

УДК 621.311

**ПОДАВЛЕНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В
ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ И УСТРОЙСТВАХ****БАБАЕВА Н.Р.***Институт Физики НАН Азербайджана
Баку, AZ1043, пр. Г. Джавида 33*

Проведен анализ работ по использованию нелинейных резисторов для ограничения высокочастотных перенапряжений в высоковольтных электрических сетях и устройствах.

Ключевые слова: скин-эффект, частотно-зависимый резистор, ферромагнитные материалы, высокочастотное перенапряжения, импульсные помехи, электротехническое оборудование.

Высокочастотные и сверхвысокочастотные перенапряжения, возникающие в энергетических системах, могут приводить к пробоям электрической изоляции и в особо тяжелых случаях к выходу из строя систем коммутации и электротехнического оборудования. Несмотря на огромное количество разработанных методов и устройств, решение этой проблемы остается актуальным. Параметры высокочастотного переходного процесса индивидуальны для каждого объекта, для каждой конкретной коммутации. ВЧ-токи и перенапряжения через системы шин распространяются по территории объекта. Они создают электромагнитные поля, способные вызывать наводки в кабелях вторичных цепей и даже во внутренних цепях аппаратуры. Проникновение коммутационных помех во вторичные цепи происходит также через трансформаторы тока, трансформаторы напряжения, фильтры присоединения ВЧ-связи и т.п. Особенно серьезна ситуация на компактных элегазовых подстанциях, где высоковольтное оборудование и подверженная его влиянию электронная аппаратура размещаются очень близко друг к другу. В большинстве случаев на воздушных подстанциях уровни коммутационных помех во вторичных цепях невелики - порядка нескольких сотен вольт. Такой сравнительно низкий уровень объясняется высоким затуханием помех «провод-земля» в низкочастотных кабелях энергообъектов. В то же время, в высокочастотных кабелях, например, в кабелях ВЧ-связи, отмечались помехи амплитудой выше 4 кВ, а амплитуды порядка 1-3 кВ являются типичными. Следует отметить, что уровни коммутационных помех зависят от множества факторов, среди которых геометрия объекта, тип первичного оборудования, состояние заземляющего устройства, трассы прокладки вторичных цепей и т.п. Согласно сказанному выше, уровни коммутационных помех в цепях собственных нужд объектов не превышают обычно нескольких сот вольт. Однако в процессе измерений на некоторых объектах (внешне ничем не отличающихся от прочих) фиксировались помехи амплитудой более 1 кВ (рис.1.).

Одним из популярных методов подавления всех типов возникающих перенапряжений является применение нелинейных ограничителей перенапряжений (ОПН) [1-10]. Защитные действия ОПН обусловлены тем, что при появлении опасных для изоляции перенапряжений проходящий через ограничитель импульсный ток, вследствие высокой нелинейности резисторов, не создает опасного для изоляции повышения напряжения. В качестве нелинейных резисторов используются дисковые резисторы из оксидно-цинковой керамики или карбида кремния и т.д. Коэффициент нелинейности α резисторов из оксидно-цинковой керамики составляет 0,02-0,06 ($U=CI^\alpha$) и зависит от сочета-

ния добавок к оксиду цинка и от температуры обжига материала. Для резисторов на основе карбида кремния и связующего материала велита показатель нелинейности $\alpha=0,18-0,2$ при токах в пределах 30-3000А и уменьшается с увеличением тока за 3000А. При использовании тервита в качестве связующего материала $\alpha=0,35-0,36$ при токе 100-500А и $\alpha= 0,22-0,26$ при токе 1500-5000А [1-3].

