



**“Fizika-2005”
Beynəlxalq Konfrans
International Conference
Международная Конференция**



**7 - 9 İyun June 2005 №159 5-həftə page 613-617
Июнь 2005 №159 5-стр. стр.**

Bakı, Azərbaycan

Baku, Azerbaijan

Баку, Азербайджан

ЧАСТОТНОЗАВИСИМЫЙ РЕЗИСТОР

ГАШИМОВ А.М., МЕХТИЕВ Т.Р., БАБАЕВА Н.Р.

*Институт Физики НАН Азербайджана
Баку, AZ1043, пр. Г. Джавида 33*

Изготовлен и исследован резистор для защиты устройств электротехнического оборудования от высокочастотных перенапряжений.

Высокочастотные и сверхвысокочастотные перенапряжения, возникающие в энергетических системах, в особо тяжелых случаях, могут приводить к пробоям электрической изоляции, к выходу из строя систем коммутации, и электротехнического оборудования. Несмотря на огромное количество разработанных методов и устройств, решение этой проблемы было и остается актуальным.

В работах [4-6] предложен способ подавления перенапряжений с помощью нелинейных резисторов, в которых используется хорошо известный скин-эффект.

Действие скин-эффекта в токопроводящих элементах проявляется в том, что большая центральная часть их не участвует в переносе электрических зарядов. Оценка по соотношению $L \sim c/(8\pi\lambda\nu)^{1/2}$ 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 крапунизации, металлический проводник окружают оболочкой из ферромагнитного материала с показателем относительной магнитной проницаемости намного больше единицы (обычно μ слоя выбирают от 300 до 3000). В патенте Японии [9], токопроводящий элемент предлагается покрыть пленкой Cr_2O_3 . Однако, известно [10], что из множества соединений хрома с кислородом только метастабильная двуокись хрома CrO_2 обладает ферромагнитными свойствами μ больше 1. В патенте Украины [10] 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. Крапунизация кабеля, кроме выполнения основной своей задачи, увеличения собственной индуктивности, в некоторых случаях подавляет и паразитную поперечную электромагнитную волну, уменьшая скин-эффект. Однако снижение проводимо-

сти 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 компонент проходящего широкополосного сигнала. Так как материал оболочки выбирают из магнетодиэлектриков 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.

В патенте Японии №2-9401 (1990 год) на устройство "Сердечник силового кабеля с низкими потерями" [7] предлагается сердечник кабеля выполнить из токопроводящих жил, промежутки между которыми заполнены магнитной жидкостью. Однако взаимоотталкивающее действие намагниченных частиц жидкости, снижает эффективность подавления скин-эффекта, вследствие вытеснения магнитных частиц из промежутков между токопроводящими проводниками.

Таким образом, создание нелинейного типа резисторов вышеуказанного типа представляет реальную задачу. Наиболее серьезная проблема в таких резисторах 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.

Исследованы 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 двуслойного проводника: дисперсный ферромагнетик +алюминиевый проводник, расчет частотной зависимости сопротивления для различных

значений эффективности магнитной проницаемости композита [12].

В [12] 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 [1]. 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 [2], не обеспечивает эффективной защиты изоляции подстанции.

Установка в пролете частотнозависимого резистора позволяет снизить интенсивность переходного процесса и уменьшить кратности возникающих перенапряжений. При достижении волной перенапряжений установленного резистора происходит ее отражение и преломление, в результате чего происходит поглощение энергии и снижение перенапряжений.

Как известно, в электрических цепях, используемых для генерации или проведения больших импульсных токов, используются массивные проводники. Глубина проникновения импульсного магнитного поля в металл, в этом случае, очень мала по сравнению с размерами проводящего элемента и, соответственно, наблюдаемый скин-эффект относится к типу «резкого». В этом случае, вектор магнитной индукции можно представить в виде суммы двух компонент $\mathbf{B} = \mathbf{B}_o + \mathbf{B}_s$, где \mathbf{B}_o - определяет электромагнитное поле при идеальном поверхностном эффекте, а \mathbf{B}_s - учитывает влияние на результирующее поле вихревых токов в металле. Линейная плотность тока в предельном случае идеального поверхностного эффекта может быть представлена в виде:

$[\mathbf{n} \times \mathbf{B}_o] = \mu_0 \mathbf{b}(\mathbf{r}) I(t)$, где \mathbf{n} - внешняя нормаль к поверхности проводника, \mathbf{r} - радиус-вектор точки на поверхности S , $\mathbf{b}(\mathbf{r})$ - вектор-функция, заданная на поверхности S и зависящая только от рельефа поверхности, $I(t)$ - электрический ток в проводнике. Глубина токового слоя в проводнике определяется магнитной проницаемостью μ , частотой ω ,

проводимостью σ [9], $\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu_0 \cdot \mu \cdot \sigma \cdot \omega}}$ В работе [13] рассмотрено решение этой задачи методом пограничного слоя.

