

КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ (КРМ)

Вступление. Каждый день мы используем электроэнергию. В быту, на работе, совершая звонок по мобильному или смотря телевизор. Однако большинство потребителей просто не задумываются о способах экономии и эффективном расходе электроэнергии. Иное дело – промышленность. Тут вопрос оптимизации затрат стоит чуть ли не на первом месте. В этой статье мы хотим обсудить способы экономии и оптимального использования финансовых возможностей предприятия в условиях кризиса на примере систем компенсации реактивной мощности.

Проблема компенсации реактивной мощности на основе использования постоянного тока просто не существовала, данный факт подчеркнул еще Т. Эдисон, занимавшийся электрификацией Нью-Йорка в конце XIX-го века, но она возникла одновременно с применением на практике переменного, а особенно трехфазного тока. [1]

Общий анализ проблемы. Большинство потребителей электроэнергии представляют собой электрические машины (трансформаторы, асинхронные двигатели, оборудование для дуговой сварки), в которых переменный магнитный поток связан с обмотками. Вследствие этого в обмотках при протекании переменного тока индуктируются реактивные э.д.с. обуславливающие сдвиг по фазе (φ) между напряжением и током. Такая нагрузка, помимо активной мощности потребляет и реактивную мощность, увеличивая в среднем на 20-25% полную мощность по отношению к активной.

Параметр, определяющий потребление реактивной мощности, называется $\cos(\varphi)$.

Соответственно:

$$\cos(\varphi) = P/S = P/\sqrt{P^2 + Q^2}$$

где P – активная мощность, S — полная мощность, Q - реактивная мощность, $\cos(\varphi)$ – коэффициент потребления реактивной мощности.

Таким образом снижению $\cos(\varphi)$ означает увеличение потребления реактивной мощности, соответственно нужно стремиться к увеличению $\cos(\varphi)$.

Зачем внедрять системы КРМ. Наличие в электросети реактивной мощности снижает качество электроэнергии, а именно: приводит к потерям мощности в электрических линиях, к перепадам напряжения в электрических линиях, необходимости завышения мощности силовых трансформаторов и сечения кабелей, просадкам напряжения в электросети.

Также имеет место увеличение платы за электроэнергию, что само по себе является серьезной проблемой, которая приводит к дополнительным финансовым затратам.

Применение установок компенсации реактивной мощности, (далее УКРМ), позволяет снизить объем потребляемой реактивной мощности, добиться энергосбережения и экономического эффекта, а это в свою очередь дает возможность использования сэкономленных денежных средств на улучшение и обновление необходимого промышленного оборудования.

Типы УКРМ: В качестве коммутирующего элемента в конденсаторных установках могут применяться контакторы или тиристоры. **Контакторные конденсаторные установки** получили наиболее широкое распространение в силу более простой реализации и низкой стоимости по сравнению с тиристорными (статическими) конденсаторными установками. Однако если нагрузка имеет резкопеременный характер, для компенсации реактивной мощности применяются **тиристорные конденсаторные установки**, так как они обладают наиболее высоким быстродействием. А то, что коммутация конденсаторов в тиристорных конденсаторных установках происходит при нулевом значении тока, значительно увеличивает срок службы как конденсаторных батарей, так и всей установки в целом.

По месту подключения различают следующие схемы компенсации реактивной мощности:

общая - на вводе предприятия;

групповая - на линии электроснабжения группы однотипных потребителей;

индивидуальная - конденсаторная установка устанавливается в непосредственной близости к потребителю с низким косинус φ .

Индивидуальная схема компенсации наиболее предпочтительна. Она позволяет компенсировать реактивную мощность непосредственно в месте ее возникновения, не вызывая перетока реактивной энергии в линиях электропередач и в случае неизменности коэффициента

мощности потребителя полностью компенсировать реактивную мощность с помощью конденсаторной батареи постоянной емкости.

Однако индивидуальная схема компенсации не всегда применима. Как правило на предприятии эксплуатируется много электроустановок с низким коэффициентом мощности и обеспечить их все индивидуальными конденсаторными батареями не представляется возможным. Также случаи неизменности коэффициента мощности в жизни встречаются редко, чаще всего уровень реактивной мощности зависит от режима эксплуатации электроустановки и меняется в течение суток.