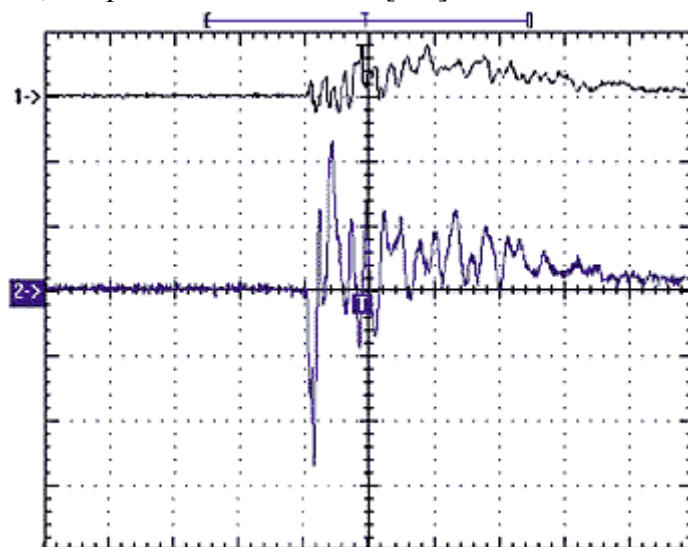


Рис. 1. Осциллограмма коммутационной помехи в цепях питания узла связи (верхняя кривая – импульсное напряжение между нулем и землей узла связи, одно деление по вертикали – 100 В; нижняя кривая – импульсное напряжение между фазой и нулем, цена деления по вертикали - 500 В). Развертка по времени - 2 мкс на деление.

В нормальном режиме работы ОПН через его блок нелинейных резисторов проходит ток проводимости, обусловленный рабочим напряжением сети. Длительный ток проводимости через блок НРР нагревает резисторы и является причиной его старения. При чрезмерном увеличении тока проводимости может произойти тепловой пробой НРР и выход ОПН из строя. В настоящее время ОПН присоединяются к ВЛ наглухо. Такое присоединение, в отличие от разрядников с искровым присоединением к ВЛ, оказалось возможным после использования в семидесятых годах XX века оксидно-цинковых варисторов, которые обладают в области токов, характерных для коммутационных перенапряжений (сотни ампер), существенно большей нелинейностью, чем варисторы на основе карборунда, использовавшиеся в разрядниках.

Варисторы на основе карбида кремния используются преимущественно в устройствах с высоким напряжением. В комбинации с искровым разрядником такой варистор позволяет надежно защитить цепь питания от перегрузок вследствие ударов молнии или других помех. При этом выдерживаются всплески тока до 100 кА за время ~10 мкс при напряжении в несколько киловольт [2, 4].

В высоковольтной технике таблетки или цилиндрические элементы на основе карбида кремния составляют важную часть сложного разрядного устройства. Как показала эксплуатация таких разрядных устройств, большие токи утечки в сопротивлениях разрядников на основе SiC приводят к их разогреву, что вызывает отклонения рабочего напряжения в случае искрового разряда, возникающего при перегрузке. Варисторы на основе оксида цинка имеют существенно большую крутизну вольт-амперной характеристики по сравнению с SiC и значительно меньше токи утечки. Использование варисторов для подавления высокочастотных помех невозможно без использования дополнительных электронных схем. В качестве фильтра они не идут [4].

В работе [5,6], предложен способ подавления высокочастотных и сверхвысокочастотных перенапряжений с помощью резисторов частотная зависимость сопротивления

которых определяется величиной скин-эффекта в них, и, как показали исследования, сопротивление которых значительно увеличивается в области высоких частот, характерных для перенапряжений. Резистор включался последовательно с защищаемым объектом. При этом на низкой частоте он не препятствовал прохождению тока, а на высокой частоте играл роль поглощающего фильтра. Высокочастотное перенапряжение падало, в основном, на резисторе и высокочастотная составляющая не проходила в защищаемый прибор или подстанцию, когда он был установлен на ее подходе. В качестве материалов для такого нелинейного резистора использовался дисперсный материал, составленный из композиции проводящего-непроводящего ферромагнитного порошковых материалов. Дело в том, что в композиционном материале при изменении концентрации проводящего компонента ток изменяется неравномерно. При низком значении концентрации электропроводность мала и слабо зависит от концентрации, а при некотором значении, называемом порогом проводимости, происходит ее резкий рост на несколько порядков. При трехмерном протекании пороговая концентрация значительно ниже, чем при двухмерном протекании. Выбирая концентрацию таким образом, чтобы она была выше «объемного» порога протекания, но ниже «поверхностного» порога протекания, можно получить дополнительное увеличение эффекта частотной зависимости номинала резистора [7].

