

А.А. ЧЕПЕЛЮК, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ", Харьков
А.Л. ХЛОБЫСТИН, магистр, НТУ "ХПИ", Харьков

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ ЗАЩИТЫ БЫТОВЫХ ОДНОФАЗНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ОТ НЕДОПУСТИМЫХ ОТКЛОНЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ В ПИТАЮЩЕЙ СЕТИ

Analysis of the problem concerning to protection of household single-phase consumers of electric energy from inadmissible deviations of voltage in the electric power line is resulted.

Проведен анализ проблемы защиты бытовых однофазных потребителей электрической энергии от недопустимых отклонений напряжения в питающей сети.

Проведено аналіз проблеми захисту побутових однофазних споживачів електричної енергії від недопустимих відхилень напруги в мережі живлення.

Введение. В Украине на сегодняшний день в значительной части внутридомовых распределительных сетей электроснабжения многоквартирных домов старой застройки, из-за значительной их изношенности, несвоевременного технического обслуживания, не всегда качественных ремонтов, а местами и перегруженности электрических сетей, вследствие возросших за последние 10-15 лет нагрузок бытовых потребителей, качество электрической энергии у конечных потребителей в таких сетях по отдельным показателям (временные перенапряжения и их длительность; провал напряжения, его длительность и частота появления, импульсные перенапряжения и др.) не всегда соответствует принятому стандарту качества электрической энергии [1-3]. Результатом недопустимых отклонений напряжения в питающих сетях бытовых потребителей в зависимости от их уровня и продолжительности, является сокращение ресурса работы электроприборов, выход их из строя, а также, в ряде случаев - возможное их возгорание, что делает проблему защиты бытовых однофазных потребителей электрической энергии от недопустимых отклонений напряжения в питающей сети особо актуальной.

Цель работы – анализ проблемы защиты бытовых потребителей электрической энергии от недопустимых отклонений напряжения в питающей сети и путей ее решения в Украине.

Показатели и нормы качества электрической энергии. Качест-

вом электроэнергии (КЭ) во многом определяется надежная и безопасная работа всех видов электрооборудования. В Украине, в настоящее время, качество электроэнергии в системах общего назначения переменного трехфазного (напряжением 380 В) и однофазного (напряжением 220 В) тока частотой 50 Гц регламентируется ГОСТ 13109-97 [2].

Для систем электроснабжения общего назначения, к которым относятся системы электроснабжения бытовых потребителей, в точке общего присоединения нормально допустимые и предельно допустимые значения установившегося отклонения напряжения составляют соответственно ± 5 и $\pm 10\%$ от номинального напряжения сети – $U_{ном}$.

Внезапное понижение напряжения в точке электрической сети ниже $0,9 U_{ном}$, за которым следует восстановление напряжения до первоначального или близкого к нему уровня через промежуток времени от 10 мс до нескольких десятков секунд *называют провалом напряжения* (рис. 1). Он характеризуется длительностью провала напряжения и частотой его появления. Частота появления провалов может колебаться от нескольких случаев до 25-30 в год, в зависимости от вида питающих линий (воздушная, кабельная, смешанная) и схемного решения устройств АВР (при их наличии).

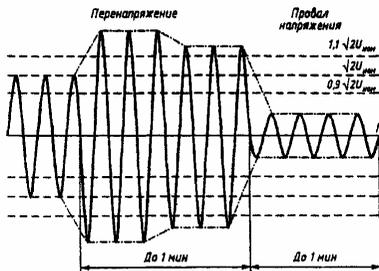


Рис. 1. Временное перенапряжение и провал напряжения в электрической

соответствующих электрических сетях энергоснабжающей организации.

Повышенное напряжение в точке электрической сети выше $1,1 U_{ном}$ продолжительностью более 10 мс считают *временным перенапряжением* (рис. 1). Оно характеризуется коэффициентом и длительностью временного перенапряжения. Значения коэффициента временного перенапряжения в точках присоединения электрической сети общего назначения в зависимости от длительности временных перенапряжений не должны превышать значений, указанных в табл. 1.