Поэтому применяется смешанная схема компенсации, когда реактивная мощность наиболее крупных потребителей частично компенсируется с помощью индивидуальных конденсаторных батарей постоянной емкости, а переменный остаток их реактивной мощности а также реактивная мощность менее крупных потребителей компенсируется с помощью автоматической конденсаторной установки, подключенной на вводе предприятия.

Проблемы, возникающие вследствие эксплуатации УКРМ.

1. Гармонические искажения. В сетях электроснабжения из-за нелинейности нагрузки возникают высшие гармоники (Рис. 1. и Рис. 2.), которые являются ключевой причиной выхода из строя «конденсаторных установок». Гармоники – есть продолжительные возмущения или искажения в электрической сети, имеющие различные источники и проявления такие как импульсы, перекосы фаз, броски и провалы, которые могут быть категоризованы как переходные возмущения. Самыми опасными считаются — 3-я; 5-я; 7-я; 9-я и 12-я высшие гармоники.

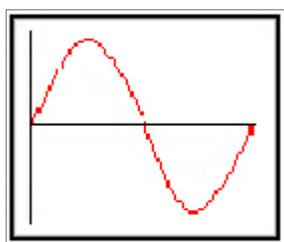


Рис. 1. Нормальная синусоида с основной частотой 50 Гц

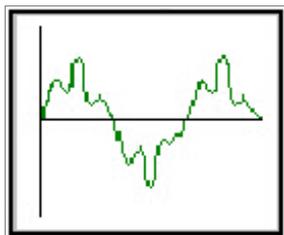


Рис. 2. Синусоида с присутствием 5 и 7 гармоникой с частотой 250 Гц

Рассмотрим более детально суть влияния высших гармоник на конденсаторные установки. Высшие гармоники тока по своей величине часто становятся соизмеримыми с основной гармоникой.

Есть много факторов, которые могут влиять на гармоническое содержание, но типичные гармонические токи, показанные как процент от фундаментального тока 50 Гц, показаны в таблице.

Другие номера гармоник также будут присутствовать, в небольшой степени, но из практических соображений они не приводятся.

Таблица 1. Гармоническое содержание синусоиды

Номер гармоники	Типичное содержание в % гармоник тока	
-	6-ти пульсный	12-ти пульсный

	выпрямитель	выпрямитель
1	100	100
5	20	-
7	14	-
11	9	9
12	8	8
17	6	-
19	5	-
23	4	4
23	4	4

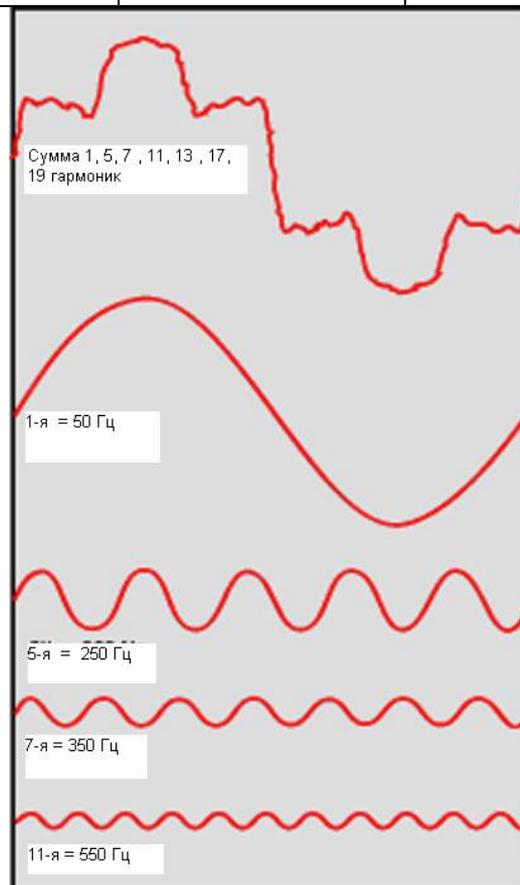


Рис. 3 Разложение формы кривой тока на гармонические составляющие

Косинусные конденсаторы установок компенсации реактивной мощности в совокупности с индуктивностью нагрузки могут образовывать колебательные контуры, близкие по частоте резонанса к частоте одной из высших гармоник. Перенапряжения, возникающие при резонансе на элементах конденсаторной установки и нагрузки могут привести к пробое изоляции.[2]

Согласно закону Ома сопротивление цепи определяет протекающий по ней ток.