Установка в пролете ВЛ-110 кВ частотнозависимого резистора позволила снизить интенсивность переходного процесса и уменьшить кратность возникающих перенапряжений. При достижении волной перенапряжений установленного резистора происходило ее отражение и преломление, в результате чего происходило поглощение энергии и снижение перенапряжений [8-10].

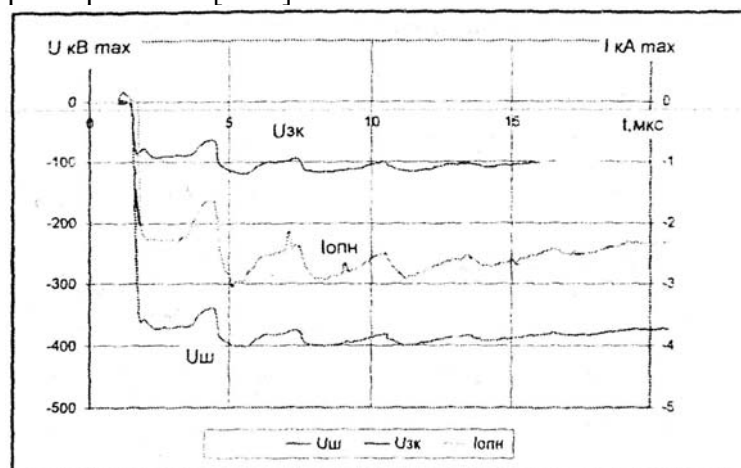


Рис.2. Грозовые перенапряжения при подключении в пролет резистора $R=100$ Ом.

Степень демпфирования перенапряжений зависит от величины резистора в пролете. Была определена, с точки зрения поглощенной энергии, величина сопротивления резистора, равная $R=100$ Ом.

Оценочные расчеты показали эффективность использования частотнозависимых резисторов для уменьшения энергии волны грозовых перенапряжений в условиях повышенных сопротивлений заземления опор и подстанции.

Идея использования скин-эффекта для создания нелинейных резисторов для подавления высокочастотных и сверхвысокочастотных перенапряжений была использована еще в 1990 году в патенте Японии №2-9401 "Сердечник силового кабеля с низкими потерями" [11]. Было предложено выполнять сердечник кабеля из токопроводящих жил, промежутки между которыми заполнялись магнитной жидкостью.

Основными недостатками предложенного способа являются высокая сложность и высокая стоимость изготовления кабеля с герметичной оболочкой, заполненной дорогостоящей магнитной жидкостью, что ограничивает возможность его применения из-за

увеличенных габаритов. С другой стороны, взаимоотталкивающее действие намагниченных частиц жидкости приводит к вытеснению магнитных частиц из промежутков между проводящими жилами и от поверхности проводника, что уменьшает эффективность подавления скин-эффекта, увеличивает потери мощности в жидкости

