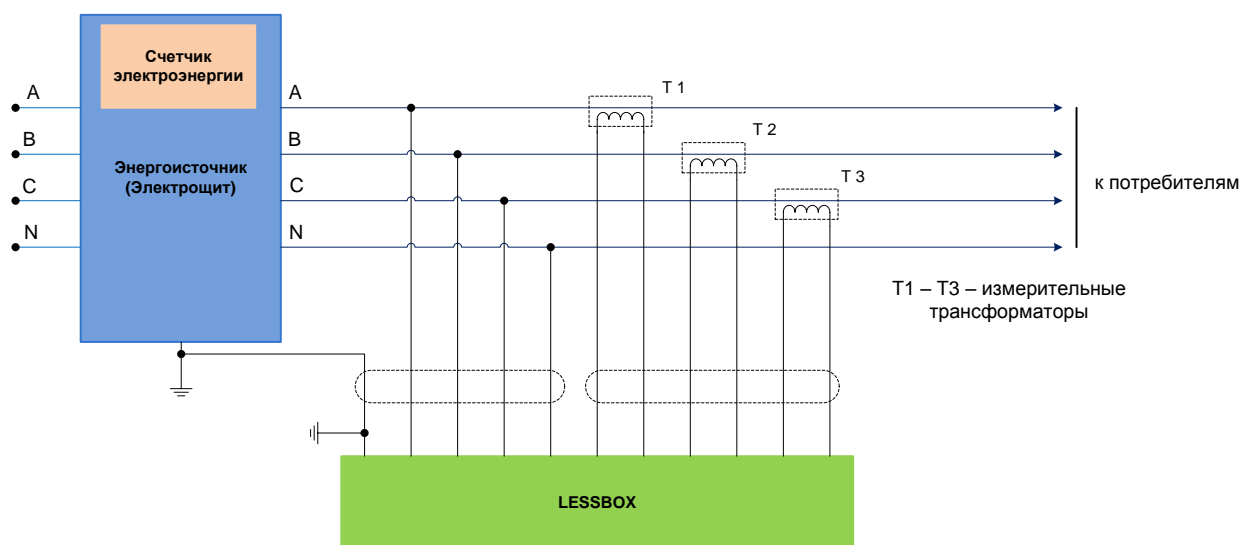


Рис. 6 Схема подключения устройства **LESSBOX** к сети предприятия

Подключение батарей косинусных конденсаторов по каждой из фаз в устройстве **LESSBOX** производится через итеративный трансформатор, что обеспечивает их дополнительную защиту от перегрузок, как по напряжению, так и по току.

Обеспечение многосторонней защиты косинусных конденсаторов в устройстве **LESSBOX** позволило сократить их габаритные размеры и увеличить число ступеней коммутации, что позволило значительно увеличить точность компенсации реактивной мощности по сравнению с современными управляемыми конденсаторными установками.

Устранение перекоса фаз в устройства **LESSBOX** обеспечивается как итеративным трансформатором включенным в каждую из фаз, так и фазокомпенсирующими модулями, включенными между фазными проводами. При этом в отличие от решения с включением симметрирующего трансформатором (или стабилизаторов напряжения), в устройств **LESSBOX** симметрирование осуществляется без разрыва сети (см. рис. 1), что значительно повышает надежность энергоснабжения предприятия.

Кроме того, устройство **LESSBOX**, обеспечивает выполнение дополнительных функций – защиту от кратковременных пиков и провалов напряжения, а также защиту от пусковых токов.

Как показали испытания устройств **LESSBOX**, их использование на предприятии позволяет экономить свыше 15% электроэнергии.