Точное решение задачи о скин-эффекте зависит, не только от формы проводника, но и от способа возбуждения в нем тока. В случае, когда диаметр провода мал по сравнению с его длиной, распределение тока можно считать не зависящим от способа возбуждения.

В работах [11-13] теоретически рассмотрена задача о распределениях плотности тока и полей по сечению в цилиндрических проводниках.

Показано, что при возрастании ток течет, в основном, в поверхностном слое, а при убывании - во внутренних слоях проводника. К моментам времени, соответствующим максимумам тока, его плотность стремится к однородному распределению.

Аналитическое решение уравнения диффузии магнитного поля для случая, когда нестационарное граничное условие на поверхности цилиндрического проводника радиусом, a описывается синусоидальной функцией, имеет вид:

$$j\left(r, \frac{\pi}{2\omega}\right) = \frac{1}{2} \left[j_1\left(r, \frac{\pi}{2\omega}\right) + j_2\left(r, \frac{\pi}{2\omega}\right) \right]$$

$$j_1(r, t) \approx \frac{C_1}{\mu\delta} \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{1}{2^{2n} (n!)^2} \left(\frac{r}{\delta}\right)^{2n} \right] \exp\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right); \quad j_2(r, t) \approx \frac{C_2}{\mu\delta} J_0\left(\frac{r}{\delta}\right) \exp\left(\frac{\pi}{2} - \omega t\right)$$

где

$$C_1 = \frac{B_0}{\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2^{2n+1} (n+1)!} \left(\frac{a}{\delta}\right)^{2n+1}}; \quad C_2 = \frac{B_0}{J_1\left(\frac{a}{\delta}\right)};$$

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\mu\sigma\omega}}; \quad B_\phi - \text{магнитная индукция, } B_\phi = B_0 \sin \omega t.$$

$$B\left(r, \frac{\pi}{2\omega}\right) = \frac{1}{2} \left[B_1\left(r, \frac{\pi}{2\omega}\right) + B_2\left(r, \frac{\pi}{2\omega}\right) \right]$$

При возрастании $\omega t < \pi/2$: $B_1(r, t) \approx C_1 \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{1}{2^{2n+1} n!(n+1)!} \left(\frac{r}{\delta}\right)^{2n+1} \right] \exp\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$

При убывании $\omega t < \pi/2$: $B_2(r, t) \approx C_2 J_1\left(\frac{r}{\delta}\right) \exp\left(\frac{\pi}{2} - \omega t\right); \quad J_0, J_1\left(\frac{r}{\delta}\right)$ -функция Бесселя.

Решение этих уравнений на компьютере для частного случая проводника радиусом $a_0=0,5$ мм, начальной электропроводностью 10^5 с/м при частоте колебаний и амплитуде внешнего поля $B_0=50$ Т и $\omega=20$ мГц представлено на рис.1-2. Видно, что распределение плотности тока к моменту времени $t=12$ нс является неоднородным ($\delta \approx 2,8 \cdot 10^{-4}$ м $< a$). При $t=15$ нс, если внешнее поле $dB/dt \rightarrow 0$, то распределение плотности тока стремится к однородному ($t=15$ нс). При убывании поля ($t > 15$ нс) плотность тока возрастает в центре проводника и уменьшается в поверхностном слое.

Для случая, когда радиальные неоднородности возникают от импульсного воздействия на проводник, предполагая, что скорость нарастания переднего и

спадания заднего фронтов можно описать функцией $\exp(\pm\beta t)$, где β - коэффициент нарастания или убывания, уравнения для плотности тока запишутся в случае возрастания тока (передний фронт импульса) в виде:

$$j(r, t) = j(0,0) \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2^{2n} (n!)^2} \left(\frac{r}{\delta}\right)^{2n} \right) \exp(\beta t);$$

в случае убывания тока (задний фронт импульса)

$$j(r, t) = j(0,0) J_0\left(\frac{r}{\delta}\right) \exp(-\beta t), \quad \text{где } J_0(r/\delta) -$$

функция Бесселя первого рода. Таким образом, при резком спаде и выполнении соотношения a/δ (a/δ

$\approx 2,4$ – первый корень $J_0(a/\delta)$ ток течет по всему проводнику, а в поверхностном слое его плотность убывает почти до нуля.

