

Энергетический фильтр

для обеспечения высококачественным напряжением специализированных потребителей

Данная работа посвящена обеспечению испытательной лаборатории питающим синусоидальным напряжением 220 В/50 Гц в соответствии с ГОСТ 51317.3.2-99 и ГОСТ 51317.3.3-99.

Виталий Скворцов, к. т. н.

sva@ie.tusur.ru

Владимир Гогуа

vladimirnvm@gmail.com

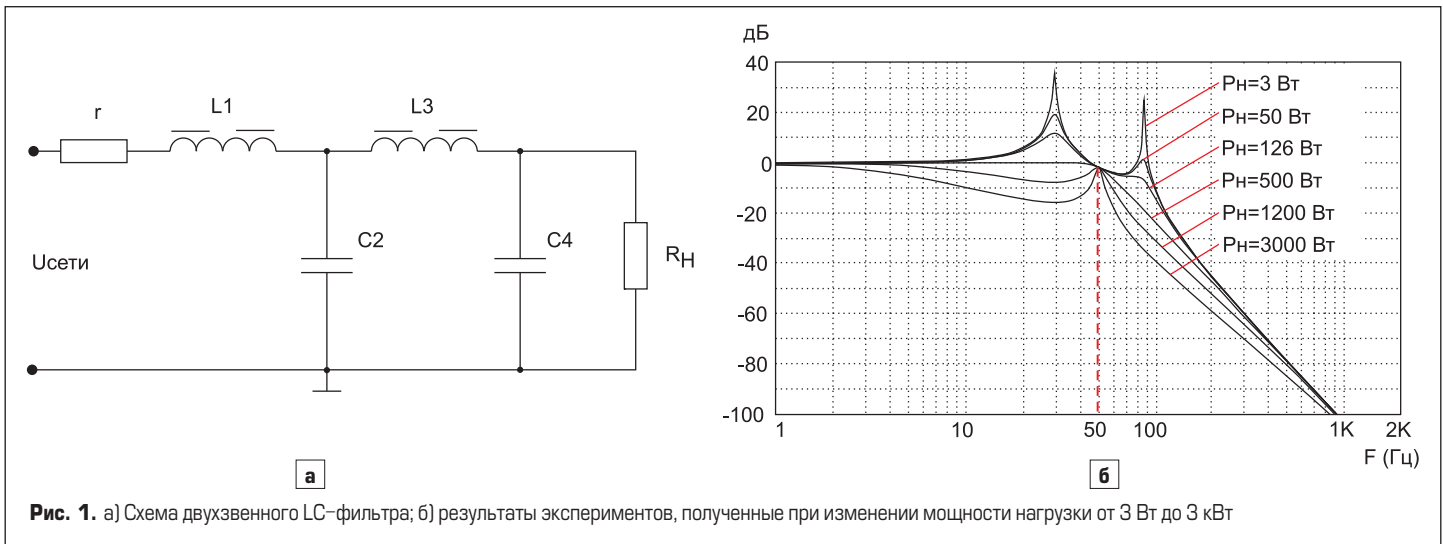
Многие годы электроэнергия приносит пользу человечеству в различных аспектах жизнедеятельности. На протяжении всего времени развитие новых технологий привело к улучшению качества преобразования электроэнергии и массо-габаритных показателей, увеличению мощности устройств питания и т. д. Наряду с этим расширился диапазон систем питания в областях от жилой и коммерческой до космоса и вооруженных сил. Внедрение в технологический процесс полупроводниковых приборов, дуговых сталеплавильных печей, сварочных установок и двигателей, потребляемый ими несинусоидальный ток приводит к ухудшению электромагнитной обстановки (ЭМО) в питающей сети. Появление гармонических искажений от таких видов нагрузок оказывает негативное влияние на потребителей, связанных общей сетью питания. По этой причине начиная с 80-х годов ведутся работы по созданию стандартов для установления контроля над качеством электроэнергии (КЭ) в системе электроснабжения.

Искажение питающей сети осуществляется разнообразными приборами, поэтому существуют государственные стандарты, регламентирующие степень искажения питающего напряжения каждым из устройств, питающихся от сетевого напряжения. Существуют приборы, для которых установлены повышенные требования к питающему напряжению, качество которого выше, чем качество питающей сети (далее — напряжение высокого качества). Поэтому существуют два метода: контролировать уровень искажения сетевого напряжения со стороны потребителя либо обеспечивать питающим напряжением высокого качества в случае, если для питания технических средств (ТС) такое напряжение необходимо.

