

Измерения сопротивления двухслойного проводника резонансным способом

КОРОБЕЙНИКОВ С.М., МЕЛЕХОВ А.В., ИЛЮШОВ Н.Я.

Приведены результаты экспериментальных исследований сопротивления двухслойного цилиндрического проводника, состоящего из медной трубки и ферромагнитной ленты. Показано, что сопротивление прямо пропорционально частоте при пропускании малых токов. При токах больше 100 А, когда достигается магнитное насыщение ферромагнитного материала, этот аномальный скин-эффект превращается в обычный скин-эффект в медном проводнике, что приводит к переключению тока из ферромагнитной ленты в медную часть проводника.

Ключевые слова: электрооборудование, перенапряжения, способы ограничения, экспериментальные исследования

В настоящее время общепринятым методом подавления перенапряжений является использование ограничителей перенапряжений (ОПН), подключаемых параллельно защищаемому объекту. Однако ненулевая индуктивность ОПН должна снижать эффективность работы для случая ограничения высокочастотных перенапряжений грозового либо коммутационного происхождения. Ранее был предложен способ ограничения уровня перенапряжений, основанный на создании резистора, сопро-

Experiments on studying the impedance of a two-layer cylindrical conductor consisting of a copper tube and ferromagnetic tape are carried out. It is shown that the impedance of the conductor is directly proportional to the frequency when small currents are passed through it. At currents higher than 100 A, the anomalous skin effect transforms into the usual skin effect in the copper conductor if magnetic saturation of the ferromagnetic material is reached, which results in that the current passing through the ferromagnetic tape is switched to the conductor's copper part.

Key words: electrical equipment, overvoltages, limitation methods, experimental investigations

тивление которого значительно увеличивается при частотах, характерных для перенапряжений [1–3]. Резистор должен включаться последовательно с защищаемым объектом. На рабочей частоте $f=50$ Гц его сопротивление должно быть близко к сопротивлению провода такой же длины, а на частотах выше 50 Гц его сопротивление должно быть порядка десятков и сотен ом. При этом паразитная электромагнитная энергия поглощается, в основном, резистором, соответственно эта составляющая не

4. Кочкин В.И., Крайнов С.В., Кубарев Л.П., Федосов Л.Л. Программа электромагнитного расчета трехфазных компенсирующих реакторов трансформаторного типа. – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2009615642 (РФ), 2009.

5. Гвоздев Д.Б., Дроздов А.В., Кочкин В.И. и др. Применение быстродействующих источников реактивной мощности в электрических сетях Западной Сибири. – Электрические станции, 2010, №11.

[20.12.10]

Авторы: **Гвоздев Дмитрий Борисович** окончил факультет электроснабжения Кузбасского государственного технического университета в 1996 г. В 2000 г. там же защитил кандидатскую диссертацию по специальности «Электротехнические комплексы и системы, включая их управление и регулирование». Зам. председателя правления ОАО «ФСК ЕЭС», главный инженер.

Кочкин Валерий Иванович окончил электроэнергетический факультет (ЭЭФ) Московского энергетического

института (МЭИ) в 1962 г. В 1993 г. защитил в МЭИ докторскую диссертацию «Многофункциональные вентильные компенсаторы реактивной мощности для управления режимами работы энергосистем». Зам. научного руководителя ОАО «НТЦ электроэнергетики».

Кубарев Леонид Петрович окончил ЭЭФ МЭИ в 1965 г. В 1975 г. защитил в ВЭИ кандидатскую диссертацию «Исследование, разработка и применение обобщенного метода оптимизации и оценки параметров реакторов тиристорных преобразователей». Главный конструктор НПЦ «Энерком-Сервис».

Федосов Леонид Леонидович окончил электромеханический факультет Коммунарского горнометаллургического института в 1969 г. Зам. главного конструктора НПЦ «Энерком-Сервис».

Черезов Андрей Владимирович окончил Алтайский государственный технический университет по специальности «Электроснабжение» в 1993 г. Зам. председателя правления ОАО «ФСК ЕЭС».

проходит в защищаемый прибор или подстанцию. Резистивное поглощение энергии снижает амплитуду проходящих и отраженных электромагнитных волн. Механизмом, обеспечивающим рост высокочастотного сопротивления, может явиться хорошо известный скин-эффект. В этом направлении выполнены и другие работы [4–6], что указывает на его перспективность.

