

## О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ПРОТЕКАНИЯ ТОКА ЧЕРЕЗ ЧАСТОТНОЗАВИСИМЫЙ РЕЗИСТОР

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

*Институт Физики*

*Национальной Академии Наук Азербайджана*

*AZ 1143, г.Баку, пр. Г. Джавида, 33*

Сərəyanötürücü naqilinin səthi presləmə yolu ilə ferromaqnit qatla örtülmüş tezlikdən asılı rezistorda cərəyan axması hadisələri və bu rezistorun əsas parametrlərinə istilik proseslərinin təsiri öyrənilmişdir.

Изучены процессы протекания тока и влияние тепловых процессов на основные параметры частотнозависимого резистора, поверхность токоведущего стержня которого путем опрессовки покрыта ферромагнитной оболочкой.

Processes of passing of a current and influence of thermal processes on key parameters the frequency-depended resistors, a surface of which is covered with ferromagnetic layer by pressure, are investigated.

Изучение возможностей использования частотнозависимых резисторов для эффективной фильтрации внешних и внутренних высокочастотных помех, как показали работы [1-10,20], стимулировало экспериментальные исследования их электрических, тепловых характеристик, роли геометрических факторов, наличия слоистой структуры ферромагнитного слоя и т.д.

Целью настоящей работы являются исследование особенностей процесса протекания электрического тока через частотнозависимый резистор, ферромагнитная оболочка которого выполнена путем опрессовки поверхности токоведущего стержня резистора.

частотного (центр частотной полосы около 50 кГц) сигнала при заметном  $\sigma$  (сопротивление ферромагнитной оболочки  $\sim 10^3 \div 10^4$  Ом) был максимален. Толщина слоя  $\delta$  приблизительно была равна 0,5 см, что превышает глубину скин-эффекта на частоте 100 кГц.

После модификации поверхности токоведущего стержня профиль изменения сопротивления по сечению токоведущего стержня достаточно плавно возрастал к его поверхности, см. на рис. 1б. Диаметр токоведущего стержня с модифицированной поверхностью  $R = 20$  см, длина  $l = 50$  см.

### ПОДГОТОВКА ОБРАЗЦОВ

На рис. 1а представлена в общем виде структура частотнозависимого резистора, использованного в эксперименте. В отличие от предыдущих [1-7] использованных структур, поверхность токоведущего стержня (2) была опрессована под давлением смесью порошков алюминия и ферромагнитного материала 300ВНП (1), размерами зерен  $D \sim 200$  мкм. Концентрации проводящей компоненты  $p_{Al} = 0.35$  и, соответственно, плохо проводящей компоненты  $(1-p_{Al}) = 0.65$ .

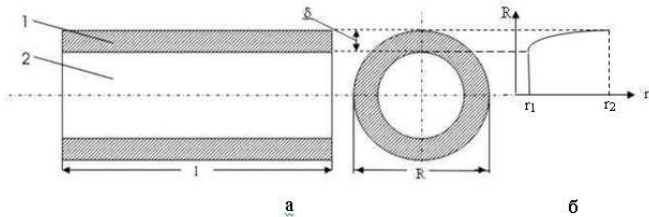


Рис.1 Сечение исследуемого частотнозависимого резистора.

а) 1 – модифицированная ферромагнитным порошком поверхность токоведущего стержня толщиной  $\delta$ ; 2 – токоведущий алюминиевый стержень диаметром  $R$  и длиной  $l$ .

б) профиль сопротивления резистора по сечению:  $r_1$  – сопротивление алюминиевой части токоведущего стержня;  $r_2$  – сопротивление на поверхности резистора.

Подбор соотношения компонентов осуществлялся опытным путем так, чтобы эффект подавления высоко-

