

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Векслер М.С., Теплинский А.М. Шунты переменного тока. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 120 с.
2. Muravyov S.V., Borikov V.N., Natalinova N.M. A computer system: measurement of welding surge currents // *Measurement and Control*. – 2009. – V. 42. – № 3. – P. 44–47.
3. Глебович Г.В., Андриянов В.А., Введенский Ю.В. и др. Исследование объектов с помощью пикосекундных импульсов. – М.: Радио и связь, 1984. – 256 с.
4. Cherbaucich C., Crotti G., Kuljaca N., Novo M. Evaluation of the dynamic behaviour of heavy current shunts // *Metrology in the 3rd Millennium: Proc. XVII IMEKO World Congress*. – Dubrovnik, Croatia, 2003, 22–27 June. – P. 586–589.
5. Заревич А.И., Муравьев С.В., Бедарева Е.В., Величко О.Н. Цифровая обработка импульсных сигналов для определения частотных характеристик преобразователей тока // *Известия Томского политехнического университета*. – 2012. – Т. 320. – № 5. – С. 116–120.
6. Мэтьюз Д.Г., Финк К.Д. Численные методы. Использование MATLAB, 3-е изд.: Пер. с англ. Л.Ф. Козаченко. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2001. – 720 с.
7. Бендат Дж.С., Пирсол А.Дж. Применения корреляционного и спектрального анализа. – М.: Мир, 1983. – 312 с.
8. Cordingley B., Chamund D.J. Some observations on the performance of modern wideband current transformers in pulse current measurement applications // *Proc. of 5th Modulator-Klystron Workshop for Future Linear Colliders CERN*. – Geneva, Switzerland, 2001, 26–27 April. 2001. URL: <http://mdk2001.web.cern.ch/mdk2001/Proceedings/SessionPoster/sessionpos.pdf> (дата обращения: 19.04.2012).

Поступила 12.09.2012 г.

УДК 621.317.727.1

МИНИМИЗАЦИЯ ЕМКОСТИ ДЕКАДЫ ИНДУКТИВНОГО ДЕЛИТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ

А.И. Заревич, С.В. Муравьев

Томский политехнический университет
E-mail: antonzarevich@ngs.ru

Описаны способы снижения емкостной компоненты погрешности коэффициента деления индуктивного делителя напряжения, основанные на оптимизации конфигурации обмоток. С учётом физических свойств и размеров магнитопровода, а также требований к входному сигналу определено минимальное количество витков обмотки декады.

Ключевые слова:

Индуктивный делитель напряжения, межобмоточная емкость, погрешность измерения.

Key words:

Inductive voltage divider, interwinding capacitances, measurement errors.

Введение

Индуктивные делители напряжения (ИДН) предназначены для выполнения прецизионных масштабных линейных преобразований электрических сигналов. Они находят широкое применение во многих областях науки и техники [1]. Расширение частотного и динамического диапазонов является одной из наиболее важных задач, стоящих перед разработчиками ИДН и осложняется снижением точности коэффициента деления за счет различного рода погрешностей [2]. Существенный вклад в погрешность коэффициента деления вносят паразитные емкости. Они формируются, в первую очередь, из межвитковых емкостей обмоток, а также из емкостей между проводами обмоток, сердечниками и экранами.

Известно, для расширения динамического диапазона в низкочастотной области необходимо наращивание числа витков обмоток декад. Это обуславливает рост индуктивной составляющей входного импеданса и предотвращает насыщение материала сердечников. В то же время, увеличение разрядности ИДН реализуется за счет увеличения числа декад. Перечисленные факторы приводят к неизбежному технологическому возрастанию пара-

зитных емкостей, которые, в свою очередь, вносят существенный вклад в погрешность коэффициента передачи ИДН. Уменьшение данного вида погрешностей может быть достигнуто различными конструктивными путями, направленными на общее снижение емкости отдельно взятой декады делителя, что и является темой настоящей статьи.

Свойства магнитопроводов

Исследования авторов направлены на создание индуктивного делителя напряжения с расширенным динамическим и частотным диапазонами. Нижняя граница частотного диапазона разрабатываемого делителя не должна превышать 20 Гц, а действующее значение гармонического напряжения – 10 В.

