

УДК 537.855

С.М. Коробейников, Н.Я. Илюшов

## Низковольтные измерения частотно-зависимого резистора

Одним из возможных способов подавления высокочастотных перенапряжений является применение резистора, сопротивление которого увеличивается с ростом частоты входного сигнала [1–4]. При этом резистор подключается последовательно с защищаемым объектом. Его сопротивление на рабочей частоте 50 Гц не должно отличаться от сопротивления фазного проводника, соответственно резистор не будет препятствовать прохождению рабочего тока. Механизмом, обеспечивающим рост высокочастотного сопротивления, является скин-эффект. Известно, что благодаря скин-эффекту в обычных проводниках импульс перенапряжения становится более пологим, что при конечной длительности импульса уменьшает перенапряжение на десятки процентов [5]. Целью настоящей работы является измерение сопротивления частотно-зависимого резистора на высоких частотах.

**Ключевые слова:** частотно-зависимый резистор, сдвиг фаз, измерение, сопротивление.

### Форма образцов и методика измерения

Для проведения низковольтных измерений были изготовлены два образца частотно-зависимого резистора. Первый представлял собой полый цилиндр из алюминия длиной 400 мм диаметром 15 мм с толщиной стенки 2,1 мм. Во втором макете алюминиевый цилиндр диаметром 15,4 мм и толщиной стенки 2 мм имел 8 ребер высотой 15 мм. Толщина каждого ребра у основания составляла 3,8 мм, а в верхней точке 0,3 мм.

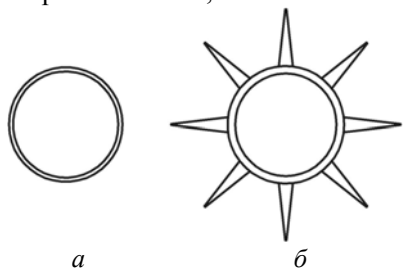


Рис. 1. Конструкции образцов частотно-зависимого резистора: а – образец №1; б – образец №2

Измерения проводились цифровым двухканальным осциллографом DS1022C через шунтирующее сопротивление, что позволило определять полное комплексное сопротивление  $Z$ -макета сравнением среднеквадратических напряжений, снимаемых каналами К1 и К2 осциллографа с макета  $R_m$  и малоиндуктивного сопротивления  $R_{ш}$  с известным значением сопротивления 10 Ом. Сигнал определённой частоты подавался с генератора SFG-2010 через эквивалентное сопротивление 50 Ом.

Кроме этого, на экране осциллографа в ручном режиме курсорных измерений измерялись временные интервалы между данными сигналами и определялись значения сдвига фаз между амплитудами напряжений, снимаемых с образца и шунтирующего сопротивления. По значениям полного комплексного сопротивления  $Z$  и фазового сдвига  $\varphi$  рассчитывались значения реактивного  $X$  и активного  $R$  сопротивлений образца.

### Измерения гомогенных образцов

Измерения показали, что с увеличением частоты входного сигнала с 50 Гц до 1 МГц полное сопротивление образца № 1 увеличивается со 120 мкОм на частоте 50 Гц до 0,38 Ом на частоте 1 МГц. То есть скин-эффект увеличивает сопротивление данного образца почти в три тысячи раз. Зависимость  $Z$  от частоты входного сигнала  $f$  приведена на рис. 2.

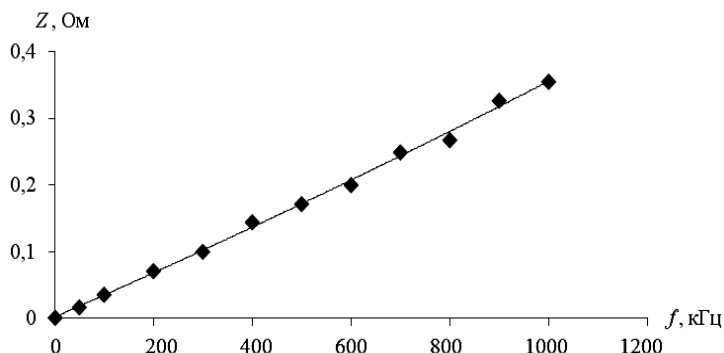
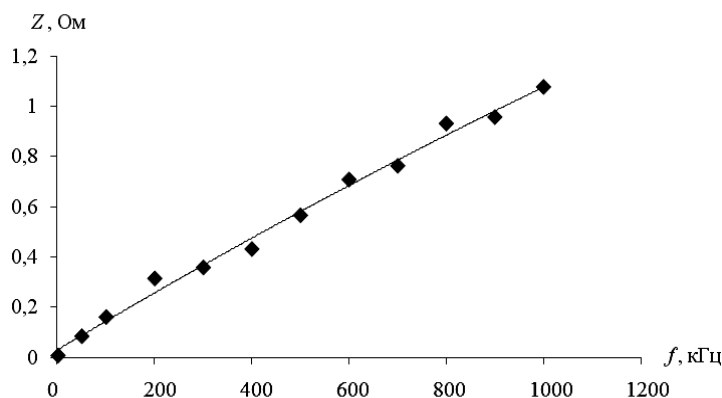