Определение реального поглощения энергии в резисторе вследствие скин-эффекта затруднено из-за малости активного сопротивления по сравнению с индуктивным. Кроме того, при больших токах возможно магнитное насыщение внешней оболочки резистора, что должно приводить к снижению его эффективности.

В статье приводятся результаты экспериментального исследования характеристик двухслойного малоиндуктивного макета при различных уровнях тока вплоть до значений, обеспечивающих магнитное насыщение.

Характеристики образца. Испытуемый образец представляет собой медную трубку диаметром 8 мм, с толщиной стенок 1 мм, длиной 120 см с намотанной по длине 110 см ферромагнитной лентой (L_z). В качестве сравнительной нагрузки (L_0) была выбрана такая же трубка без ленты. В экспериментах использовалась ошиновка в виде двухпроводной линии; обратным токопроводом являлась центральная жила кабеля РК-50-9-12 без оплетки, вплотную прижатого к образцу (см. рис. 1). Измеренные в такой компоновке измерителем Е7-10 на частоте 0,6 МГц значения индуктивностей составили: $L_z = 1$ мкГн, $L_0 = 0,7$ мкГн; емкость между образцом и обратным токопроводом (в разомкнутом варианте) $C_z = 80$ пФ. Сопротивление на постоянном токе $R_z = 5$ мОм.

Результаты экспериментов. На рис. 2 приведена принципиальная электрическая схема измерений. Измерения R_z на токах амплитудой от 10 А до 1 кА осуществлялись разрядом емкости C_0 на нагрузку через управляемый газовый разрядник тригatronного типа. Емкость C_0 (конденсаторы К15-4)

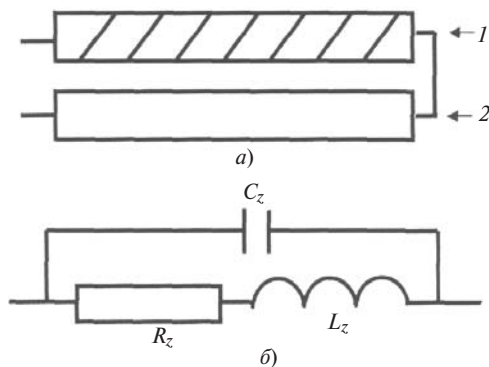


Рис. 1. Схема при эксперименте (а) и электрическая эквивалентная схема (б): 1 — образец; 2 — токопровод

заряжалась от стабилизированного источника постоянного напряжения. Амплитуда разрядного тока I и его частота f регулировались изменением зарядного напряжения U_0 и значением емкости C_0 . С измерительного стенда сигналы тока (с шунта $R_{ш}$) и напряжения (с делителя R_1, R_2) по коаксиальным кабелям поступали в экранированную комнату и регистрировались на осциллографе С8-14.

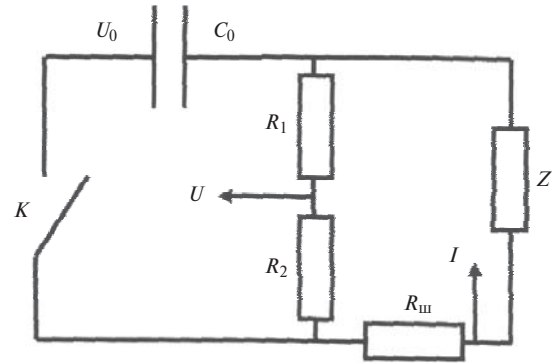


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема измерений: $U_0 = 1 \div 15$ кВ, $C_0 = 0,3 \div 5$ нФ, $R_1 = 2,1$ кОм, $R_2 = 50$ Ом, $R_{ш} = 0,3$ Ом

На рис. 3 приведены типичные осциллограммы токов, полученные на образце и реперной индуктивности, а также расчетные значения активных потерь. Измерения на образце и сравнительной на-