Предельно допустимое значение длительности провала напряжения в электрических сетях напряжением до 20 кВ включительно равно 30 с. Длительность автоматически устраняемого провала напряжения в любой точке присоединения к электрическим сетям определяется выдержками времени устройств релейной защиты, автоматики и коммутационных аппаратов, установленных в

Таблица 1 – Параметры временного перенапряжения

Длительность $\Delta t_{перU}$, с	до 1	до 20	до 60
Коэффициент $K_{перU}$, о. е	1,47	1,31	1,15

Резкое изменение напряжения в точке электрической сети, за которым следует восстановление напряжения до первоначального или близкого к нему уровня за промежуток времени до нескольких миллисекунд называют *импульсом напряжения (импульсным перенапряжением)* – рис. 2. Он характеризуется амплитудой и длительностью импульса. Импульсные перенапряжения по своей природе разделяются на грозовые и коммутационные.



Рис. 2. Импульсы напряжения.

Значения грозовых импульсных перенапряжений с вероятностью 90 % не превышают 10 кВ – в воздушной сети напряжением 0,38 кВ и 6 кВ – во внутренней проводке зданий и сооружений. Значения коммутационных импульсных напряжений при их длительности на уровне 0,5 амплитуды импульса, равной 1000-5000 мкс в указанных сетях не превышают 4,5 кВ.

Несимметричные и аварийные режимы работы трехфазных цепей с глухозаземленной нейтралью. Для указанных цепей возможны следующие аварийные режимы работы (рис. 3).

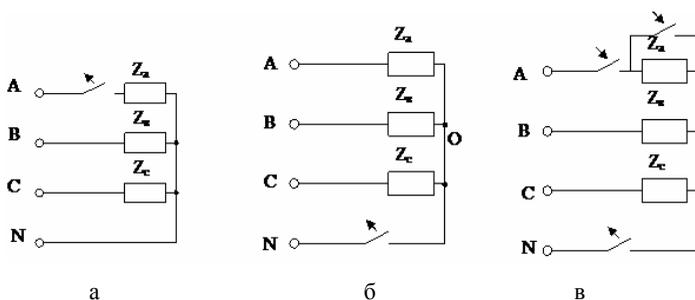


Рис. 3. Аварийные режимы работы трехфазных цепей с глухозаземленной нейтралью: а – обрыв фазного проводника; б – обрыв нейтрального (нулевого) проводника; в – обрыв фазного и нейтрального проводников.

1. При обрыве фазы А (рис. 3,а) нагрузка \underline{z}_a оказывается обесточенной ($\bar{I}_A = 0$), а остальные нагрузки ($\underline{z}_b, \underline{z}_c$) свои режимы работы не изменяют $\bar{I}_B = \bar{U}_{bn} / \underline{z}_b$, $\bar{I}_C = \bar{U}_{cn} / \underline{z}_c$ (рис. 4,а). В указанном аварийном режиме нейтральный провод будет нагружен дополнительно $\bar{I}_N = \bar{I}_B + \bar{I}_C$.

Применительно к однофазным сетям бытовых потребителей, подключенных к трехфазной системе электроснабжения с глухозаземленной нейтралью, такой режим можно считать аварийным лишь по отношению к обесточенному вследствие обрыва фазы потребителю.

2. Обрыв нейтрального проводника (рис. 3,б) не всегда вызывает аварию в трехфазных цепях. Если нагрузка симметрична, то обрыв нейтрального провода не изменит токов нагрузок, так как для симметричной нагрузки $\bar{I}_N = 0$. Для несимметричных нагрузок $\bar{I}_N \neq 0$, и поэтому такой режим может вызвать аварию. Это можно показать, используя метод двух узлов:

$$\bar{U}_{NN^1} = \frac{\bar{E}_a + \bar{E}_b + \bar{E}_c}{\frac{z_a}{z_a} + \frac{z_b}{z_b} + \frac{z_c}{z_c}}, \bar{I}_A = \frac{\bar{E}_A - \bar{U}_{NN^1}}{z_a}, \bar{I}_B = \frac{\bar{E}_B - \bar{U}_{NN^1}}{z_b}, \bar{I}_C = \frac{\bar{E}_C - \bar{U}_{NN^1}}{z_c}.$$

Напряжение \bar{U}_{NN^1} (рис. 4,б) не равно нулю, если нагрузки несимметричны. Фазные токи также будут неодинаковыми. В таком режиме приложенные к несимметричным нагрузкам $\underline{z}_a, \underline{z}_b, \underline{z}_c$ напряжения могут существенно отличаться от номинальных значений, как в большую, так и в меньшую сторону (в зависимости от соотношений $\underline{z}_a, \underline{z}_b$ и \underline{z}_c), что может служить причиной выхода из строя указанных нагрузок.