Рис. 2. Зависимость  $Z$  полового цилиндра от  $f$  входного сигнала

Гораздо более значительный рост сопротивления в зависимости от частоты входного сигнала наблюдался при проведении низковольтных измерений многолучевого образца. Его сопротивление возрастает со 140 мкОм до 1,1 Ом (рис. 3).

При этом зависимость сдвига фазы от частоты входного сигнала показала, что угол сдвига фаз для алюминиевого образца №1 увеличивается с  $14^\circ$  на низких частотах до  $80\text{--}89^\circ$  на частотах входного сигнала более 50 кГц. Следовательно, значение полного комплексного сопротивления частотно-зависимого резистора на частотах более 50 кГц в основном определяется его реактивной составляющей. Так, реактивная составляющая сопротивления данного образца увеличивается с 29 мкОм до 0,35 Ом, а активная составляющая до 0,018 Ом, т.е.  $R$  с ростом частоты входного сигнала возрастает всего лишь в 150 раз, а не в тысячи раз, как полное комплексное сопротивление данного образца.

Рис. 3. Зависимость полного комплексного сопротивления образца № 2 от частоты входного сигнала



Подобные соотношения между реактивными и активными составляющими наблюдаются и при замерах сопротивления многолучевого образца. Так, активная составляющая сопротивления данного образца с ростом частоты входного сигнала с 50 Гц до 1 МГц увеличивается до 0,07 Ом, в то время как его реактивное сопротивление увеличивается до 1,1 Ом.

Таким образом, можно сделать вывод, что на сопротивление частотно-зависимого резистора на высоких частотах влияют его форма и размеры, и для увеличения сопротивления образца необходимо рассчитать его оптимальные размеры и форму.

#### Измерения сопротивления двухкомпонентных образцов

Для проведения низковольтных измерений в двухслойной структуре на оба образца была прикреплена пленка из стали 5БДСР толщиной 0,025 мм, имеющая магнитную проницаемость порядка 1000 и электропроводность порядка 0,625 МСм/м. Измерения проводились по той же схеме, как и измерения однослойной модели. Результаты измерений показали, что пленка заметно увеличивает активное сопротивление образцов на высоких частотах. Так, на частоте 1 МГц сопротивление образца №1 увеличивается до 0,13 Ом по сравнению с 0,018 Ом, когда на этой же частоте сопротивление образца измерялось без пленки, то есть более чем в 7 раз. Полное комплексное сопротивление на частоте 1 МГц в случае применения пленки увеличивается 1,7 раза и достигает 0,6 Ом по сравнению с 0,38 Ом в случае измерения сопротивления без пленки.

Такой же рост сопротивления наблюдается и в случае наложения пленки из стали 5БДСР на лучи многолучевого образца. На рис. 4 и 5 приведены графики зависимости активного сопротивления данного образца и его полного комплексного сопротивления от частоты входного сигнала соответственно.

Как видно из графиков, активное сопротивление данного образца с пленкой на частоте 1 МГц увеличивается до 0,1 Ом по сравнению с 0,07 Ом, когда сопротивление измерялось без пленки. Полное комплексное сопротивление при этом увеличивается до 1,6 Ом.

Для наглядности результаты измерений активного и полного сопротивлений обоих образцов занесены в табл. 1 и 2 соответственно. Как видно из таблиц, наибольший рост активной составляющей сопротивления и полного