Так как сопротивление источника энергии является индуктивным, кроме того, импеданс сети увеличивается с частотой, в то время как сопротивление конденсатора с ростом частоты уменьшается. Это вызывает рост тока через конденсаторы и оборудование содержащее их.

При определенных обстоятельствах, гармонические потоки могут превысить ток фундаментальной гармоники 50 Гц протекающей через конденсатор. Эти гармонические проблемы могут также вызвать увеличение напряжения на конденсаторе, которое может превысить максимально допустимое значение и привести к пробое конденсатора.

Зная исходные данные, такие как емкость конденсаторов (число включенных в работу ступеней УКРМ) и параметры силового трансформатора, можно определить номер резонансной гармоники промышленной частоты, на которой возникает резонанс:

$$n = \sqrt{\frac{100 S_{TP}}{u_{K\%} Q_{УКРМ}}},$$

где S_{TP} — номинальная мощность трансформатора, кВА;

$u_{K\%}$ — напряжение короткого замыкания трансформатора, %;

$Q_{УКРМ}$ — суммарная мощность включенных в работу ступеней УКРМ, кВАр.

Частотные преобразователи, устройства плавного пуска, асинхронные двигатели, ртутные лампы, сварочные аппараты, дуговые печи, гальваническое производство (разных видов), тяговые подстанции — все это неполный список потребителей, которые создают гармонические колебания в сети.

2. Резонанс. Резонанс — явление, возникающее на определённой частоте, когда индуктивная и ёмкостная составляющие системы уравновешены, что позволяет энергии циркулировать между магнитным полем индуктивного элемента и электрическим полем конденсатора (Рис. 4).

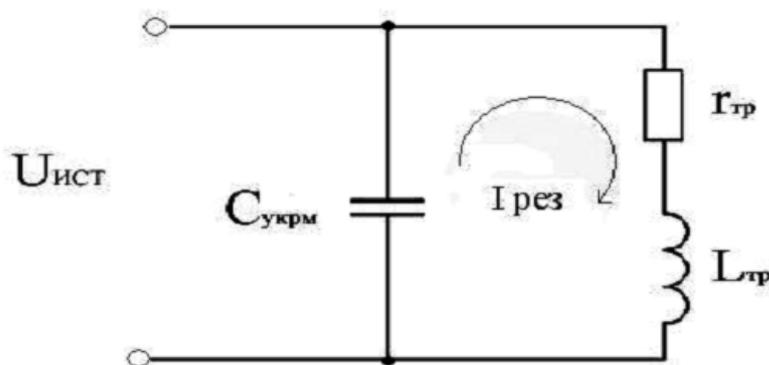


Рис. 4. Кратковременные всплески тока и напряжения

В такой цепи резонанс наступает тогда, когда суммарное реактивное сопротивление $x_{\Sigma} = x_L - x_C = 0$, или $x_L = x_C$, т.е.:

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}.$$

Из этого условия следует, что резонанс может возникнуть при изменении реактивных параметров цепи — индуктивности или емкости. Угловая частота, при которой наступает резонанс, называется резонансной угловой частотой:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Таким образом, индуктивность обмоток трансформатора, а также количество включенных конденсаторов УКРМ и определяют резонансную частоту рассматриваемой цепи.

Явления данного рода образуются при коммутации мощного оборудования, которое дает нагрузку индуктивного характера. Достаточно сильный резонанс может вывести из строя не только компенсационную установку, но и другую современную технику, которая как правило является чувствительной к всплескам в электрических сетях.

Для решения этой проблемы последовательно с каждым конденсатором ставится реактор (трехфазный дроссель) таким образом, чтобы система конденсатор-дроссель имела индуктивный характер на критических частотах, и емкостной характер на основной частоте 50 Гц. Для этого система конденсатор-дроссель должна иметь резонансную частоту ниже наименьшей частоты гармоники присутствующей в сети, которая обычно бывает 5-ой (250 Гц). Это означает, что частота настройки системы конденсатор дроссель д.б. между значениями 175...270 Гц. В системе конденсатор-дроссель напряжение основной частоты на

дросселе повышается, соответственно, мы должны использовать конденсаторы на повышенное напряжение.