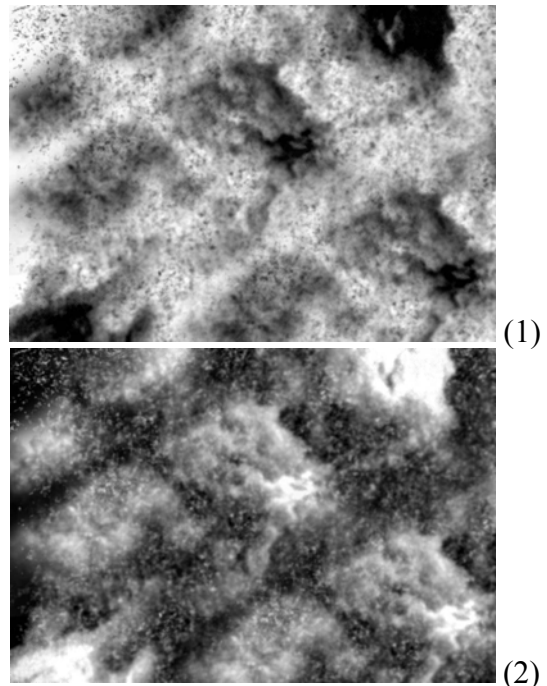


Рис. 2 Фотографии макроструктуры ферромагнитной оболочки частотнозависимого сопротивления (шлиф в плоскости торца резистора), полученные на электронном микроскопе. (1) – структура проводящей алюминиевой компоненты; (2) – структура плохо проводящей ферромагнитной компоненты.

На рис.2 приведены фотографии макроструктуры ферромагнитной оболочки частотнозависимого резистора(шлиф), полученные на электронном микроскопе. (1) – структура проводящей алюминиевой компоненты; (2) – структура плохо проводящей ферромагнитной компоненты. Макроструктура оболочки имеет ячеистый характер, в которой ферромагнитные частицы окружены алюминиевой матрицей. Форма ферромагнитных частиц, размер которых составляет приблизительно 50-200 мк, трапециидальная.

**ТЕОРИЯ**

Как указывается в литературных обзорах, при рассмотрении механизмов электропроводности сложных гетерогенных систем сложно выделить преобладающий процесс, вследствие множества возможных контактов проводящих частиц. Согласно [19], коэффициент обобщенной проводимости смеси можно определить по формуле:

$$\sigma = \sigma_1 \left[ 1 - \frac{m_2}{\frac{1}{1 + \frac{m_2}{m_1}} + \frac{1 + m_2}{3}} \right], \text{ где } \sigma_1 - \text{коэффициент проводимости проводящей компоненты, } m - \text{объемная концентрация проводящей } (m=m_1) \text{ и не проводящей компонента } (m=m_2).$$

Как указывает [18], вероятность образования сплошных проводящих цепочек в композиции и, как следствие, зависимость удельного сопротивления от концентрации проводящих частиц устанавливается соотношением

$$\rho_m^v = \frac{\rho_0^v}{p \cdot \exp\left(p \frac{-2}{3} C^2\right)}$$

где  $\rho_m^v, \rho_0^v$  -удельные сопротивления смеси и проводящей компоненты, соответственно;  $p$ - объемная концентрация проводящей компоненты;  $C^2$  – площадь поперечного сечения проводящих цепочек. Однако определение  $C^2$  представляет собой очень сложную задачу. С другой стороны, использованная конструкция позволяет рассматривать созданный частотнозависимый резистор, как перколированную систему «плохой» - «хороший» проводники, рассмотренную в работах [11-13]. Выводы этих работ были использованы в исследованиях [8-10], в которых рассмотрен скин-эффект в композиционных материалах и для подавления высокочастотных помех используется изменение электропроводности  $\sigma(\omega)$  при переходе от трехмерного к двумерному характеру протекания тока в зависимости от частоты.

Согласно [11-13] (смысл и названия обозначений полностью соответствуют данным работам) для рассматриваемой системы из трех характерных областей для параметров перколяционного слоя наиболее интересной для нас является вторая.

$$\left(\frac{H}{L}\right)^{2t_2/v_2} \left(\frac{a}{H}\right)^{(s_3+t_3)/v_3} < \frac{\sigma_2}{\sigma_1} < \left(\frac{a}{H}\right)^{(s_3+t_3)/v_3}$$

когда система переходит от «трехмерного» поведения

$$\sigma_{\perp} = \sigma_{\parallel} = \sigma_1 (p - p_{c,3})^{t_3} = \sigma_1 \left(\frac{\xi_3}{a}\right)^{-t_3/v_3} \quad (1)$$

при  $\xi_3 < \min(l_{p,3}, H), p > p_{c,3}$

$$\sigma_{\perp} = \sigma_{\parallel} = \sigma_1 (p - p_{c,3})^{-s_3} = \sigma_1 \left(\frac{\xi_3}{a}\right)^{-s_3/v_3} \quad (2)$$