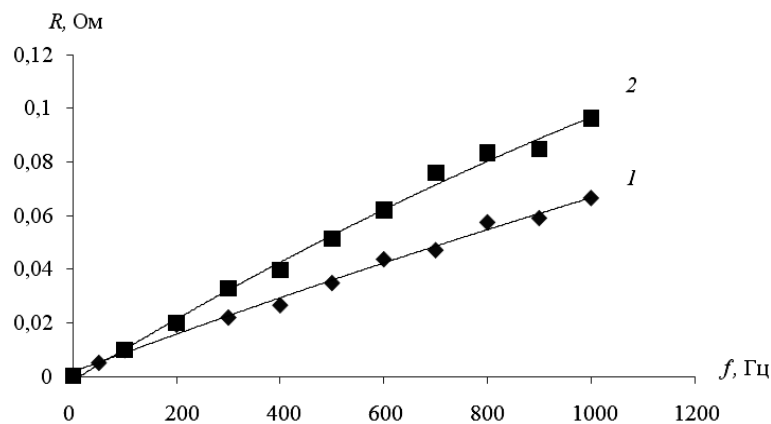
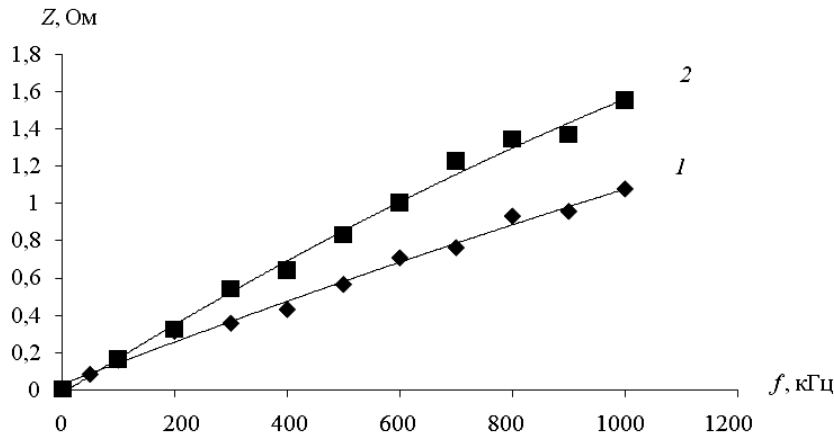


Рис. 4. Зависимость активного сопротивления многолучевого образца от частоты входного сигнала: 1 – без применения пленки; 2 – с применением пленки



комплексного сопротивления, как без пленки, так и с пленкой из стали наблюдается во многолучевом образце.

Рис. 5. Зависимость полного комплексного сопротивления многолучевого образца от частоты входного сигнала: 1 – без применения пленки; 2 – с применением пленки

Таблица 1

**Результаты измерения активного сопротивления образцов частотно-зависимого резистора**

№ образца	Без пленки			С пленкой		
	50 Гц	1 МГц	Рост	50 Гц	1 МГц	Рост
№1	120 кОм	0,02 Ом	166	120 мкОм	0,13 Ом	1083
№2	35 мкОм	0,07 Ом	2000	35 мкОм	0,1 Ом	2857

Таблица №2

**Результаты измерения полного сопротивления образцов частотно-зависимого резистора**

№ образца	Без пленки			С пленкой		
	50 Гц	1 МГц	Рост	50 Гц	1 МГц	Рост
№1	120 мкОм	0,4 Ом	3333	120 мкОм	0,6 Ом	5000
№2	139 мкОм	1,1 Ом	7913	139 мкОм	1,6 Ом	11510

**Измерение сопротивления трёхкомпонентных образцов**

Следующим способом увеличения сопротивления частотно-зависимого резистора на высоких частотах является создание образца из дисперсного материала. Для этого многолучевой образец с наложенной на его лучи стальной пленкой толщиной 0,025 мм был помещен в специальный корпус и пустоты между алюминиевыми полосами были заполнены ферромагнитным порошком с магнитной проницаемостью, равной 5. Таким образом, был получен частотно-зависимый резистор, составленный из композиции проводящего (алюминий) и непроводящего ферромагнитного материала. По результатам замеров полного комплексного сопротивления и его активной составляющей для данного образца были построены графики, приведенные на рис. 6.