В основном для уменьшения искажения полупроводниковыми приборами качества сети используются следующие способы. Первый — пассивная фильтрация или пассивная коррекция, которая осуществляется посредством использования пассивных

элементов, резисторов дросселей и конденсаторов, ограничивающих потребление тока высших гармоник из сети. Данный способ обладает высокой надежностью и, как правило, используется в системах высокой мощности, к тому же не требует затрат на обслуживание [1]. Однако данный подход более эффективен в случаях, если частота, величина напряжения и значение тока нагрузки относительно постоянны [2]. Но таким способом обеспечить коэффициент мощности выше 0,9 не всегда возможно [1]. Второй способ — активная коррекция, которая с помощью соответствующего алгоритма управления активных элементов обеспечивает потребление только первой гармоники тока, исключая высшие. Данный вид коррекции используется в системах питания малой и средней мощности, имеет высокую эффективность и дает возможность регулирования выходного напряжения. Применяя активную коррекцию, можно достичь коэффициента мощности, близкого к 0,99 [1]. Третий вариант — комбинация способов, включающая в себя пассивную и активную коррекцию. Такое решение позволяет сочетать преимущества обоих способов и охватить широкий спектр мощностей и рабочих характеристик [3].

Для поддержания качества питающего напряжения в рамках требований стандартов необходимы определенные организационные мероприятия как со стороны поставщиков электроэнергии (ЭЭ), так и со стороны потребителей. Показатели качества предоставляемой ЭЭ потребителю энергоснабжающими организациями установлены в ГОСТ 13109-97 и относятся к электрическим сетям общего назначения. Согласно данному стандарту, нормально допустимое значение коэффициента гармоник (коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения) установлено на уровне 8% для сетевого напряжения 220 В/50 Гц. Нормально допустимые значения коэффициентов гармонических составляющих для 3, 5 и 7 гармоник — 5, 6 и 5% соответственно. Как правило, гармоники 3, 5 и 7 наиболее подвержены искажениям со стороны потребителей, которые до-



полнительно снижают качество питающего напряжения. В случае если сетевое питающее напряжение используется в качестве испытательного (например, в испытательных лабораториях, в которых проводятся измерения гармонического состава потребляемого тока от технических средств), то его параметры должны соответствовать стандартам ГОСТ 51317.3.2-99 и ГОСТ 51317.3.3-99, в которых коэффициент искажения синусоидальности не более 3%, а коэффициенты 3, 5 и 7 гармоник — 0,9, 0,4 и 0,3% соответственно. Таким образом, использование питающей сети для проведения исследований с качеством, установленным в стандарте на электрические сети общего назначения, в испытательных лабораториях является недопустимым, так как результаты экспериментов не будут обладать требуемой достоверностью. Для обеспечения достоверности испытаний необходимо приводить параметры питающего напряжения испытательных лабораторий к значениям, предписанным стандартом испытаний.

Для обеспечения испытательных лабораторий ЭЭ вышеуказанного качества могут использоваться два подхода. Первый — автономный генератор (электромашинный преобразователь) либо полупроводниковый преобразователь (инвертор). Второй — улучшение качества существующего питающего напряжения с использованием разнообразных методов коррекции его гармонического состава.

При анализе экономической целесообразности вариант автономного генератора можно исключить, так как он требует значительных эксплуатационных затрат для обеспечения работы данных устройств, а использование в качестве эталонного напряжения ВЧ-преобразователя создает дополнительные проблемы с электромагнитной совместимостью (ЭМС) самого преобразовательного устройства. Поэтому при потребляемой мощности 30–3000 Вт предлагается в качестве источника эталонного напряжения для испытательной лаборатории использовать пассивную коррекцию. Подобный подход позволяет, не нарушая экологической обстановки испытательной лаборатории (ВЧ-помехи), обеспечить проведение испыта-

ний разнообразных ТС в указанном диапазоне мощностей с требуемым качеством ЭЭ.

Существующая теория пассивных фильтров создана для систем передачи информационных сигналов и не позволяет полностью воспользоваться этими методиками в энергетических системах, поскольку эти методики предполагают наличие внутреннего импеданса как источника сигналов, так и согласованное сопротивление нагрузки и линии передач. В энергетических же системах всегда предполагается, что мощность источника питания во много раз больше, чем мощность нагрузки, откуда следует, что внутреннее сопротивление системы питания стремится к нулю, а диапазон измерения сопротивления нагрузки определяется видом испытываемого образца и программой испытаний.