при  $\xi_3 < \min(l_{p,3}, H), p < p_{c,3}$

к «двумерному»

$$\sigma_{\parallel} = \sigma_1^* \left(\frac{\xi_2}{H}\right)^{-t_2/v_2} \quad (3)$$

при  $\xi_2 < \min(l_{p,2}, L), p > p_{c,1}$ ,

$$\sigma_{\parallel} = \sigma_2^* \left(\frac{\xi_2}{H}\right)^{-t_2/v_2} \quad (4)$$

при  $\xi_2 < \min(l_{p,2}, L), p < p_{c,1}$

Двумерные асимптотики стыкуются с трехмерными при  $\xi_3 \approx \xi_2 \approx H$ .

Проводимость перколяционного слоя из «плохих» и «хороших» проводников определяется соотношением трех масштабов [11-13]: корреляционной длины  $\xi$

$$\xi_3 = a(p - p_{c,3})^{v_3}, \quad (5)$$

где  $a$ -толщина слоя перколяции;  $v_3 \approx 0.9$  – критический индекс перколяционной длины;  $p = p_{Al}$ ;  $p_{c,3}$  - порог перколяции  $\approx 0.3117$ ;  $t_3 \approx 1.5 \pm 0.1$ ; толщины слоя  $H$  и масштаба смешанной проводимости  $l_p$ .

$$l_{p,3} = a \gamma^{v_3/(s_3+t_3)} \quad (6)$$

где  $s_3$ - критический индекс  $\approx 0.7$ ;  $\gamma = \sigma_2/\sigma_1 \gg 1$ .

Трехмерные асимптотики имеют место, когда корреляционная длина является наименьшим из этих масштабов.

Эффективная проводимость вблизи порога перколяции определяется соотношением:

$$\sigma_{\perp} = \sigma_{\parallel} = \sigma_{c,3}$$

при

$$\xi_3 > l_{p,3}, l_{p,3} < H; \quad \sigma_{c,3} = \sigma_1^{\frac{s_3}{s_3+t_3}} \sigma_1^{\frac{t_3}{s_3+t_3}} = \sigma_1 \left(\frac{l_{p,3}}{a}\right)^{-\frac{t_3}{v_3}} = \sigma_1 \left(\frac{l_{p,3}}{a}\right)^{-\frac{s_3}{v_3}} \quad (7)$$

В двумерном случае

$$\xi_2 = H \left| p^* - p_{c,2} \right|^{-v_2},$$

где  $p^*$  - доля эффективных проводников для двумерного слоя;  $p_{c,2}$  – порог перколяции  $\approx 0.59275$ ; критический индекс  $v_2 \approx 4/3$ ;  $t_2 \approx 1.28 \pm 0.1$  [12].

$$l_{p,2} = H(\gamma^*)^{-\nu_2/(s_2+t_2)}, \quad (8)$$

где  $s_2$  - критический индекс  $=t_2$ ;  $\gamma^* = \gamma \left( \frac{H}{a} \right)^{(s_3+t_3)/\nu_3}$

Эффективная проводимость в этом случае равная проводимости вблизи порога перколяции определится соотношением:

$$\sigma_{\parallel} \left( \frac{H}{a} \right) = \sigma_{c,3} \left( \frac{l_{p,3}}{H} \right)^{\frac{t_3-s_3}{2\nu_2}} \quad (9)$$

Оценка величины  $l_{p,2}$  дает значение  $\approx 0.04$ .

Мы предполагаем, что характер протекания тока при скин-эффекте определяется масштабом смешанной проводимости перколяционной системы, т.е. при глубине скин-эффекта меньшей значения  $l_{p,2}$  распространяющийся скин-ток по резистору будет иметь двумерный характер, а большей - трехмерный. Расчет показывает, что такое значение  $l_{p,2}$  соответствует частотам сигнала выше, чем  $\approx 100$  кГц.

Использованное нами соотношение проводящей и плохо проводящей компонентов соответствует выполнению вышеприведенных условий и значение эффективной электропроводности равно  $\sim 10^3-10^4$ .