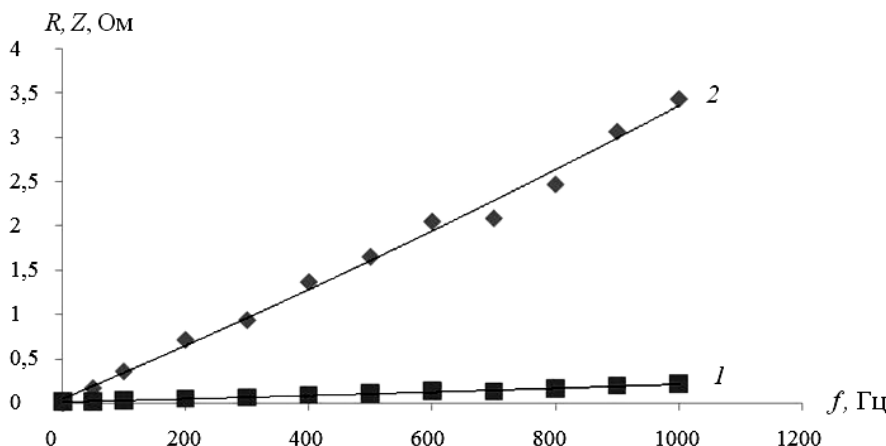


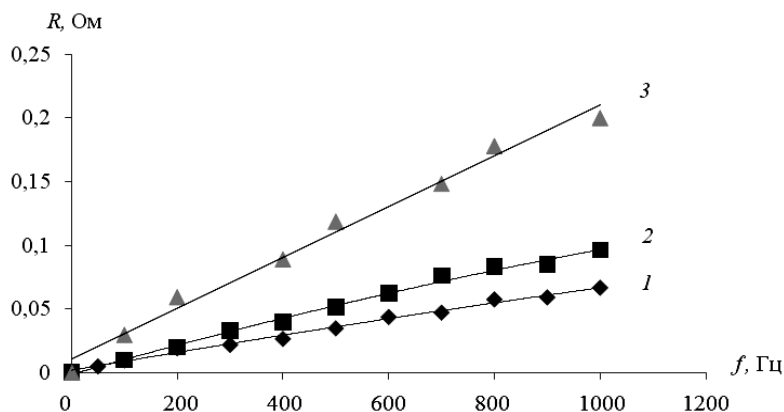
Рис. 6. Зависимость  $R$  и  $Z$  многолучевого образца от частоты входного сигнала при засыпке ферромагнитным порошком: 1 – активная составляющая сопротивления; 2 – полное комплексное сопротивление образца

Как видно из графиков, применение засыпки из ферромагнитного порошка также приводит к увеличению сопротивления образца на высоких частотах. Так активное сопротивление увеличилось с 41 мкОм до 0,2 Ом, т.е. возросло более чем в 5 тыс. раз. Еще больший рост наблюдается для полного комплексного сопротивления. Оно возросло почти в 18 тыс. раз со 195 мкОм до 3,5 Ом.

Для наглядности результаты измерения активного сопротивления многолучевого образца сведём в один график, представленный на рис. 7.

Как видно из графиков, наибольший рост активного сопротивления наблюдается во многолучевом образце при использовании пленки и засыпке его ферромагнитным порошком.

Рис. 7. Зависимость  $R$  многолучевого образца от частоты входного сигнала: 1 – образец без пленки; 2 – образец с пленкой, 3 – образец с пленкой и засыпкой ферромагнитным порошком



### Заключение

Таким образом, результаты низковольтных измерений образцов частотно-зависимого резистора показывают, что на его сопротивление на высоких частотах можно влиять тремя способами:

- 1) изменением формы макета;
- 2) применением накладок из менее проводящего материала с высокой магнитной проницаемостью;
- 3) использованием магнитных непроводящих материалов.

### Литература

1. Коробейников С.М. Уменьшение энергии, поглощаемой ОПН при воздействии грозового импульса / С.М. Коробейников, А.А. Челаэнов, Л.И. Сарин // Сб. докл. Всерос. сем. «Выбор и эксплуатация ОПН в эл. сетях 6–35 кВ». 15–18 мая 2001 г. – М.: РАО ЕЭС, 2001. – С. 23–31.
2. Один из способов уменьшения энергии, поглощаемой ОПН при воздействии грозового импульса / С.М. Коробейников, А.П. Дрожжин, Л.И. Сарин, А.А. Челаэнов // Сб. докл. Всерос. научн.-тех. совещ. «Научные аспекты и актуальные проблемы разработки, про-ва, исп. и примен. ОПН», СПб., 8–10 октября 2001 г. – СПб.: ОАО «Электрокерамика», 2001. – С. 14–18.
3. Коробейников С.М. Скин-эффект в композиционных материалах / С.М. Коробейников, А.П. Дрожжин, Л.И. Сарин // Электричество. – 2004. – № 7. – С. 2–9.
4. Бабаева Н.Р. Подавление высокочастотных перенапряжений в высоковольтных сетях и устройствах // Проблемы энергетики. – 2005. – № 4. – С. 48–56.
5. Базелян Э.М. Физика молнии и молниезащиты / Э.М. Базелян, Ю.П. Райзер. – М.: Физмалит, 2001. – 320 с.

### Коробейников Сергей Миронович

Д-р физ.-мат. наук, профессор, зав. каф. безопасности труда  
Новосибирского государственного технического университета (НГТУ)  
Тел.: (383) 346-17-86  
Эл. почта: kor\_ser\_mir@ngs.ru

### Илюшов Николай Яковлевич

Ст. преподаватель каф. безопасности труда НГТУ  
Тел.: 923-113-75-93  
Эл. почта: kamchatka1234@rambler.ru

Korobeynikov S.M., Ilushov N.YA.

### Low voltage measurements of frequency dependent resistor

It is considered low voltage measurements of two samples of frequency dependent resistors. Total, active and reactive resistances were measured. It was shown that in three component multibeam resistor the total resistance at  $f = 1$  MHz could be increased  $1,8 \cdot 10^4$  times in comparison with resistance at power-frequency voltage. Active resistance at the same condition could be increased  $5 \cdot 10^3$  times.

**Keywords:** voltage, current, frequency, protection, frequency dependent resistor.