3. При коротком замыкании фазы А и обрыве нейтрального проводника (рис. 3,в) напряжение этой фазы $\bar{U}_a = 0$, (рис. 5,а), а напряжение на нагрузках \underline{z}_b и \underline{z}_c увеличится в $\sqrt{3}$ раз (до \bar{U}_{ab} на нагрузке \underline{z}_b и до \bar{U}_{ca} на нагрузке \underline{z}_c). Токи в нагрузках фаз В и С также увеличатся в $\sqrt{3}$ раз: $\bar{I}_b = \bar{U}_{ab} / \underline{z}_b$, $\bar{I}_c = \bar{U}_{ca} / \underline{z}_c$. Ток в фазе А в этом случае составит: $\bar{I}_A = \bar{I}_{ab} - \bar{I}_{ca} = \bar{I}_B - \bar{I}_C$.

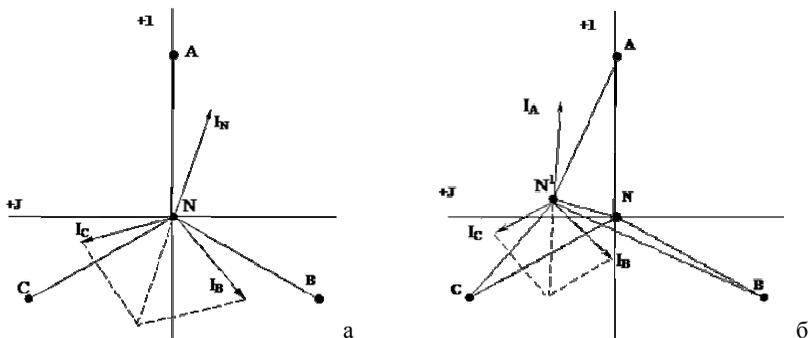


Рис. 4. Векторные диаграммы при обрыве фазы *A* (а) и при обрыве нейтрального проводника (б).

4. При обрыве фазы *A* и нейтрального проводника (рис. 3,в):

$$\bar{I}_A = 0, \bar{I}_N = 0, \bar{I}_B = \bar{I}_C = \bar{U}_{bc} / (\underline{z}_b + \underline{z}_c)$$

В оставшихся фазах токи будут одинаковыми, а напряжения на них будут зависеть от сопротивлений нагрузок (рис. 5,б).

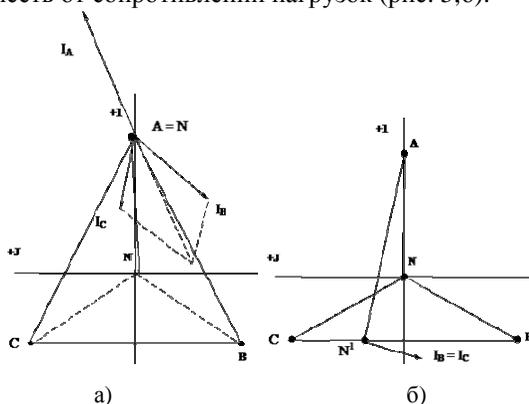


Рис. 5. Векторные диаграммы при коротком замыкании фазы *A* и обрыве нейтрального проводника (а) и при обрывах фазы *A* и нейтрального проводника (б).

Применительно к распределительным сетям однофазных потребителей, нагрузка которых в трехфазной системе несимметричная указанные выше режимы являются аварийными, в связи с чем, требуется защита этих потребителей от указанных аварийных режимов. Защита от короткого замыкания должна обеспечиваться предохранителями и

автоматическими выключателями, а защита от недопустимых отклонений напряжения вследствие обрыва нейтрального проводника, которые ставят под угрозу все включенные в это время электроприборы – с помощью дополнительных средств защиты от этих режимов.

Средства и способы защиты бытовых однофазных потребителей электрической энергии от недопустимых отклонений напряжения в питающей сети. Для решения проблемы защиты бытовых однофазных потребителей электрической энергии от недопустимых отклонений напряжения в питающей сети, возникающих из-за низкого качества электроэнергии, наряду с приведением распределительных и питающих сетей бытовых потребителей с соответствии с современными требованиями ПУЭ [3] и дальнейшим их своевременным и качественным обслуживанием, могут применяться устройства, повышающие качество электроэнергии (ограничители импульсных перенапряжений, стабилизаторы сетевого напряжения, источники бесперебойного питания), позволяющие, в ряде случаев, нормализовать питающее напряжение, а также аппараты защиты от недопустимых отклонений напряжения в питающей сети (автоматические переключатели фаз, автоматические выключатели с расцепителем минимального и максимального напряжения, вольт-автоматы, реле напряжения для защиты однофазных потребителей от недопустимых отклонений напряжения в сети), осуществляющие защиту бытовых однофазных потребителей путем отключения их нагрузки от аварийной сети.