Как показано в [11, 14-17], положение масштаба смешанной проводимости в результате зависимости от  $\sigma_1(\omega)$  и  $\sigma_2(\omega)$  должно зависеть от частоты  $\omega$  и, как указывается в [17], стационарное значение  $\sigma$  имеет место, если период изменения поля велик, соответственно частота поля мала, по сравнению с обратным временем свободного пробега электронов в проводнике. Для металлов при комнатной температуре эти частоты лежат в ИК области спектра. «Плохие» проводники на малых частотах, при выполнении условия  $\omega \ll 4\pi\sigma/\varepsilon$ , где  $\varepsilon$ -диэлектрическая проницаемость, ведут себя как обычные проводники с постоянной проводимостью. При частотах поля  $\omega \gg 4\pi\sigma/\varepsilon$  они ведут себя как диэлектрики с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon$ .

В соответствии с [11, 14], для перколированной системы наибольший интерес представляют частоты  $\omega \ll 4\pi\sigma/\varepsilon$  и  $4\pi\sigma/\varepsilon \ll \omega \ll \tau^{-1}$ , где  $\tau$  - время релаксации в металлах, которым отвечают два характерных масштаба смешанной проводимости, соответственно.

$$l_p^0 = a \left( \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \right)^{\frac{-\nu_3}{s_3+t_3}}; l_p^\omega = a \left( \frac{\omega\varepsilon_2}{4\pi\sigma_1} \right)^{\frac{-\nu_3}{s_3+t_3}} \quad (10)$$

причем

$$\sigma_1(\omega) = \sigma_1(1 + i\omega\tau_1);$$

$$\begin{cases} \sigma_2(\omega) = \sigma_2(1 + i\omega\tau_2) - \text{для } \omega \ll 4\pi\sigma_2/\varepsilon_2 \\ \sigma_2(\omega) = \sigma_2 - i \frac{\omega\varepsilon_2}{4\pi} - \text{для } \omega \gg 4\pi\sigma_2/\varepsilon_2 \end{cases} \quad (11)$$

где  $\tau_1$  и  $\tau_2$  – времена релаксации в проводящей и плохо проводящей компонентах,  $l_p^0$  и  $l_p^\omega$  характерные масштабы на нулевой и  $\omega$  частотах. Соответственно мас-

штабы смешанной проводимости для трехмерного и двухмерного случая определяются, как

$$l_{p,3}(\omega) = a \cdot \gamma(\omega)^{\frac{-\nu_3}{s_3+t_3}} \quad (12)$$

$$l_{p,2}(\omega) = H \cdot [\gamma^*(\omega)]^{\frac{-\nu_2}{s_2+t_2}} \quad (13)$$

Смешанная проводимость  $\sigma(\omega)$  в случае, когда  $\gamma \ll 1$  определяется подстановкой (11) в (1),(2). При  $p > p_{c,3}$

$$\sigma(\omega) = \sigma_1(\omega) \cdot (p - p_{c,3})^{t_3} + A \cdot \sigma_2(\omega) \cdot (p - p_{c,3})^{-s_3}$$

при  $p < p_{c,3}$

$$\begin{aligned} \sigma(\omega) &= \sigma_2(\omega) \cdot (p_{c,3} - p)^{-s_3} - \\ &- B \cdot \frac{[\sigma_2(\omega)]^2}{\sigma_1(\omega)} \cdot (p_{c,3} - p)^{-2s_3-t_3} \end{aligned}$$

где  $A$  и  $B$  – постоянные  $\sim 1$ .

В непосредственной близости к порогу перколяции при  $\xi > l_{p,2}$

$$\sigma_{\parallel}(H, \omega) = [\sigma_1(\omega) \cdot \sigma_2(\omega)]^{\frac{1}{2}} \cdot \left( \frac{H}{a} \right)^{\frac{-(t_3-s_3)}{2\nu_3}}$$

В двухмерном случае для  $p^* > p_{c,2}$

$$\begin{aligned} \sigma_{\parallel}(\omega) &= \sigma_1^*(\omega) \cdot (p^* - p_{c,2})^{t_2} + \\ &+ A_2 \cdot \sigma_2^*(\omega) \cdot (p^* - p_{c,2})^{-s_2} \end{aligned}$$