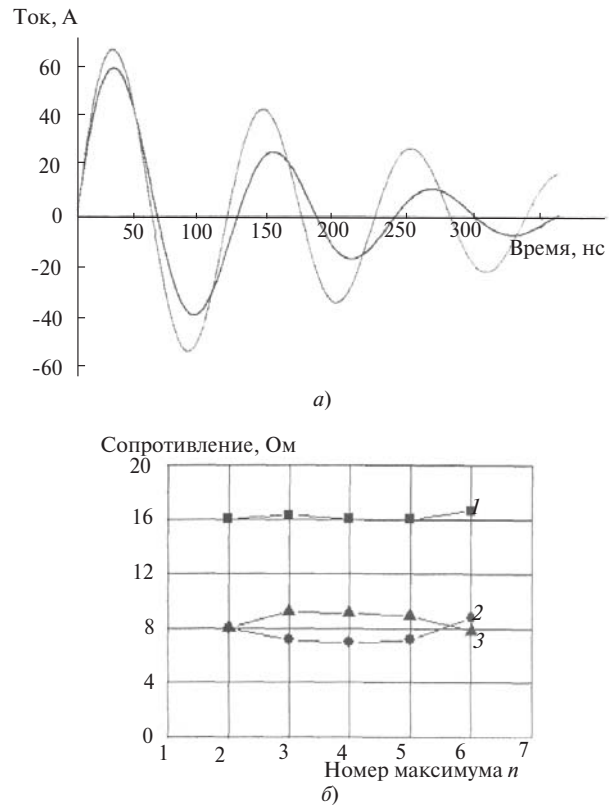


Рис. 3. Типичные осциллограммы токов (а) и расчетные значения сопротивлений (б): 1 — образец; 2 — сравнительная нагрузка; 3 — их разность ($C_0 = 0,325$ нФ, $U_0 = 5$ кВ)

грузке I_0 проводились в одинаковых начальных условиях ($U_0, C_0 = \text{const}$). Активные потери в контуре определялись из осциллограмм тока:

$$R_n = (2L/T) \ln((I_n + I_{n+1}) / (I_n + I_{n-1})),$$

где I_n — амплитуда тока в последовательных максимумах; T — период колебаний, определяемый из осциллограмм; $L = (T/2\pi)^2 / C_0$ — индуктивность контура.

Сопротивление R_n является суммой активного сопротивления контура (включая шунт, делитель напряжения), сопротивления, обусловленного потерями в керамическом конденсаторе C_0 и, в основном, сопротивления искрового разрядника K , которое вносит основную погрешность в определение активных потерь и не поддается точному расчету. Сопротивление разрядника со временем уменьшается, затем выходит на квазистационарный уровень и в процессе погасания тока опять увеличивается. Сравнение R_z и R_L осуществлялось на квазистационарной стадии сопротивления разрядника. Из данных рис. 4 видно, что при $f \approx 9$ МГц разность сопротивлений ($R_z - R_L$) в широком диапазоне токов ($I_n = 10 \div 60$ А) составляет $8 \div 9$ Ом.

($R_z - R_L$), Ом

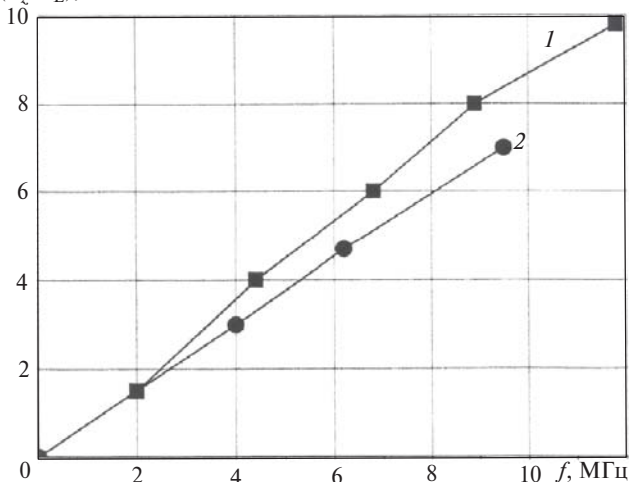


Рис. 4. Зависимость ($R_z - R_L$) от частоты f : 1 — высоковольтные измерения ($I_n \approx 10 \div 10^2$ А); 2 — низковольтные измерения ($I_n \leq 0,5$ А)

Сопротивление разрядника уменьшается с увеличением заряда, протекающего через искру [7], поэтому его вклад в сопротивление образца R_z должен быть несколько выше, чем для R_L . Измерение сопротивлений R_z и R_L другим способом (но тоже резонансным) при возбуждении резонанса в последовательном колебательном контуре с помощью генератора ГЗ-112/1 показало, что на частоте $f = 9 \div 10$ МГц разность сопротивлений ($R_z - R_L$) ≈ 7 Ом ($R_z \gg R_L$). Следовательно, отличие в значениях

($R_z - R_L$), измеренных этими двумя способами (с искровым коммутатором и без него), не превышает 20%. Поэтому в качестве меры эффективности поглощения энергии выбиралось значение ($R_z - R_L$).