Ограничители импульсных перенапряжений (ОИП или устройства защиты от импульсных перенапряжений – УЗИП), применяемые в сетях электроснабжения, обеспечивают защиту электрооборудования от импульсных перенапряжений (грозовых и коммутационных) и в сетях электроснабжения низкого напряжения (до 1000 В) делятся на 3 класса: I (В), II (С), III (D). Для обеспечения максимальной степени защиты от импульсных перенапряжений, в соответствии с современными зарубежными стандартами по молниезащите и импульсным перенапряжениям, наряду с обустройством внешних молниеприемников зданий, должны применяться комбинированные системы защиты распределительных сетей, состоящие из четырех (при наличии воздушной линии на участке от питающего трансформатора до ввода в здание) или трех (при кабельном вводе в здание) ступеней, каждая из которых защищает определенный участок распределительной сети на всем ее протяжении (от питающего трансформатора до конечного потребителя), снижая, по направлению к потребителю, энергию и уровень импульсного разряда (перенапряжения) до безопасной величины на вводе

потребителя [4-7]. Поскольку защитное действие ОИП основано на шунтировании импульсных перенапряжений в землю, практическая реализация всех ступеней защиты возможна лишь при наличии эффективной системы заземления на всех ступенях.

Первая ступень четырехступенчатой системы защиты предназначена для ограничения уровня пульсаций напряжения в сети в момент разряда молнии до максимально допустимого последующими ступенями защиты: В (до 4 кВ), С (до 2,5 кВ), D (до 1,5 кВ) и реализуется газовыми и вакуумными разрядниками класса А, которые устанавливаются непосредственно на опоре воздушной линии электропередачи. Остальные три ступени устанавливаются внутри зданий, сооружений и др. и реализуются ОИП I, II и III классов (варисторными разрядниками классов В, С и D), параметры которых позволяют постепенно снизить энергию разряда на вводе у потребителя до безопасной величины.

Вторая ступень защиты реализуется ОИП класса В, которые устанавливаются в главный распределительный щит или вводный щит (на вводе в здание) после ОИП класса А, а, в случае запитывания объекта от подземных (кабельных) линий электропередачи, может являться первой ступенью защиты.

Третья ступень защиты реализуется ОИП класса С, которые устанавливаются во вторичные распределительные щиты после ОИП класса В и предназначена для сглаживания пульсаций напряжения в сети до уровня, приемлемого для запитывания оборудования, критичного к питающему напряжению. ОИП класса С могут являться последней ступенью в комплексе защиты от импульсных перенапряжений.

Четвертая ступень защиты обеспечивает защиту конечных потребителей от остаточных бросков напряжений и реализуется применением ОИП класса D, которые могут быть встроены в чувствительное к таким перенапряжениям электрооборудование или расположены в виде отдельных устройств перед этим оборудованием.

Чтобы уменьшить чувствительность компьютерной, теле-, видео-, аудиотехники, высокотехнологичных электробытовых приборов к перенапряжениям, характерным четвертой ступени защиты, большинство современных производителей встраивают такую защиту в блоки питания внутри указанного электрооборудования. Эффективная работа встроенной защиты возможна лишь в случае, когда приборы со встроенной защитой класса D будут подключены к питающей сети с вышестоящими ступенями защит (В и С – классов). В противном случае, такие электроприборы оказываются защищенными лишь от невысоких уровней импульсных перенапряжений, характерных классу защиты D,

и при более высоких уровнях импульсных перенапряжений в питающей сети они могут выйти из строя. В случае, когда электроприборы со встроенной внутренней защитой от импульсных перенапряжений выполнены I класса защиты от поражения электрическим током и требуют подключения к трехпроводной (TN-S) сети с заземляющим РЕ проводником, но из-за отсутствия трехпроводной питающей сети у потребителя, в нарушение норм электробезопасности, подключаются к двухпроводной (TN-C) сети, что характерно большинству бытовых потребителей Украины домов старой застройки, защита от перенапряжений в таких приборах не обеспечивается даже на указанном – минимальном уровне, поскольку ОИП внутри таких приборов подключены между фазным (L) и РЕ – проводником и между нейтральным (N) и РЕ – проводником, который при работе прибора оказывается не подключенным к внешнему заземляющему проводнику системы электрообеспечения. По этой же причине оказываются неэффективными и сетевые фильтры, которые часто встраиваются в удлинитель.