Для обеспечения поставленных требований, в качестве материала для сердечников декад был выбран пермаллой ГМ-501 (ГАММАМЕТ® 501) [3]. Данный вид пермаллоя отличается высокой магнитной проницаемостью и малыми потерями на перемагничивание в широком диапазоне частот.

Использованные в исследовании сердечники изготовлены из ленты толщиной 25 мкм, и имели следующие размеры: внешний диаметр – 80 мм, внутренний диаметр – 50 мм и высота – 40 мм.

Для определения частотного диапазона, в рамках которого делитель, построенный на указанных сердечниках, сможет обеспечить необходимую точность деления, была определена магнитная проницаемость сердечника. Типичные результаты этих измерений приведены на рис. 1. Эти данные получены путем усреднения результатов двух экспериментов. В первом фиксировалось значение напряженности магнитного поля на уровне $H=0,1$ А/м, а во втором фиксировалось значение индукции магнитного поля на уровне $B = 0,01$ Тл.

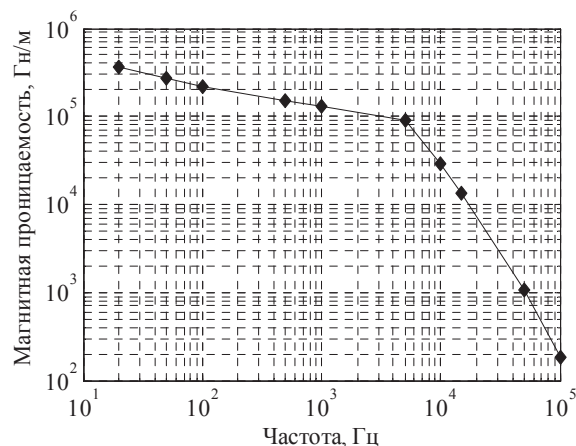


Рис. 1. Частотная зависимость магнитной проницаемости сердечника

Заметно, что начиная с частоты 5 кГц, происходит существенное снижение магнитной проницаемости магнитопровода. Наблюдаемая дисперсия обусловлена аморфной структурой магнитно-мягкого материала, приводящей к росту потерь на перемагничивание с ростом частоты [4]. Это на практике приведет к существенному снижению индуктивной составляющей импеданса декады сердечника. Что на фоне возрастания емкостной составляющей импеданса ограничит частотный диапазон ИДН.

Полученные данные позволили оценить минимальное количество витков декады, при которой сердечник не будет насыщен при подаче на вход гармонического сигнала, заданного уровня 10 В действующего значения.

Результаты определения минимального количества витков приведены на рис. 2.

Как видно из графика, количество витков в обмотке первой декады должно быть не менее 1000. Необходимость такого увеличения числа витков обусловлена малым индуктивным импедансом катушки в области низких частот. Уменьшение числа витков приведет к значительному увеличению магнитного потока внутри сердечника и, следовательно, к насыщению и нелинейному изменению проводимости катушки. Также на графиках можно отметить участок в области частот от 5 кГц и выше, где также возрастает минимальное необходимое количество витков. Наличие этого участка обусловлено дисперсией магнитной проницаемости сердечника и её резким уменьшением, что и видно на рис. 1.