На рис. 4 приведены экспериментальные данные по зависимости ($R_z - R_L$) от частоты в диапазоне токов $I_n \approx 10 \div 10^2$ А. Здесь же приведены результаты низковольтных измерений с помощью генератора.

Увеличение амплитуды тока свыше 100 А приводит к снижению эффективности резистивного поглощения энергии образцом. На рис. 5 приведена зависимость ($R_z - R_L$) от амплитуды тока. В течение нескольких начальных полупериодов ($I_1 \approx 1$ кА, $U_0 = 15$ кВ) фазовые и амплитудные значения токов существенно не отличались. По мере спада тока до значений ≤ 300 А фиксировалось отличие испытываемых образцов. При более низких начальных токах эффект был очевидней.

($R_z - R_L$), Ом

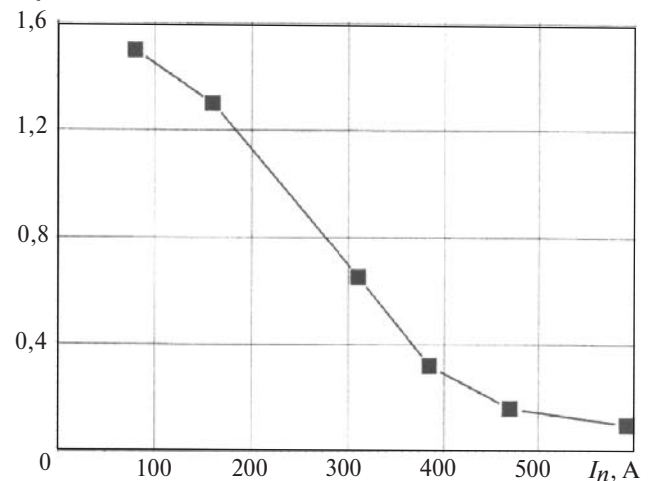


Рис. 5. Зависимость ($R_z - R_L$) от амплитуды тока для частоты $f \approx 2$ МГц ($C_0 = 5$ нФ)

Таким образом, в исследуемом диапазоне частот от 2 до 12 МГц можно выделить три диапазона токов: 1-й $I \geq 300$ А — эффекта нет; 2-й $I \leq 100$ А — эффект есть; 3-й $I = 100 \div 300$ А — частичный эффект.

Обсуждение полученных данных. Проведение измерений малых сопротивлений в широком диапазоне частот и токов является непростой задачей из-за влияния паразитных параметров электрических элементов. На малых частотах индуктивное сопротивление много больше активного сопротивления, на больших частотах может проявиться влияние паразитных емкостей, также может внести свой вклад излучение электромагнитной волны. Поэтому получение непротиворечивых экспериментальных данных несколькими способами повы-

шает их достоверность. К наиболее интересным полученным данным, на наш взгляд, можно отнести примерно линейную зависимость сопротивления от частоты в диапазоне частот до 10 МГц, а также выявление особенностей скин-эффекта при воздействии сильных токов.

Остановимся на этом вопросе подробнее. Напряженность магнитного поля в ферромагнитной пленке по закону Био—Савара—Лапласа при амплитуде тока, соответствующей началу исчезновения эффекта $I = 100$ А, $H \approx 4$ кА/м. Значение индукции в ферромагнитной пленке при $\mu \approx 10^3$ составляет несколько Тесла, т.е. пленка должна находиться в насыщении. Однако кратковременность возникновения насыщения вблизи точки максимума тока может привести, с одной стороны, к маскировке эффекта, т.е. его можно не заметить при измерениях, с другой — насыщение может не успеть возникнуть [3]. Действительно, оценку можно сделать, если воспользоваться выражением из [3], определяющим глубину слоя насыщения:

$$\Delta = \sqrt{\frac{Q\rho}{2\pi B_m r_3}},$$

где Q — интеграл от тока по времени (заряд, который протек через двухслойный проводник за время действия импульса); ρ — удельное сопротивление ферромагнитного материала; B_m — индукция насыщения; r_3 — радиус.