Стабилизаторы сетевого напряжения однофазные предназначены для стабилизации напряжения в однофазных сетях с номинальным напряжением 220 В. Их классифицируют по номинальной мощности (току), по конструктивному исполнению и принципу действия (электромеханические - сервоприводные, латного типа; электронные - симисторные, тиристорные, полупроводниковые; релейного типа). Стабилизаторы напряжения обеспечивают стабилизацию выходного напряжения на выходе при условии, что напряжение питания на входе не выходит за допустимые пределы.

Нижний предел входного напряжения большинства современных стабилизаторов достигает 100-135 В, верхний – не превышает 275 В. Поскольку при обрыве нейтрального проводника в трехфазной распределительной сети с глухозаземленной нейтралью, к которой подключены однофазные потребители, входное напряжение однофазного стабилизатора отдельного потребителя может выходить за указанные пределы, такие стабилизаторы сами нуждаются в защите от недопустимых провалов напряжения и временных и импульсных перенапряжений по входу, поэтому в большинстве конструкций современных стабилизаторов указанные виды защит реализованы внутри самих конструкций. Для остальных конструкций стабилизаторов – необходимо предусмотреть внешнюю защиту от указанных аварийных ситуаций на входе.

Также недостатками способа защиты индивидуальных бытовых однофазных потребителей электрической энергии от недопустимых отклонений напряжения в питающей сети путем стабилизации выходного на-

пряжения является требуемое наличие подходящего для их установки места; дополнительная потребляемая стабилизатором мощность, как под нагрузкой, так и в режиме холостого хода, что существенно увеличивает расход электроэнергии у потребителя; шум при работе (в мощных стабилизаторах для дополнительного охлаждения применяются вентиляторы; в релейных, сервоприводных и латрного типа дополнительный шум также вызван работой реле и сервоприводов). Указанные недостатки существенно ограничивают широкое применение однофазных стабилизаторов у бытовых потребителей, особенно, в условиях многоквартирных домов, из-за ограниченной площади жилищ.

Источники бесперебойного питания (ИБП) в зависимости от схемного решения служат для бесперебойного снабжения электрической энергией ответственных потребителей не только в случае пропадания входного питающего напряжения, или отклонения его за пределы предельно допустимых значений, но и в случае недопустимого отклонения частоты питающей сети. Практически все виды ИБП также имеют встроенную защиту от импульсных перенапряжений и от высокочастотных помех в питающей сети. В соответствии с указанными выше функциональными особенностями различают три вида схем построения ИБП: резервная, интерактивная и неавтономная (двойного преобразования) [8]. В состав любого ИБП обязательно входят аккумуляторная батарея; зарядное устройство, которое обеспечивает зарядку аккумуляторной батареи при наличии напряжения в сети, обеспечивая тем самым постоянную готовность к работе ИБП в автономном режиме; инвертор, преобразующий постоянное напряжение предельно заряженной аккумуляторной батареи в переменное напряжение на выходе и схема управления.

В ИБП, выполненных по резервной схеме (Off-Line, Standby), стабилизация входного напряжения и частоты основного источника не предусмотрены и при исчезновении входного питающего напряжения (напряжения первичной сети) или при его отклонении за пределы предельно допустимых значений, нагрузка автоматически отключается от аварийной первичной сети и тут же подключается к питанию от схемы, получающей электрическую энергию от собственных аккумуляторов с помощью инвертора. При восстановлении напряжения в пределах нормы, происходит автоматическое переключение нагрузки на питание от первичной сети. Недостатком таких ИБП являются несинусоидальность формы выходного напряжения и относительно долгое время (4..12 мс) переключения на питание от батарей.

Устройство ИБП, выполненных по интерактивной схеме (Line-

Interactive), аналогично предыдущей схеме, но дополнительно на входе присутствует ступенчатый стабилизатор напряжения. В таких ИБП, благодаря стабилизации выходного напряжения при отклонении входного напряжения от предельно допустимых значений встроенным стабилизатором без перехода на аккумуляторные батареи, значительно увеличивается срок службы аккумуляторной батареи. За счет синхронизации инвертора с входным напряжением в таких ИБП время переключения меньше, чем в предыдущем варианте.