Радиальные распределения плотности тока в разные моменты времени приведены на рис.1. Видно, что при $t \approx 12$ нс распределение плотности тока является резко неоднородным. При $t \approx 24$ нс плотность тока, максимальная в центральной части проводника, убывает почти до нуля на его поверхности.

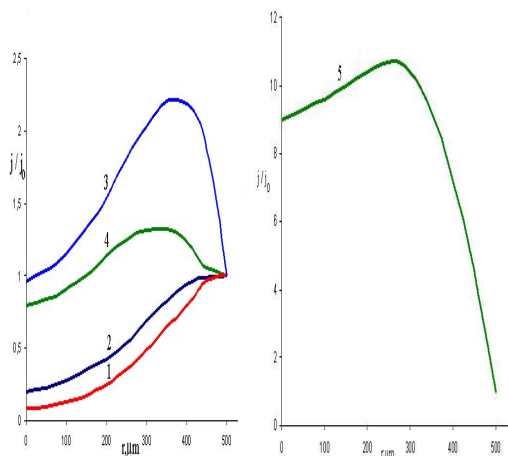


Рис.1 Радиальное распределение плотности тока по сечению проводника: 1- 12 нс, 2 - 15 нс, 3 - 19 нс, 4 – 21 нс, 5 - 24 нс.

Рис. 2 дает представление о плотности тока как функции расстояния от оси для цилиндрического алюминиевого провода радиусом в 1 мм при частотах 20 кГц, 200 кГц и 20 МГц ($\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$). Если принять фазовый угол на поверхности провода за начало отсчета фаз, заметим, что внутри массивных проводов, когда глубина проникновения магнитного поля мала по сравнению с диаметром, фазовый угол может быть намного больше 2π . Следовательно, внутри провода могут существовать области, в которых токи протекают в противоположном направлении. На рис. 3 приведена зависимость сопротивления по сечению проводника.

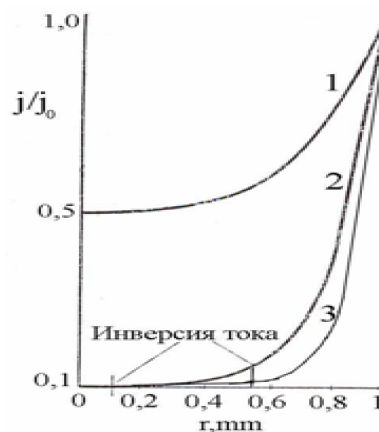


Рис.2. Радиальное распределение плотности тока по сечению цилиндрического алюминиевого провода: $a=1$ мм, 1- 20 кГц, 2 – 200 кГц, 3 – 20 МГц.

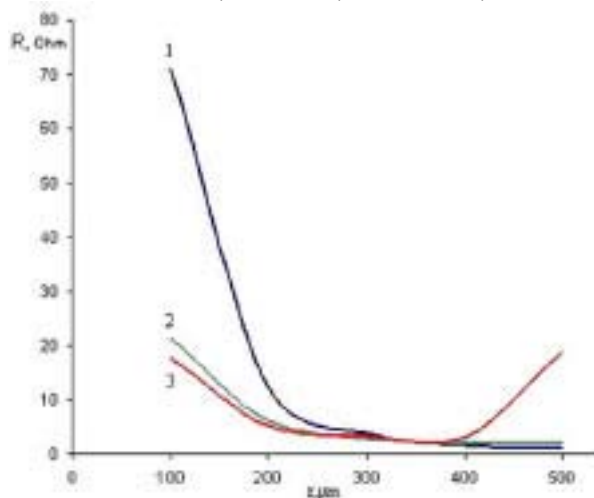


Рис. 3. Зависимость сопротивления по сечению проводника: 1 – 12 нс, 2 – 19 нс, 3 – 24 нс

Реальный проводник при протекании тока нагревается и расширяется. Если предположить, что расширение проводника происходит по линейному закону $v = ur$, то, описывая изменения радиуса проводника функцией $a = a_0 \exp(ut)$, получим

$$B_\phi(r,t) = B(a,0)r \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{(\pm 1)^n}{2^{2n} (n+1)!} \left(\frac{r}{\delta}\right)^{2n} \times \prod_{k=1}^m \left(\frac{2(k-1)u}{\beta} + 1 \right) \right] \exp(\pm \beta t)$$

для радиального распределения плотности тока

$$j(r,t) = j(0,0) \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\pm 1)^n}{2^{2n} (n)!} \left(\frac{r}{\delta}\right)^{2n} \times \prod_{k=1}^m \left(\frac{2(k-1)u}{\beta} + 1 \right) \right) \exp(\pm \beta t)$$

Очевидно, что распределение температуры по сечению проводящего элемента неоднородно и динамически меняется со временем. Однако, так как скорость изменения распределения теплового поля по сечению много меньше скорости изменения радиального распределения плотности тока, то следует использовать некоторое среднее значение

распределения за достаточно большой промежуток времени.