Из этого выражения можно оценить длительность действия тока амплитудой 100 А, при которой толщина скин-слоя не превысит толщины ферромагнитной ленты. Оценка дает длительность примерно 100 нс. Исходя из того, что четверть периода при частоте 2 МГц составляет 125 нс, можно утверждать, что оценка тока насыщения не противоречит модели, предложенной в [3].

Какие практические выводы могут последовать из полученных данных. На наш взгляд, полученные результаты можно использовать при подавлении высокочастотных перенапряжений, возникающих на подстанциях при работе разъединителей. Возникающие токи амплитудой несколько ампер имеют частоту в зависимости от емкости ошиновки больше 1 МГц. Следовательно, их можно подавлять с помощью резисторов, разработанных на основе исследованных макетов. Для грозозащитных перенапряжений, имеющих значения токов в килоамперном диапазоне, необходимо искать другой вариант, при котором не будет возникать магнитное насыщение.

Вывод. Проведенные измерения показывают, что эффект примерно пропорционального увеличе-

ния сопротивления с ростом частоты реально существует. По мере роста тока этот эффект в цилиндрических проводниках ослабляется, что связано с магнитным насыщением ферромагнитной ленты и проникновением тока в неферромагнитный проводник.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Уменьшение энергии, поглощаемой ОПН при воздействии грозового импульса. — Сб. докладов Всерос. семинара «Выбор и эксплуатация ОПН в электрических сетях 6–35 кВ». — М.: РАО ЕЭС, 15–18 мая 2001.
2. Коробейников С.М., Челазнов А.А., Сарин Л.И. и др. Один из способов уменьшения энергии, поглощаемой ОПН при воздействии грозового импульса. — Сб. докладов Всерос. научн.-тех. совещания «Научные аспекты и актуальные проблемы разработки, производства, использования и применения ОПН». — СПб: ОАО «Электрокерамика», 8–10 октября 2001.
3. Коробейников С.М., Дрожжин А.П., Сарин Л.И. Скин-эффект в композиционных материалах. — Электричество, 2004, №7.
4. Gashimov A.M., Mekhtiyev T.R., Babayeva N.R. Effect of magnetic multilayer to resistive properties of frequency-dependent resistor.—3rd Inter. Conf. on Technical and Physical Problems in Power Engineering (TRE-2006), Ankara (Turkey), 29–31 May 2006.
5. Gashimov A.M., Mekhtiyev T.R., Babayeva N.R. On appropriateness of use of frequency-dependent resistor at limitation of high-frequency overvoltages. — MEPS'06, Wroclaw (Poland), 6–8 September, 2006.
6. Бабаева Н.Р. Подавление высокочастотных перенапряжений в высоковольтных электрических сетях и устройствах. — Проблемы энергетики, 2005, №4.
7. Ковальчук Б.М., Кремнев В.В., Поталицин Ю.Ф. Сильноточные наносекундные коммутаторы. — Новосибирск: Наука, 1979.

[27.08.10]

Авторы: Коробейников Сергей Миронович окончил физический факультет Новосибирского государственного университета (НГУ) в 1973 г. В 1998 г. защитил докторскую диссертацию «Пузырьковая модель зажигания импульсного электрического разряда в жидкостях». Заведующий кафедрой «Безопасность труда» Новосибирского государственного технического университета (НГТУ).

Мелехов Александр Викторович окончил физический факультет НГУ в 1975 г. В 2008 г. защитил кандидатскую диссертацию «Исследования предпробивных процессов в воде с приэлектродными пузырьками в микросекундном диапазоне». Старший научный сотрудник Института лазерной физики СО РАН, доцент кафедры «Безопасность труда» НГТУ.

Илюшов Николай Яковлевич окончил радиотехнический факультет Высшего военно-морского училища радиоэлектроники им. А.С. Попова в 1980 г. Старший преподаватель кафедры «Безопасность труда» НГТУ.