для  $p^* < p_{c,2}$

$$\begin{aligned} \sigma_{\parallel}(\omega) &= \sigma_2^*(\omega) \cdot (p_{c,2} - p^*)^{-t_2} - \\ &- B_2 \cdot \frac{[\sigma_2^*(\omega)]^2}{\sigma_1^*(\omega)} \cdot (p_{c,2} - p^*)^{-2s_2-t_2} \end{aligned}$$

Все вышесказанное указывает, что проводимость в области малых частот практически определяется проводимостью «хорошего» проводника. В области малых частот изменение проводимости практически не происходит. Это означает, что положение границы смешанной проводимости также практически не меняется. Зная положение смешанной границы и зависимость глубины скин-эффекта от частоты, можно найти значения величины проводимости и частоты сигнала, при которых будет происходить переход от трехмерного к двумерному характеру протекания тока.

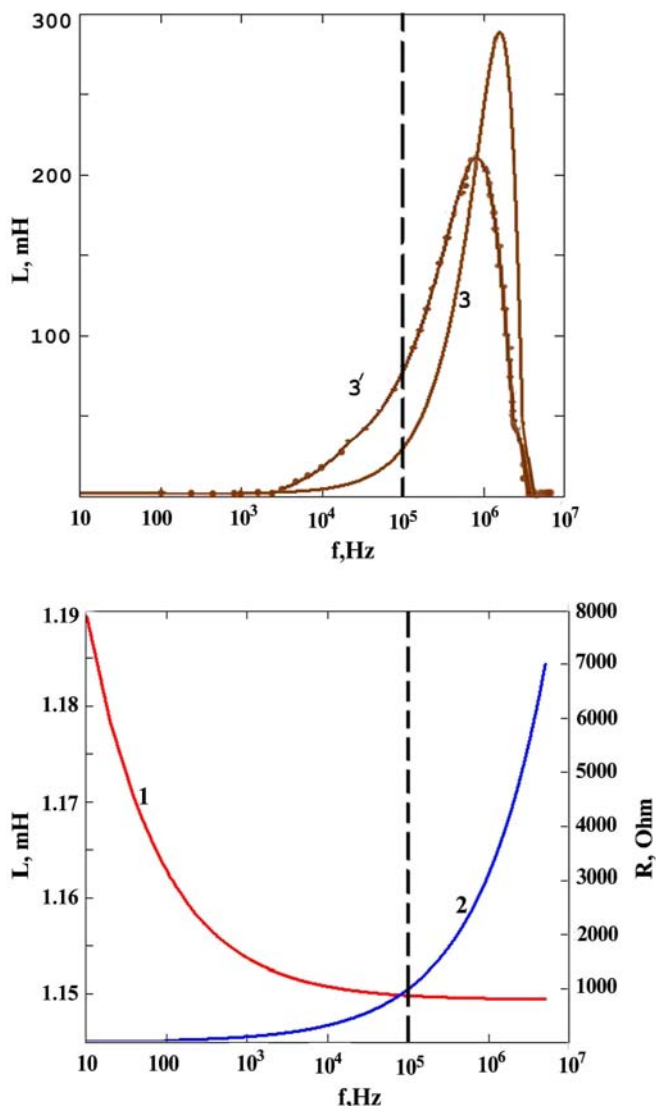
При применении частотнозависимого резистора в высоковольтных сетях и установках необходимо учитывать зависимость проводимости ферромагнитной оболочки от напряженности электрического поля. Из [18] следует, что основное влияние на нелинейность проводимости ферромагнитного слоя оказывает напряженность электрического поля и ширина зазора между проводящими частичками. Ширина зазора согласно расчетам  $\approx 3$  нм. Изменение зазора на 0.1 нм приводит к измене-

## О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ПРОТЕКАНИЯ ТОКА ЧЕРЕЗ ЧАСТОТНОЗАВИСИМЫЙ РЕЗИСТОР

нию проводимости на целый порядок, а увеличение напряженности поля в 10 раз – к возрастанию тока в 12 раз.