Для выбора наиболее эффективной схемы пассивной коррекции, удовлетворяющей требованиям, предъявляемым к напряжению испытательных лабораторий, проведены исследования трех вариантов устройств коррекции. При этом проведен анализ однозвенных и двухзвенных LC-фильтров, а также LC-фильтров в сочетании с режекторными звеньями. Исследования проведены с помощью программы схемотехнического моделирования MicroCap 9 и на натурном макете.

При анализе схемы двухзвенного LC-фильтра (рис. 1а) учитывалось условие, при

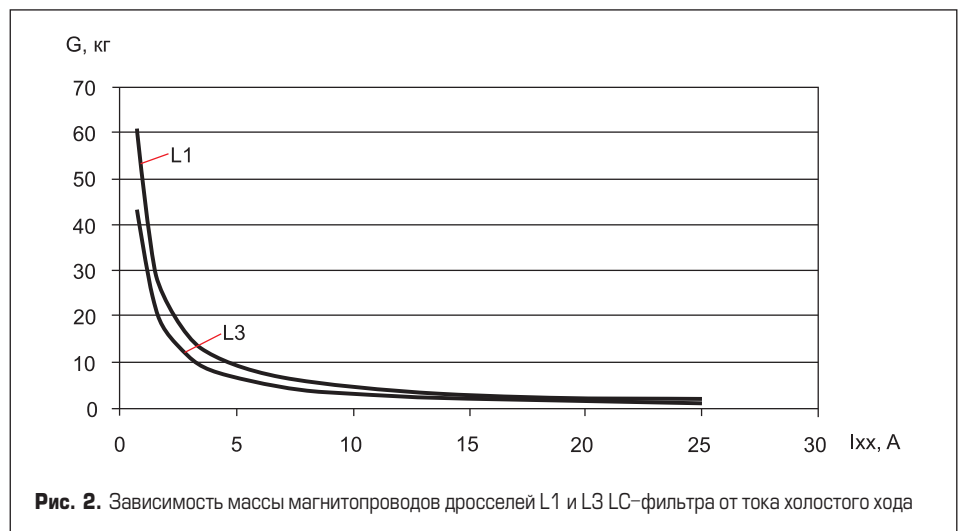
котором в области 50±5 Гц не должно быть резонансных явлений, поэтому резонансная частота первого звена 17 Гц, а второго — 85 Гц. Параметры элементов фильтра: $L_1 = 15$ мГн, $C_2 = 1,7$ мФ, $L_3 = 10,8$ мГн, $C_4 = 420$ мкФ, а значения внутренних сопротивлений дросселей при моделировании приняты равными $r_{вн} = 1$ Ом. При этом ток холостого хода фильтра (с параметрами, указанными выше), рассчитанный по формуле

$$Z = Z_{L1} + \frac{Z_{C2} \times (Z_{L3} + Z_{C4})}{Z_{C2} + (Z_{L3} + Z_{C4})}, I = \frac{U_{сетиком}}{Z},$$

составляет 35 А, а результаты экспериментов, полученные при изменении мощности нагрузки от 3 Вт до 3 кВт, приведены на рис. 1б.

Основным недостатком данной схемы является большой ток холостого хода (35 А). Мероприятия по его снижению приводят к росту массо-габаритных показателей, что подтверждается зависимостью массы магнитопроводов дросселей L_1 и L_3 LC-фильтра от тока холостого хода на рис. 2.

По графикам на рис. 1б и 2 видно, что снижение тока холостого хода без увеличения массы фильтра нереально, а подавление высших гармоник напряжения питания не удовлетворяет требованиям ГОСТ. Это обусловлено тем, что существующие методики расчета