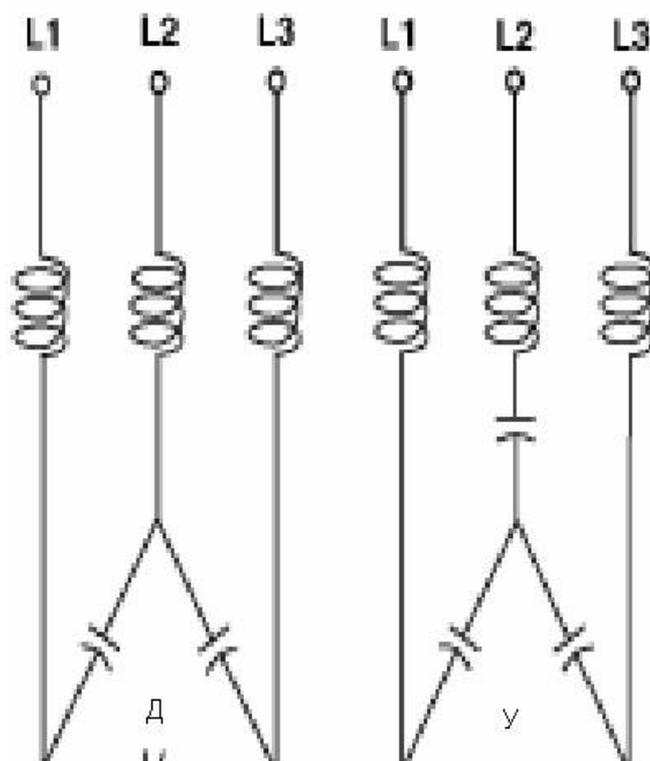


Рис. 5. Система расстроенный дроссель-конденсатор
Система расстроенный дроссель-конденсатор

3. Перекос фаз. Менее заметным, но немало важным фактором влияния на долговечность работы УКРМ является перекас фаз. Перекас фаз - это несимметрия токов и напряжения, явление при котором амплитуды фазных напряжений $0A$, $0B$ и $0C$ не равны между собой и сдвинуты друг относительно друга (Рис. 6.). Основная опасность исходит в первую очередь от перекаса фаз по току, это явление влияет на надежность и качество работы комплектующих конденсаторной установки. [3]

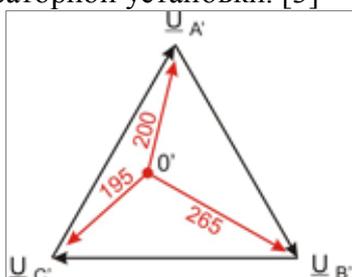


Рис. 6. Векторная диаграмма напряжений генератора.

Таким образом видим, что существует масса факторов которые влияют на срок службы и качество работы УКРМ и ее комплектующих, так же важно понимать, что в случае выхода из строя УКРМ возможно выгорание и разрушение остальных токоведущих частей (основное оборудование и техника), что в свою очередь приведет к остановке всего производства и самое важное к серьезным экономическим потерям.

Однако, как показывает практика, мало кто учитывает возможность возникновения в своей электросети любого из выше перечисленных явлений и последствия которые наступят ели АУКРМ выйдет из строя.

Варианты решения проблемы. Прежде чем приступать к внедрению конденсаторных установок для компенсации реактивной мощности на предприятии, а также фильтров гармоник необходимо провести всесторонние измерения параметров сети:

активную реактивную, полную мощность, величину и уровни гармоник тока и напряжения, провалы и перенапряжения в линии, фликеры.

Хотелось бы отметить тот факт, что Украинские электрические сети далеки от идеала и зачастую не соответствуют ГОСТу; так же всегда существует вероятность подключения к Вашей сети других потребителей, с не стабильными условиями работы и разнообразными нагрузками, которые пагубно будут влиять на ваше оборудование, их присутствие сложно отследить, а тем более предотвратить.

Ввиду сложившейся ситуации наше предприятие предлагает Вам рассмотреть возможные варианты решения возникнувшей проблемы, которые сформировались с помощью многолетнего опыта работы в области компенсации реактивной мощности.

Вариант № 1. *Внедрение на Вашем предприятии УКРМ на отечественных комплектующих:*

1. Конденсаторы серии ВКВ производства EASTEL (Украина).
2. Контактры серии МПК производства EASTEL (Украина).
3. Защитно-коммуникационная аппаратура производства EASTEL (Украина).
4. Регулятор – серии PFR -12 производства EASTEL (Украина).