Проведенное исследование свойств поперечной волны показало, что устранение высокочастотной компоненты возникающей при перенапряжениях возможно, если окружить токопроводящий элемент оболочкой ферромагнитного материала толщиной не менее 4 мм, значением μ не менее 50 и слабой

удельной электропроводностью. Время перемагничивания материала меньше периода переменного тока в токопроводящем элементе. В случае экстремальных токов порядка 20 кА, напряженность магнитного поля порядка 10^5 А/м. Оценка толщины насыщенного ферромагнитного слоя дает значение 2 мм. На рисунке 4 показан изготовленный резистор, частотная характеристика сопротивления которого приведена на рисунке 5.



Рис. 4 Резистор с подавлением высокочастотных компонент для защиты устройств электротехнического оборудования.

Поверхность покрыта твердой парамагнитной оболочкой, которая выполнена в виде нескольких слоев твердого парамагнитного (показатель μ больше 50) диэлектрического материала. Парамагнитная оболочка служит для подавления паразитной

поперечной волны, а так же высокочастотной компоненты сигнала.

При определении характеристик созданного частотнозависимого резистора был наблюден эффект «гигантского» магнитосопротивления, характерного для многослойных магнитных структур. Данный эффект приводит к дополнительному возрастанию сопротивления частотнозависимого резистора от величины магнитного поля.

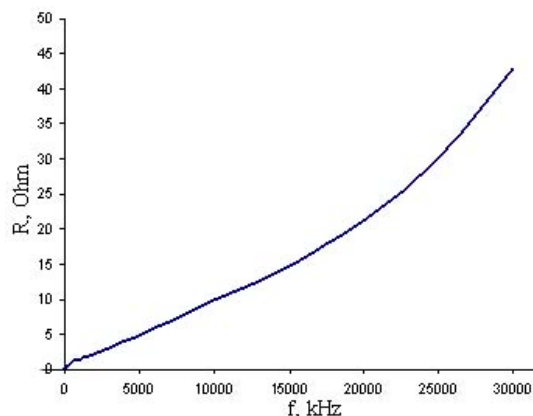


Рис.5. Частотная зависимость сопротивления изготовленного (рис. 4) резистора.

Измерения скин-параметра производилось по осциллограммам тока и падению напряжения на изготовленном резисторе, как это рекомендуется в работе [14, 15].

- [1]. Техника высоких напряжений/Под ред. М.В.Костенко. М.: Высшая школа, 1973
- [2]. Тиходеев Н.Н. Передача электроэнергии сегодня и завтра/ Под ред. В.И.Попкова. Л.: Энергия, 1975
- [3]. Гасанли Ш.М., Гашимов А.М., Мехтизаде Р.Н., Байрамов Х.Б. Защита электрооборудования и электрических сетей от импульсных перенапряжений. Материалы научной конференции посвященной 80-летию юбилею Президента Азербайджанской Республики Гейдара Алиевича Алиева, Баку, 2003 с.192-196
- [4]. 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.
- [5]. 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.
- [6]. Коробейников С.М., Сарин Л.И., Челазнов А.А. Резистор с частотно зависимостью для уменьшения перенапряжений.
- [7]. Мэйдэнси К.К. «Токопроводящий элемент», патент Японии, №1-36642, опублик. «ИСМ» 1990 г., №9, в.125
- [8]. Котов Е.П., Руденко М.И. Носители магнитной записи, М.: «Радио и связь», 1990, 384с.
- [9]. Фудзикура Дэнсэн К.К. «Сердечник силового кабеля с низкими потерями», патент Японии, №2-9401, опублик. «ИСМ» 1990г., №1, в.100
- [10]. Подоляк С.Ю. «Способ изготовления токопроводящего элемента», патент Украины, №45352
- [11]. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982. 623с.
- [12]. 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.
- [13]. Кускова Н.И. Обратный скин-эффект. Письма в ЖТФ, 2004, том 30, вып. 21.
- [14]. Б.Е. Фридман ЖТФ, 2002, т. 72, в.9, с. 52-56
- [15]. Б.Е. Фридман ЖТФ, 2002, т. 72, в.9, с. 44-51