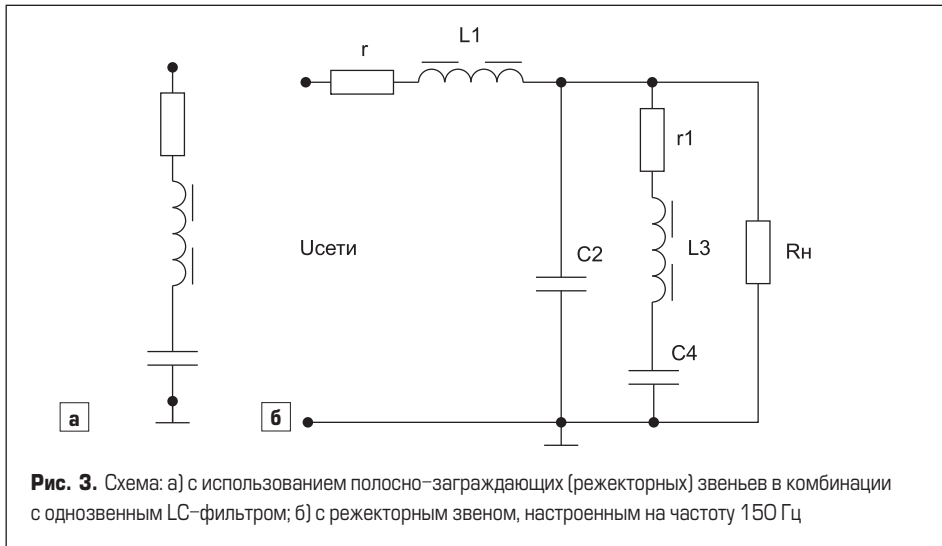


Рис. 3. Схема: а) с использованием полосо-заграждающих (режекторных) звеньев в комбинации с однозвенным LC-фильтром; б) с режекторным звеном, настроенным на частоту 150 Гц

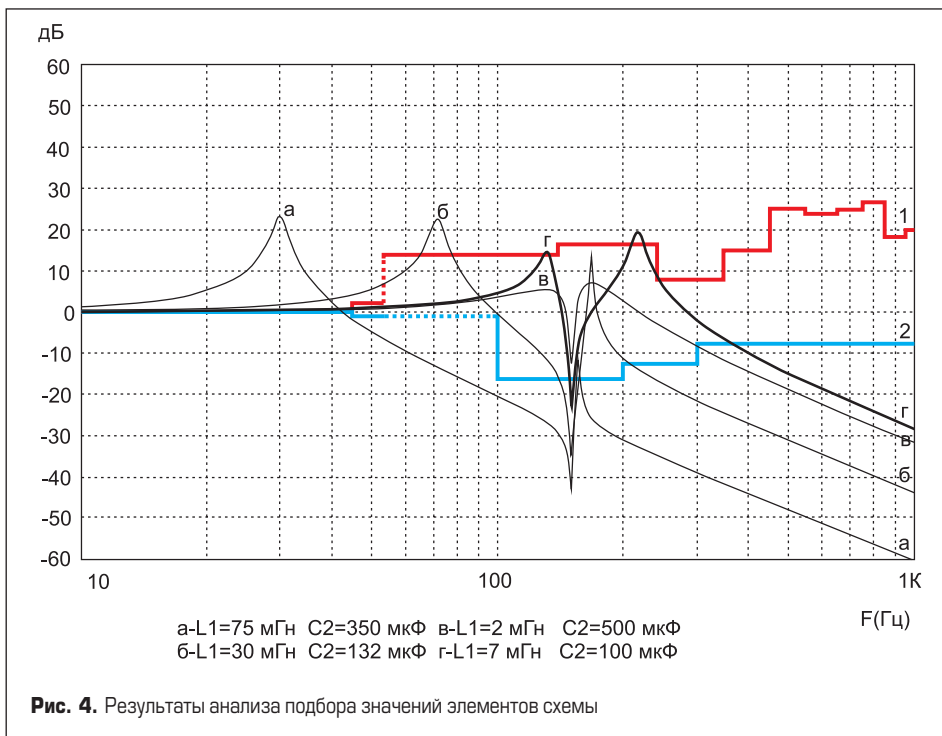


Рис. 4. Результаты анализа подбора значений элементов схемы

LC-фильтров [4] направлены на фильтрацию сигналов информационных систем, а энергетических аспектов, таких как ток холостого хода, КПД и т. д., не затрагивают.