В патенте Японии [12], токопроводящий элемент предлагалось покрыть плёнкой Cr_2O_3 . Однако, известно [13], что из множества соединений хрома с кислородом только метастабильная двуокись хрома CrO_2 обладает ферромагнитными свойствами, т.е. μ больше 1. В патенте Украины [13] предлагается поверхность токопроводящего элемента покрыть твердой парамагнитной диэлектрической оболочкой, выполненной из смеси диэлектрического полимера с порошками CrO_2 , $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ или $\text{Co-}\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (μ от 1,5-2 и малое время перемагничивания). Наружная ферромагнитная оболочка служит для создания внутри проводника электромагнитного поля, препятствующего прохождению переменного тока в проводнике. Краупизация кабеля, кроме выполнения основной своей задачи увеличения собственной индуктивности, в некоторых случаях подавляет и паразитную поперечную электромагнитную волну, уменьшая скин-эффект. Однако снижение проводимости переменного тока, потери в ферритовой оболочке из-за её высокого показателя магнитной проницаемости μ , высокая собственная индуктивность кабеля исключают применение такого типа кабелей на высоких частотах. Этот недостаток иногда используют для подавления высокочастотных компонентов проходящего широкополосного сигнала. Так как материал оболочки выбирают из магнитодиэлектриков или парамагнитных веществ с ничтожно малой удельной электропроводностью, то основной ток через оболочку не проходит и, следовательно, устраняется возможность возникновения паразитных вихревых токов. При выборе материала оболочки с показателем относительной магнитной проницаемости более 50 и при большой длине токопроводящего элемента парамагнитная оболочка подавляет как поперечную, так и высокочастотную электромагнитные волны.

Действие скин-эффекта в токопроводящих элементах проявляется в том, что большая центральная часть их не участвует в переносе электрических зарядов. Оценка по соотношению $L \sim c/(8\pi\mu\lambda\nu)^{1/2}$ для меди с постоянными $\lambda = 5,4 \cdot 10^{17} \text{ с}^{-1}$, $\mu = 1$, $\nu = 50 \text{ Гц}$ дает для $L \sim 1 \text{ см}$, а для $\nu = 5 \cdot 10^5 \text{ Гц}$ – $L \sim 0,01 \text{ см}$. перераспределение переменного тока по сечению провода приводит к тому, что сопротивление провода увеличивается, а индуктивность уменьшается. Так при частоте переменного тока 50 Гц сопротивление медного провода диаметром 2 см по сравнению с сопротивлением постоянному току увеличивается примерно на 3 %, а для проволоки диаметром 2 мм – всего на 0,0003 %. Для токов с частотой 10^6 Гц и провода диаметром 2 мм сопротивление увеличивается почти в 7 раз. Это вызывает повышенное сопротивление проводника электрическому току и увеличивает рассеяние тепловой энергии в проводнике, а также приводит к перераспределению подвижных электронов в проводнике от центра к поверхности. Как следствие, возникает «паразитная» электромагнитная волна, направленная от центра токопроводящего элемента к его поверхности, вызывающая нелинейные и частотно-фазовые искажения проходящего сигнала. Отрицательное действие скин-эффекта усугубляется тем, что возникающие в результате коррозии на поверхности проводника химические соединения металла токопроводящего слоя, обладая диэлектрическими и полупроводниковыми свойствами, препятствуют прохождению электрического тока.

Снижение скин-эффекта в проводах коаксиальных кабелей незначительно. В частном случае проводов с искусственно увеличенной собственной индуктивностью, выполненных по способу краупизации, металлический проводник окружают оболочкой из ферромагнитного материала с показателем относительной магнитной проницаемости намного больше единицы (обычно μ слоя выбирают от 300 до 3000).

Наиболее серьезная проблема в резисторах со скин-эффектом связана с магнитным насыщением материала ферромагнитного слоя. При среднем токе молнии 20 кА и значении радиуса проводника в несколько сантиметров, напряженность магнитного поля

превышает 10^5 А/м. и, так как максимальная величина магнитной индукции B_m не превышает 1 Тл, должно наблюдаться глубокое насыщение ферромагнетика. Формально определенная магнитная проницаемость $\mu = B / (\mu_0 \cdot H)$ имеет значение порядка 1 и, соответственно, глубина скин-слоя превышает размер ферромагнитного слоя. Оценки для случая экстремальных токов, например для токов молнии, показывают, что при токе 20 кА длительностью 20 мкс, толщина слоя насыщения составит примерно 2 мм. Оценка толщины скин-слоя на рабочей частоте 50 Гц при рабочем токе, не достигающем насыщения, дает значение примерно 0,2 мм.