Принцип действия ИБП неавтономного (online) режима состоит в двойном преобразовании рода тока (сначала входное переменное напряжение преобразуется в постоянное, затем обратно в переменное напряжение с помощью обратного преобразователя - инвертора), благодаря чему достигается стабилизация не только выходного напряжения, но и частоты питающей сети.

Поскольку ИБП характерна достаточно высокая стоимость, ограниченное емкостью аккумуляторной батареи время работы при исчезновении питающего напряжения и ограниченный срок службы аккумуляторных батарей широкого распространения для защиты бытовых однофазных потребителей при недопустимых отклонениях питающего напряжения в питающей сети они не получили. В бытовых сетях ИБП применяются в основном для защиты наиболее ответственного бытового электрооборудования, критичного к наличию питания с нормальными параметрами питающей сети, например: домашние компьютеры, схемы управления отопительными котлами. Чаще всего в таких случаях применяются ИБП, выполненные по резервной (наиболее доступные по цене) или интерактивной схемах.

Выводы. 1. Несмотря на действующие в Украине высокие стандарты качества электроэнергии и ПУЭ с современными общеевропейскими правилами и нормами по электробезопасности, значительная часть распределительных сетей однофазных бытовых потребителей находится в крайне неудовлетворительном техническом состоянии и, в ряде случаев, является перегруженной, что существенно ухудшает качество электроэнергии и приводит к дополнительным авариям внутри сети. Эти аварии могут повлечь за собой нарушение нормальной работы бытовых приборов, выход их из строя и возможное возгорание.

2. Решение указанной проблемы на государственном уровне может быть достигнуто за счет принятия государственных программ по реконструкции распределительных сетей бытовых потребителей с первоочередным приоритетом внутрименовых распределительных сетей многоквартирных домов старой застройки.

3. Приведение старых распределительных сетей электроснабжения бытовых потребителей в соответствие с общеевропейскими нормами и стандартами по защите электрооборудования бытовых потребителей от импульсных перенапряжений требует дорогостоящей реконструкции как внутридомовых, так и внутриквартирных сетей.

4. Наиболее эффективными устройствами индивидуальной защиты от недопустимых отклонений напряжения питающей сети и импульсных перенапряжений являются стабилизаторы напряжения и источники бесперебойного питания со встроенной защитой от импульсных перенапряжений. Эффективная работа встроенной в такие устройства защиты от импульсных перенапряжений возможна при подключении указанных устройств к трехпроводной питающей сети (TN-S). Сравнительно высокая стоимость и габариты этих устройств существенно ограничивают их широкое применение бытовыми потребителями.

5. Более доступным способом индивидуальной защиты бытовых потребителей от недопустимых отклонений напряжения питающей сети является применение специальных аппаратов защиты (автоматические переключатели фаз, автоматические выключатели с расцепителем минимального и максимального напряжения, вольт-автоматы, реле напряжения для защиты однофазных потребителей от недопустимых отклонений напряжения в сети). Такие аппараты осуществляют защиту бытовых однофазных потребителей путем отключения их нагрузки от аварийной сети.

Список литературы: 1. *Чепелюк А.А., Хлобыстин А.Л.* О влиянии технического состояния внутридомовых распределительных сетей на электробезопасность бытовых однофазных потребителей электрической энергии // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Зб. наук. праць. Тем. вип.: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Харків: НТУ "ХПИ". – 2011. – № 60. – С. 46-53. 2. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. 3. Правила устройства электроустановок (ПУЭ) – Харьков: Форт, 2009. – 704 с. 4. <http://www.higercom.ru/products/support/upimpuls.htm>. 5. <http://www.news.elteh.ru/arh/2009/56/18.php>. 6. <http://www.energomer.ru/documentations/primenenie.pdf>. 7. Чермак. А. Применение устройств фирмы Nakel для защиты от импульсных перенапряжений и помех // Электропанорама. – 2005. – № 1-2. – С. 34-36. 8. http://ru.wikipedia.org/wiki/Стабилизаторы_переменного_напряжения. 9. http://ru.wikipedia.org/wiki/Источник_бесперебойного_питания.

*Поступила в редколлегию 11.05.12
Рецензент д.т.н., проф. Лупиков В.С.*