Ситуация, связанная с частотной зависимостью магнитной проницаемости также прямо связана с концентрацией ферромагнитных частиц и их размерами.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

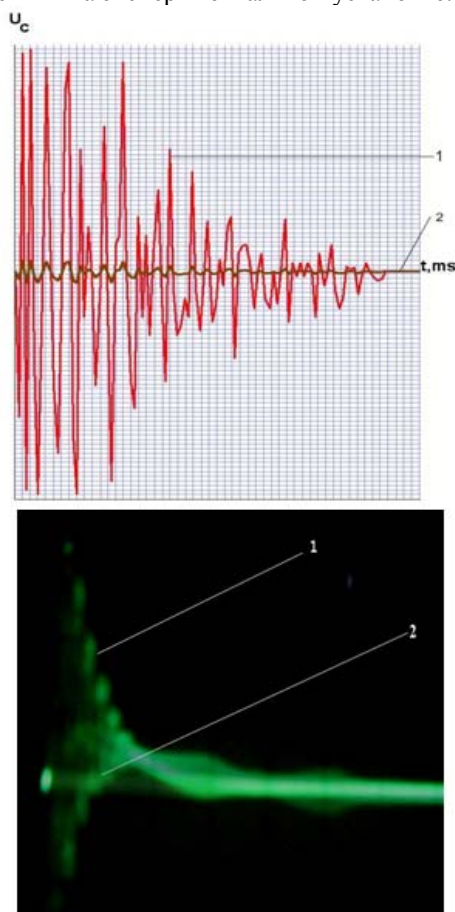


**Рис.3.** Частотная зависимость сопротивления и индуктивности частотнозависимого резистора: 1 – индуктивность алюминиевой части токоведущей стержня резистора; 2 – сопротивление резистора; 3 – индуктивность всего резистора с учетом частотной зависимости магнитной проницаемости  $\mu$  ферромагнитного слоя (3 – теоретическая, 3' – экспериментальная); положение прерывистой линии указывает на границу перехода от трехмерного к двумерному характеру протекания тока.

Экспериментальные исследования частотных свойств частотнозависимого резистора проводились на установке для измерения индуктивности, импеданса и активного сопротивления [20]. Рабочий диапазон частот моста от 20 Гц до 2 МГц; амплитуда переменного магнитного поля 100 А/м; погрешность измерения индуктивности ме-

нее 1%, сопротивления менее 5%; пределы измерения по сопротивлению от 1-3000 Ом; погрешность определения тока  $\pm 1,5\%$ . Диапазон изменения напряжения генератора от 0 до 10 кВ. Напряжение генератора, подаваемое на мост, стабилизировалось с точностью  $\pm 1\%$ . Электромагнитное поле от исследуемого объекта измерялось с помощью высокочувствительного градуированного по эталону датчиком. Расстояние между датчиком и объектом изменялось в пределах (0-2) м, достаточное для определения зависимости величины электромагнитного фона от расстояния. Измерительной установки калибровались измерениями на специализированной установке УИММ-4 для эталонных индуктивностей.

На рис.3 представлена частотная зависимость сопротивления и индуктивности частотнозависимого резистора. Эксперименты показали, что отклонение от корневой зависимости скин-эффекта в частотнозависимом резисторе, является результатом частотной зависимости магнитной проницаемости ферромагнитной оболочки, температурных эффектов и технологии изготовления оболочки. Кривая 3 соответствует идеальному случаю, т.е. в расчете индуктивности использовались магнитная проницаемость 300ВНП, 3' – реальная зависимость индуктивности, полученная на частотнозависимом резисторе при измерениях на экспериментальной установке.



**Рис. 4** Уровни высокочастотных шумов 1- на входе резистора; 2-на выходе

Пунктирной линией указано положение  $l_{p,2}$ , соответствующей переходу от трехмерного (при частотах ниже  $4.2 \cdot 10^5$  Гц) к двумерному (при частотах выше  $4.2 \cdot 10^5$  Гц) характеру протекания тока. При этом полное

сопротивление резистора изменяется на несколько порядков. Здесь следует отметить, что, как указывалось нами в предыдущих работах, условия распространения переменного тока частотой 50 Гц остаются неизменными, а фильтруется только высокочастотная компонента. На рис. 4 приведены осциллограммы работы частотнозависимого резистора в режиме фильтрации высокочастотных помех. Здесь 1 – сигнал на входе частотнозависимого резистора. Виден большой уровень высокочастотных шумов. Уровень 2 соответствует сигналу на выходе частотнозависимого резистора. Наблюдается резкое снижение уровня высокочастотных шумов.