Исследовано применение частотнозависимого резистора, изготовленного с использованием композиции проводящего и непроводящего ферромагнитного материала.

Анализ данных показывает, что частотный эффект достигается не только за счет уменьшения сечения протекания тока, но и за счет удельного сопротивления материала, уменьшение эффективной электропроводности приводит к изменению скин-слоя. Для двухслойного проводника: дисперсный ферромагнетик + алюминиевый проводник, проведен расчет частотной зависимости сопротивления для различных значений эффективности магнитной проницаемости композита [8]. В этой работе также моделируется использование частотно-зависимого резистора для ограничения грозовых перенапряжений в линиях электропередач 110 кВ. Было показано, что если номинал резистора на грозовом импульсе составляет 100 Ом, то такой резистор эффективно ограничивает перенапряжения и может существенно улучшить работу ограничителей перенапряжений.

Грозозащита линий на подступах к подстанции обеспечивается грозозащитными тросами, эффективность которых зависит от импульсного сопротивления заземления опор. Большинство ударов молнии приходится в тросы или опоры линии, что приводит к кратковременному повышению напряжения и перекрытию изоляции или воздушного промежутка между проводом и тросом (опорой). Если далее при движении волны, перенапряжения превышают импульсную прочность гирлянды изоляторов, то происходит повторный пробой. Процесс продолжается до тех пор, пока перенапряжения не снизятся до допустимого уровня [15]. Окончательное снижение грозовых перенапряжений, поступающих на шины подстанции с подходящих линий, осуществляется подключением разрядников и ОПН. Во многих случаях не удается обеспечить эффективные (нормированные) заземление опор линий и контуры заземления подстанций [15], что не обеспечивает эффективной защиты изоляции подстанции.

Теоретические аспекты использования скин-эффекта [16] при создании резисторов, сопротивления которых зависят от частоты, были рассмотрены в работах [5-10]. В этих статьях были детально рассмотрены свойства продольных и поперечных компонент электрического поля, возникающего в результате скин-эффекта.

Неотъемлемой частью устройств, генерирующих или использующих большие импульсные токи, являются массивные проводники, по которым проходят токи в единицы и десятки мегаампер [17]. Режим работы этих проводников характеризуется тем, что глубина проникновения импульсного магнитного поля в металл мала по сравнению с характерными размерами проводников, т.е. в них имеет место так называемый «резкий» скин-эффект. Для случая «резкого» скин-эффекта при расчете внешнего квазистационарного переменного электромагнитного поля обычно используются приближенные методы расчета, основанные на одном из двух вариантов приближенных граничных условий. В первом варианте проводимость проводника считается бесконечно большой, при этом касательная составляющая электрического вектора и нормальная составляющая магнитного вектора на поверхности проводника равны нулю. Вторым вариантом – это использование импедансных граничных условий, которые соответствуют предположению, что локально электромагнитная волна проникает в толщу металла так же, как проникает плоская волна в проводящее полупространство [18]. В случае неферромагнитных металлов внешнее поле незначительно отличается от поля, полученного

при граничных условиях бесконечно большой проводимости. Это, в свою очередь, позволяет рассчитывать системы с массивными проводниками с помощью двух последовательных приближений [19]. В первом приближении находится распределение внешнего магнитного поля и линейной плотности тока в проводниках при граничных условиях идеальной проводимости. Для второго приближения принимается, что локальное распределение поля и тока у поверхности металла соответствует проникновению одномерного поля в проводящее полупространство, т.е. используются условия Леонтовича.