Трехфазные конденсаторы серии ВКВ применяют в системах электроснабжения переменного тока с номинальным напряжением 0,4 кВ. В отличие от существующих на рынке изделий, конденсаторы Eastel не газонаполненные, а наполнены специальным электротехническим воском, что обеспечивает высокие показатели самовосстановления, долговечности и надежности.

Обкладки конденсаторов серии ВКВ изготовлены из цинково-алюминиевой металлизированной полипропиленовой пленки. Таким образом, размер и вес конденсаторов серии ВКВ составляет соответственно всего 1/4 и 1/5 часть от размера и веса газонаполненных конденсаторов.

Основное изоляционное вещество данных конденсаторов – микрокристаллический воск, который остается в твердом состоянии при нормальной температуре, температура плавления воска – выше 70 °С.

Конденсаторы ВКВ имеют встроенные разрядные резисторы и встроенные предохранители для защиты от нештатных ситуаций.

Использование отечественных комплектующих возможно при условии, что сети по параметрам соответствуют ГОСТ 13109-97 (в особенности, по гармоническому составу токов и напряжений). Этот вариант экономически более выгоден и даст возможность приобрести качественный продукт за разумную цену.

Также данный вариант можно использовать и при наличии любой из вышеперечисленных проблем, но в таком случае нужно быть готовым к тому, что Вам придется закупать ЗИП-комплект и установить надежную защиту на входе установки (быстродействующие автоматические выключатели и предохранители).

Этот вариант применим при недостаточном финансировании и отсутствие возможности закупить более дорогостоящее оборудование с высоким запасом прочности, ничего другого просто не остается.

Установки такого типа внедрены на следующих предприятиях: ООО «Рыбоконсервный завод «Экватор»», КП «Тепловые сети Днепропетровска, Харькова, Донецка и Киева». Работает более 10 000 конденсаторов на различных предприятиях, средний процент выхода из строя - 3-5%, но в некоторых, отдельных случаях – 15-20% за год эксплуатации.

Вариант № 2. *Внедрение на Вашем предприятии УКРМ на европейских комплектующих:*

1. Конденсаторы серии УНПС производства MKS TECHNOLOGY (Германия).
2. Контактры серии НІМК производства HYUNDAI (Ю. Корея).
3. Защитно-коммуникационная аппаратура производства HYUNDAI (Ю. Корея).
4. Регулятор – серии MULTICOMP производства MKS TECHNOLOGY (Германия).

Технологические преимущества конденсаторов серии УНПС производства MKS TECHNOLOGY (Германия):

Конденсаторы УНРС представляют собой новую современную серию конденсаторов, который являются самым лучшим продуктом в своем классе, а именно:

▲ При работе оборудования, даже если рабочий ток будет в два раза превышать ($2.0 \times I_n$) номинальный, конденсаторы не выйдут из строя;

▲ При включении оборудования ударный ток как правило превышает норму и это влияет на работу конденсаторов, в связи с этим конденсаторы УНРС разработаны так, что бы выдерживать ударный ток до $400 \times I_n$;

▲ Конденсаторы УНРС разработаны по новой технологии специальной металлизированной полипропиленовой пленки как диэлектрика для обеспечения высокой долговечности и очень низких потерь.

Основные достоинства предлагаемой продукции — конденсаторы УНРС имеют в среднем на 20-50% лучшие характеристики чем ближайшие аналоги других Европейских производителей, при сравнительно такой же ценовой политике.

Сравнительная таблица преимущественных характеристик конденсаторов УНРС

Параметр	Конденсатор УНРС	Конденсатор ZEZ SILKO	Конденсатор Electronic	Конденсатор ETI
Перегрузочная способность по току (рабочий ток)	$2.0 \times I_n$	$1,5 \times I_n$	$1,5 \times I_n$	$1,5 \times I_n$
Пусковой ток (пиковый ударный ток)	$400 \times I_n$	$200 \times I_n$	$200 \times I_n$	$100 \times I_n$
Ожидаемый срок службы	150 000	100 000	130 00	100 000

Данный вариант широко используется в электрических сетях, где параметры не соответствуют ГОСТ 13109-97 (в частности, по гармоническому составу токов и напряжений превышают норму на 5-15%). Конденсаторы УНРС не имеет аналогов на мировом рынке по качеству и эффективности работы.

В случаи внедрения УКРМ с конденсаторми УНРС Вы надежно защищаете свое оборудование и исключаете необходимость закупать ЗИП-комплекты.