Как показывают исследования [20] динамики временных изменений температурного поля, частотнозависимый резистор способен выдерживать кратковременные перегрузки по температуре ( $\approx 300^\circ\text{C}$ ) за промежутки времени порядка 2 сек., при частоте повторения 1 импульс за 5 сек.

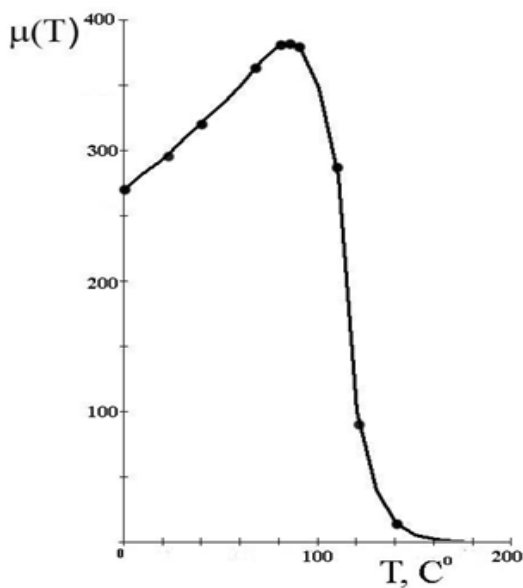


Рис.5. Температурная зависимость магнитной проницаемости ферромагнитного порошка 300 ВМП.

Температурные эффекты при скин-эффекте начинают проявляться при протекании больших токов и увеличении частоты, протекающего через частотнозависимый резистор, переменного тока. При этом, мы должны были наблюдать также изменения в механизме протекания тока через частотнозависимый резистор, что отразилось бы на его ВАХ. Уравнение теплопроводности решалось при следующих условиях [20]: температура окружающей среды (воздуха) равна  $28^\circ\text{C}$ ; температура нагрева токоведущего стержня не должна превышать  $100^\circ\text{C}$ . За критическую температуру нагрева ферромагнитной оболочки было принято значение  $50^\circ\text{C}$ , соответствующее темпе-

ратурной зависимости магнитной проницаемости 300ВМП (рис.5.) – 0.5см.

Влияние скин эффекта, особенно заметное на высоких частотах, приводит к возникновению температурного градиента между центром и поверхностью токоведущего стержня и, как следствие, к появлению теплового потока от поверхности к центру. Однако, в условиях проведения экспериментов, на ВАХ не наблюдались отклонения от линейного закона. На рис.6. сопоставлены температурные и вольтамперные характеристики созданного частотнозависимого резистора на разных частотах, где А – для токоведущего стержня на частоте 50 кГц; В, С – для ферромагнитной оболочки; W – допустимая удельная энергия, поглощаемая частотнозависимым резистором,  $\Delta T$  – разница между предельно-допустимой и начальной температурами. Диаметр токоведущего алюминиевого стержня частотнозависимого резистора был равен 1см, а толщина оболочки

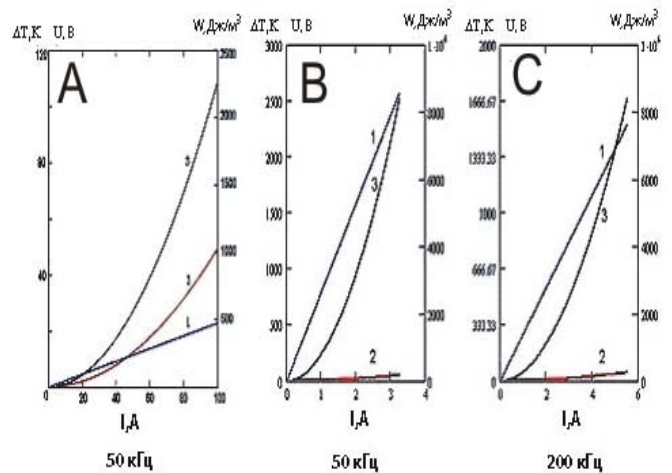


Рис.6. Температурные и вольтамперные характеристики частотнозависимого резистора на разных частотах: А – для токоведущего стержня на частоте 50 кГц; В, С, – для ферромагнитной оболочки. W – допустимая удельная энергия,  $\Delta T$  – разница между предельно-допустимой и начальной температурами.