Возможен численный расчет поля с непосредственным использованием импедансных граничных условий. При этом используется метод граничных элементов [20, 21], при котором поле во внешней области описывается интегральными уравнениями, учитывающими граничные условия.

Относительно общий подход к расчету переменного и импульсного электромагнитного поля в проводящих телах использован в [22-25]. В [22] определяется поле в локальной системе криволинейных координат, построенной на поверхности проводящей оболочки произвольной геометрической формы. Целью расчетов является определение поля, проникшего внутрь оболочки. Поэтому там не рассматривался случай возбуждения поля током от внешних источников, подключенных к проводящим телам.

Для расчета поля при резко выраженном поверхностном эффекте естественным является решение методом пограничного слоя. Такой подход был реализован еще в 1940 г. с целью определения распределения поля и расчета нагрева вихревыми токами проводника [23]. Метод пограничного слоя был также применен для нахождения граничных условий на поверхности проводников, которые использовались в интегральных уравнениях метода граничных элементов [24,25].

Эта задача может быть разрешена для произвольной геометрической формы проводников в характерном для источников и приемников больших импульсных токов в случае резко выраженного поверхностного эффекта [26]. Найденные в [27] приближенные асимптотические соотношения между векторами электромагнитного поля на поверхности проводников допускают обобщение в виде формулы с независимыми от тока и времени параметрами, которые, наподобие элементарного закона Ома, определяют связь между током и падением напряжения на массивных проводниках.

При быстром изменении тока в цилиндрических проводниках происходит перераспределение плотности тока и полей по сечению проводника, причем при возрастании ток течет в основном в поверхностном слое, а при убывании, наоборот, плотность тока может быть максимальна во внутренних слоях проводника. К моментам времени, соответствующим максимумам тока, плотность тока стремится к однородному распределению [28].

Аналитически получены распределения магнитного поля и плотности тока в цилиндрическом проводнике при быстром колебательном изменении внешнего поля. При убывании поля имеет место обратный скин-эффект (плотность тока максимальна в центральной части проводника) [29].

-
1. Справочник по электрическим аппаратам высокого напряжения/ Н.М.Адоньев, В.В. Афанасьев, И.М. Бортник. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр.отдел, 1987
 2. Аморфные и полукристаллические полупроводники Под.Ред. В.Хейванга, Москва, Мир, 1987, 123-147
 3. Электротехнический справочник; Под.ред. В.Г. Герасимова, П.Г. Грудинского, Л.А.Жукова, Н.Н. Орловой и др.;М., Энергоиздат, 1981
 4. *Landau, W.,Lifschitz*. Quantum mechanics. London: Addiso Wesley 1958, 174
 5. *Гашимов А.М., Мехмиев Т.Р., Бабаева Н.Р.* Частотнозависимый резистор. Международная конференция «Физика 2005», Сборник трудов.7-9 июня 2005,