Установки такого типа внедрены на следующих предприятиях: ООО «Старк», ЧАО «МТС Украина», ООО «Балаклийский шиферный комбинат» и др.

Кроме того, все эти установки могут быть доукомплектованы антирезонансными дросселями. Дроссели антирезонансные (фильтрующие) предназначены для защиты конденсаторов в системах компенсации реактивной мощности или фильтрокомпенсации от высших гармоник тока. Зашумленность электрических сетей высшими гармониками тока оказывает пагубное влияние на конденсаторы, что приводит к перегреву конденсаторов и, как следствие, выходу из строя.

Преимущества антирезонансных дросселей: высокое сопротивление на частотах гармоник, минимальные потери, высокая линейность характеристики намагничивания, низкий уровень шума, простота установки, большой срок эксплуатации.

Третий вариант существенно увеличивает стоимость УКРМ, но он предназначен для внедрения на предприятиях где установлены мощные преобразователи переменного и постоянного тока, крановое электрооборудование, мощное электросварочное оборудование, где отклонения от ГОСТ 13109-97 существенно превышают норму.

Вывод. В первую очередь наше предприятие рекомендует выезд группы специалистов которые проведут обследования объекта, где внедряется компенсационная установка, сделают технический расчет и правильно подберут необходимые комплектующие для установки, сделают обсчет экономической эффективности УКРМ, составят смету необходимых монтажных материалов (силовой кабель, шины, наконечники) для подключения установки к силовой сети. Для этих целей наша компания имеет в своем штате профессиональных инженеров с анализаторами сети и ноутбуками для обработки информации на месте съема. Мы проводим выездные измерения, предоставляем отчет и

рекомендации с последующим внедрением энергосберегающего оборудования (конденсаторных установок для компенсации реактивной мощности) и фильтров гармоник.

Основные варианты установок наиболее наглядно будет представить в виде таблицы:

	Когда применяется	Преимущества	Недостатки	Примечания
1-й вариант – дешевые комплектующие	Сети полностью соответствуют ГОСТу	Экономия средств, быстрая окупаемость	-	Срок окупаемости: 3-4 месяца. Полная гарантия поставщика
2-й вариант – дорогие комплектующие	Сети не соответствуют ГОСТу, но отвечает требованиям тех. характеристик установленного оборудования	Высокая надежность, редкое обслуживание	Дороже 1-го варианта в среднем в 2-3 раза	Срок окупаемости: 8-10 месяцев. Полная гарантия поставщика
3-й вариант – дешевые комплектующие	Сети не соответствуют ГОСТу	Экономия средств, быстрая окупаемость	Необходимость наличия ЗИПа (минимум 20% от стоимости установки) и квалифицированного персонала для обслуживания, возможные перебои в электроснабжении на время ремонта	Срок окупаемости: 4-6 месяцев. Нет гарантии

Гарантийные обязательства: Так как гарантия в любом случае может быть только для 1-го и 2-го варианта, рассмотрим их. Если обследование объекта выполняется поставщиком – клиент получает максимально полную гарантию со всеми обязательствами. Если обследование проводится самим предприятием – поставщик вправе потребовать повторного анализа сетей.

Следует учитывать, что при установке дополнительного оборудования на предприятии характеристики сети могут существенно измениться и будет наблюдаться значительное отклонение сетевых параметров. В таком случае гарантия теряет свою силу.

С точки зрения экономической целесообразности третий вариант имеет тоже право на существование. Надо лишь тщательно взвесить все преимущества и недостатки и определить, чего больше. Не рекомендуется для применения на тех предприятиях, где недопустимы перебои в электроснабжении. Также учитывайте, что на установки и комплектующие, внедряемые без проведения измерений «на свой страх и риск» **не распространяется гарантия производителя!** Поэтому проведение обследования при помощи специализированного аттестованного оборудования рекомендуется **во всех случаях!**

Гарантия же будет иметь силу при условии, что проведено квалифицированное и полное обследование объекта с фиксацией всех необходимых параметров электрической сети и эти параметры не выходят за допустимые пределы, определяемые ГОСТом.

Источники, используемые в статье:

1. В.Б.Белый ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ, СОДЕРЖАЩИХ УСТРО КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ. Вестник Алтайского государственного аграрного университета № 6 (56), 2009, статья.
2. Проблемы гармоник, статья.