Задача снижения габаритов фильтра может быть решена с использованием полосо-заграждающих (режекторных) звеньев в комбинации с однозвенным LC-фильтром

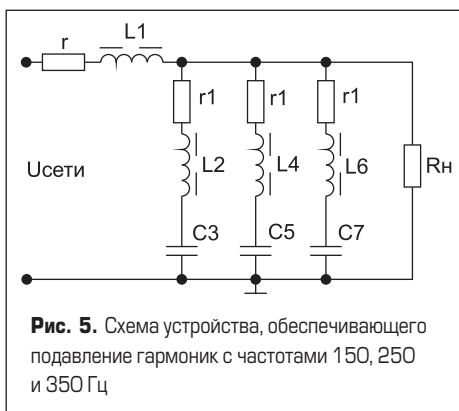


Рис. 5. Схема устройства, обеспечивающего подавление гармоник с частотами 150, 250 и 350 Гц

(рис. 3а). Параллельное режекторное звено представляет собой малое сопротивление для тока с частотой, совпадающей с частотой резонанса, на которую настроено звено. При исследовании схемы с режекторным звеном, настроенным на частоту 150 Гц (рис. 3б),

проведена оптимизация элементов фильтра с помощью многовариантного анализа логарифмической амплитудно-частотной характеристики (ЛАЧХ) при наихудшем режиме работы фильтра (при минимальной мощности нагрузки). Анализ основан на подборе таких значений элементов схемы, при которых форма ЛАЧХ, ток ХХ и массо-габаритные показатели обладали бы реальными параметрами.

По результатам анализа, представленного на рис. 4, выбраны следующие параметры фильтра: $L_1 = 7$ мГн, $C_2 = 100$ мкФ, $L_3 = 45$ мГн, $C_4 = 25$ мкФ, ток холостого хода 7,8 А. Однако уровень подавления высших гармоник с частотой 250 и 350 Гц недостаточен, о чем свидетельствует выход ЛАЧХ за пределы вспомогательных линий, построенных на основании требований к гармоническому составу испытательного напряжения. Линия 1 в положительной области представляет собой границу для ЛАЧХ, при превышении которой величины четных гармоник напряжения на выходе фильтра окажутся за пределами нормы. Линия 2 в отрицательной области показывает минимальное значение, на которое необходимо подавить нечетные гармоники.

Устройство, обеспечивающее подавление гармоник с частотами 150, 250 и 350 Гц, реализовано по схеме, представленной на рис. 5. Причем количество режекторных звеньев зависит от качества исходной сети. Здесь параметры дросселя L_1 выбраны в результате многовариантного анализа, так как он выполняет функцию балластного сопротивления, обеспечивающего нормальную работу режекторных звеньев и подавления гармоник, как правило, более высоких, чем гармоники, на которые настроены режекторные звенья. Режекторные звенья настроены на каждую из гармоник, наиболее выраженных в питающем напряжении и превышающих требуемые значения ГОСТа.

Расчетное значение величины тока ХХ в данной схеме со значениями элементов $L_1 = 15$ мГн, $L_2 = 42,4$ мГн, $C_3 = 26,5$ мкФ, $L_4 = 16$ мГн, $C_5 = 25,4$ мкФ, $L_6 = 8$ мГн, $C_7 = 26$ мкФ не превышает 5 А, а ЛАЧХ фильтра представлена на рис. 6.

Такое схемотехническое решение позволяет повысить уровень подавления вышеуказанных гармоник до величины, предписанной