6. *Гашимов А.М., Мехтиев Т.Р., Бабаева Н.Р.* Возможности ограничения высокочастотных перенапряжений при использовании частотнозависимого резистора, International Conference Energy of Moldova – 2005, sep.21-24,2005 – Chisinau, Republic Moldova, 265-269
7. *Неймарк А.В.* Электрофизические свойства перколяционного слоя конечной толщины. ЖЭТФ, вып 2(8), т.98, 1990, 611-626
8. *Коробейников С.М., Сарин Л.И., Челазнов А.А.* Резистор с частотно зависимостью для уменьшения перенапряжений. Труды второй Всероссийской научно-технической конференции. Ограничения перенапряжений и режимы заземления нейтрали сетей 6-35кВ, Новосибирск, 2002
9. *Коробейников С.М., Сарин Л.И., Челазнов А.А., Дрожжин А.П.* Один способ уменьшения энергии, поглощаемой ОПН. Всеросс.Науч.Тех.Совещ. «Научные аспекты и актуальные проблемы разработки, производства, испытаний и применения ОПН», СПб, ОАО «Электрокерамика», 8-10 октября 2001.
10. *Коробейников С.М., Сарин Л.И., Челазнов А.А.* Уменьшение энергии, поглощаемой ОПН при воздействии грозового импульса. Тез.Всеросс.Сем. «Проблемы выбора и эксплуатации ОПН в электрических сетях 6-35 кВ», 2001, с.58-66.
11. *Фудзикура Дэнсэн К.К.* «Сердечник силового кабеля с низкими потерями», патент Японии, №2-9401, опубл. «ИСМ» 1990г., №1, в.100
12. *Мэйдэнси К.К.* «Токопроводящий элемент», патент Японии, №1-36642, опубл. «ИСМ» 1990 г., №9, в.125
13. *Подольак С.Ю.* «Способ изготовления токопроводящего элемента», патент Украины, №45352
14. *Шишман Д.В., Пружинина В.И., Савельев В.П.* Вентильные рязрядники высокого напряжения. Л.; Энергия, 1971
15. *Кускова Н.И., Ткаченко С.И.* Радиальные распределения быстро меняющихся токов и полей в цилиндрических проводниках, Письма в ЖТФ, 2002, том 28, вып. 14, с.59-63.
16. *Фридман Б.Э., Рутберг Ф.Г.*// ПТЭ, 2001, «2, 196-203
17. *Тозони О.В., Маергойз И.Д.* Расчет трехмерных электромагнитных полей. Киев: Техника, 1974, 352
18. *Шнеерсон Г.А.* Поля и переходные процессы в аппаратуре сверхсильных токов. М.: Энергоатомиздат, 1992, 413
19. *Ahmed M.R., Lavers J.D., Burke P.E.* // IEEE Trans.Magn. 1988.Vol.24,#1, 138-141
20. *Ishubashi K.*// IEEE Trans.Magn. 1990 Vol.26,#2, 458-461
21. *Апполонский С.М.* Расчет электромагнитных экранирующих оболочек. Л.: Энергоатомиздат, 1982, 144
22. *Рытов С.М.* // ЖЭТФ. 1940, Т.10, вып. 2., 180-190
23. *Yuferev S, Ida N.* IEEE Trans.Magn.1998. Vol.34,#5, 2605-2608
24. *Yuferev S, Ida N.* IEEE Trans.Magn.1999. Vol.35,#3, 1486-1489
25. *Фридман Б.Э.* Скин-эффект в массивных проводниках электроимпульсных установок. Массивные проводники в электрических цепях. Журнал технической физики, т.72, вып.9, 2002, 52-56
26. *Фридман Б.Э.*// ЖТФ.2002, т.72, вып.9, 44-51
27. *Кускова Н.И., Ткаченко С.И.* Радиальные распределения быстро меняющихся токов и полей в цилиндрических проводниках, Письма в ЖТФ, т.28, вып.14, 2002, 59-63
28. *Кускова Н.И.* Обратный скин-эффект. Письма в ЖТФ, т.30, вып.21,59-64

**YÜKSƏK GƏRGİNLİKLİ ELEKTRİK ŞƏBƏKƏLƏRİNDƏ VƏ
AVADANLIQLARINDA TEZLİKLİ İFRAT GƏRGİNLİKLƏRİN
ARADAN QALDIRILMASI**

BABAYEVA N.R.

Yüksək gərginlikli elektrik şəbəkələrində və avadanlıqlarında tezlikli ifrat gərginliklərin məhdudlaşdırılması üçün qeyri-xətti rezistorların tədqiqinə həsr olunmuş işlərin analizi aparılmışdır.

**SUPPRESSION OF THE HIGH-FREQUENCY OVER-VOLTAGES AT HV POWER
NETWORKS AND EQUIPMENTS**

BABAYEVA N.R.

Analysis of works devoted to studies of non-linear resistors for limitation of high-frequency over-voltages at HV Power networks and equipments is carried out.