## ВЫВОДЫ

Для всех частот, лежащих ниже 42кГц, протекание тока в исследованном в настоящей работе частотнозависимом резисторе имеет объемный характер. Для всех частот, лежащих выше 42кГц, протекание тока имеет двумерный характер. Характер изменения сопротивления в исследованном частотнозависимом резисторе определяется величиной магнитной проницаемости ферромагнитной оболочки.

[1]. А.М.Гашимов, Т.Р.Мехтиев, Н.Р.Бабаева Возможности ограничения высокочастотных перенапряжений при использовании частотнозависимого резистора. International conference Energy of Moldova-2005, September 21-24, Chisinau, p.265-269  
 [2]. А.М.Гашимов, Т.Р.Мехтиев, Н.Р.Бабаева Частот-

нозависимый резистор. Международная конференция «Физика - 2005», Баку, 7-9 июнь, 2005, стр. 613-617  
 [3]. А.М.Гашимов, Т.Р. Мехтиев, Н.Р.Бабаева Effect of magnetic multi-layer to resistive properties of frequency-dependent resistor. TPE-2006, 3<sup>rd</sup> Internation-



- al conference on Technical and Physical Problems in Power Engineering, 29-31 may 2006, Ankara, Turkey, p 604-606
- [4]. *A.M.Gashimov, T.R. Mekhtiyev, N.R.Babayeva* On appropriateness of use of frequency-dependent resistor at Limitation of high-frequency overvoltages. MEPS'06, September 6-8, 2006, Wroclaw, Poland, p.379-382
- [5]. *Н.Р. Бабаева* Алгоритм анализа высокочастотных перенапряжений при использовании в цепи коммутации частотнозависимого резистора. Проблемы энергетики, №3-4, 2006, стр.32-37
- [6]. *Н.Р. Бабаева* Подавление высокочастотных перенапряжений в высоковольтных электрических сетях и устройствах. Проблемы энергетики, №4, 2005, стр. 40-47
- [7]. *Е.В.Дмитриев, А.М.Гашимов, Т.Р.Мехтиев, Н.Р.Бабаева* Тепловые параметры и режим функционирования частотнозависимого резистора Материалы Конференции, Новосибирск, Россия, 9-12 января 2007, с.
- [8]. *С.М.Коробейников, Л.И.Сарин, А.А.Челазнов* Резистор с частотной зависимостью для уменьшения перенапряжений. Труды Второй Всеросс. Науч. Тех.Конф. «Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтрали сетей 6-35 кВ», Новосибирск, 15-17 октября, 2002, с.52-59.
- [9]. *С.М.Коробейников, Л.И.Сарин, А.А.Челазнов, А.П.Дрожжин* 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]. *С.М.Коробейников, А.П.Дрожжин, Л.И.Сарин* Скин-эффект в композиционных материалах. Электричество, №7, 2004, с.2-9
- [11]. *А.В.Неймарк* Электрофизические свойства перколяционного слоя конечной толщины. ЖЭТФ, 1990, т.98, вып.2(8), с.611-626
- [12]. *J.P.Clerc, G.Giraud, S.Alexander, E.Guyon* Phys. Rev, B,1980, v.22, p.2489-2494
- [13]. *Strauffer D.* Introduction to percolation theory. London. Tailor and Francis, 1985
- [14]. *A.L. Efros, V.I. Shklovskii,* Phys. Stat. Sol. (b), 1976, v.76, p.475
- [15]. *M. Daoud, F.Family, D.C. Hong,* J. Phys. A, 1988, v.21, p. L917
- [16]. *M. Daoud,* J. Phys. A, 1988, v.21, p. L973
- [17]. *Л.Д. Ландау, Е.М. Лившиц,* Электродинамика сплошных сред, 1982, 629 с.
- [18]. *В.П.Горелов, Г.А. Пугачев* Композиционные резисторы для энергетического строительства, Наука, 1989, 215с
- [19]. *В.И. Оделевский* Расчет обобщенной проводимости гетерогенных систем. ЖТФ, 1951, т.21, вып.6, с.667-677
- [20]. *Н.Р.Бабаева, А.М.Гашимов, Е.В.Дмитриев, Т.Р.Мехтиев* Изучение скин-эффекта и тепловых режимов работы частотнозависимогорезистора. Fizika, т.XIII, №1-2, 2007

Received: 01.07.2007