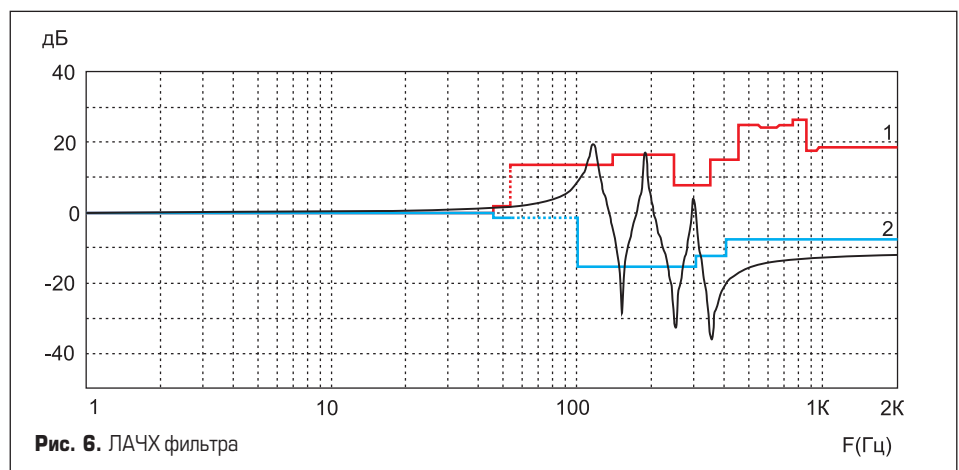


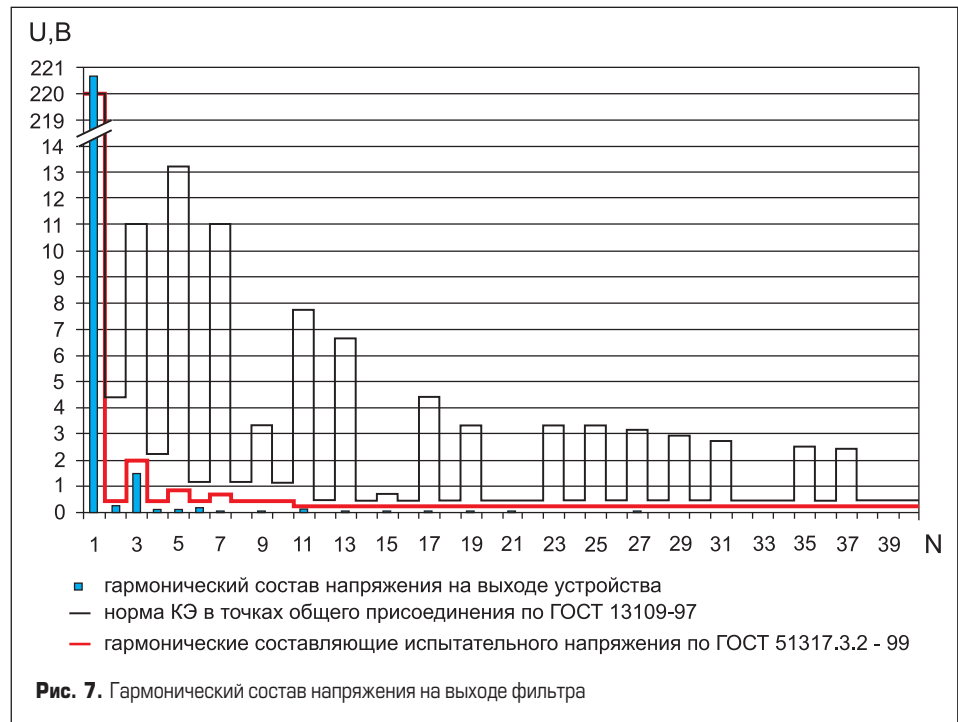
Рис. 6. ЛАЧХ фильтра

стандартом для испытаний ТС при мощности нагрузки испытуемого оборудования до 3 кВт. Незначительное увеличение амплитуды первой гармоники за счет резонансных явлений не более чем на 10% относительно номинального значения легко компенсируется подстройкой испытательного напряжения. Гармонический состав напряжения на выходе устройства представлен на рис. 7.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что обеспечение испытательной лаборатории необходимым качеством напряжения требует учета не только энергетических параметров, таких как ток ХХ и КПД, но и влияния изменений параметров нагрузки. Существующие универсальные методы расчета без применения оптимизации не позволяют рассчитать фильтры, обеспечивающие требования, предъявляемые к испытательным лабораториям.

Литература

1. Issa Batarseh. Power Factor Correction Circuits // Academic Press. 2006.
2. Mohamad N. A. Switch mode power supply with active power factor correction: Thesis. 2008.
3. Техническая коллекция: измерение и устранение гармоник. № 30. ЗАО «Шнейдер Электрик». 2009.
4. Аррилага Дж. Гармоники в электрических системах. Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат. 1990.
5. ГОСТ 13109-97 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения



- общего назначения». М.: Изд-во стандартов. 1999.
6. ГОСТ Р 51317.2.4-2000 «Электромагнитная обстановка. Совместимость технических средств электромагнитная. Уровни электромагнитной совместимости для низкочастотных кондуктивных помех в системах электроснабжения промышленных предприятий». М.: Изд-во стандартов. 2000.
7. ГОСТ 51317.3.2-99 «Эмиссия гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током не более 16 А

- (в одной фазе). Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы и методы испытаний». М.: Изд-во стандартов. 1999.
8. ГОСТ 51317.3.3-99 «Колебания напряжения и фликер, вызываемые техническими средствами с потребляемым током не более 16 А (в одной фазе), подключаемыми к низковольтным системам электроснабжения. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы и методы испытаний». М.: Изд-во стандартов. 1999.