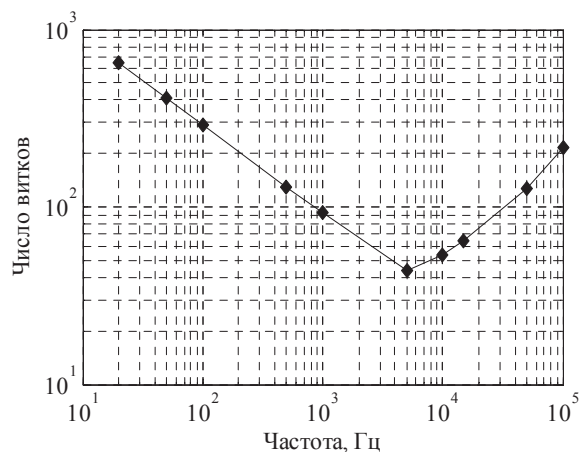


Рис. 2. Частотная зависимость минимального числа витков в обмотке

Емкость обмоток

Емкость обмотки может быть уменьшена двумя путями – за счет подбора проводов и за счет оптимизации намотки [5]. Известно, что емкость двух расположенных рядом проводников прямо пропорциональна площади их поверхности и диэлектрической проницаемости вещества между проводниками и обратно пропорциональна расстоянию между ними. Отсюда следует, что для уменьшения емкости обмотку необходимо выполнять проводом минимального диаметра с максимальным расстоянием между витками. Однако указанное замечание вступает в противоречие с известными принципами построения ИДН, согласно которым для обеспечения сильной индуктивной связи обмотку необходимо выполнять плотно скрученным жгутом. Провода в таком жгуте расположены максимально близко друг к другу. Именно такая обмотка, несмотря на значительную емкость, за счет тесной индуктивной связи обеспечивает наибольшую точность деления. Тем не менее, существует возможность уменьшить паразитную емкость за счет подбора необходимых проводов и оптимизации скрутки жгута.

Для определения оптимального шага скрутки жгута были изготовлены жгуты, скрученные из двух проводов. Рассмотрены варианты с использованием ем проводов разного диаметра с двойной эмалевой изоляцией и проводов с изоляцией из шелка. Для определения емкостей обмоток использовался автоматизированный модульный комплекс National Instruments PXI 1031. Результаты измерений погонной емкости жгутов приведены в таблице.

Таблица. Погонные емкости жгутов

Марка провода	Изоляция провода	Диаметр, мм	Число скруток на метр	Погонная емкость, пФ/м
ПЭТВ-2	Двойная эмалевая	0,316	15	90
			30	106
ПЭТВ-2	Двойная эмалевая	0,21	15	50
			30	64
ПЭЛШО	Шелк	0,19	15	60
			30	69

Как видим, наименьшей емкостью обладает жгут, скрученный из проводов с двойной эмалевой изоляцией, диаметром 0,21 мм с минимальным числом скруток на метр. Однако более практичным является использование провода из шелка, поскольку он, при малом диаметре, существенно повышает надежность делителя и электрическую прочность обмоток. Следует заметить, что полученный результат ещё не означает, что использование такого жгута существенно повысит точность коэффициента деления, поскольку шелковая изоляция несколько увеличивает расстояния и уменьшает индуктивную связь между проводами в жгуте.

Дальнейшим путем уменьшения емкости является оптимизация способа намотки. Многочисленные исследования показали, что паразитная емкость катушки существенным образом определяется взаимным расположением её проводов.

Уменьшение емкости может быть достигнуто только за счет увеличения расстояния между проводами при желательном сохранении неизменными габаритов катушки, что реализуется за счет использования секционирования. При таком способе катушка разделяется на несколько секций соединенных последовательно. Результирующая емкость при этом оказывается меньше минимальной емкости отдельной секции. К намотке отдельной секции в данном случае требования минимальны.

При создании ИДН используются всевозможные способы намоток [6]. При расширении частотного диапазона и увеличении числа витков используется секционирование намотки. Обычно используют не более 4–5 секций. Однако в узком частотном диапазоне и при числе витков порядка 1000 может быть использовано до 10 секций.

С целью определения оптимального способа намотки исследованы различные варианты намоток декад делителя. Для исследования была использована обмотка, состоявшая из 100 витков, намотанных жгутом из 10 проводов. Суммарное количество витков в обмотке составляло 1000, что соответствует минимальному значению для нижней границы частотного диапазона – 20 Гц. Намотка выполнялась проводом диаметром 0,21 мм, шаг скрутки жгута – 25 витков на метр, длина жгута составляла 15 м. В результате получены следующие значения ёмкостей катушек: намотка секционная внавал – 1900 ± 40 пФ, намотка секционная универсаль – 1620 ± 35 пФ, намотка волновая – 1730 ± 40 пФ.

Как и следовало ожидать, секционирование обмотки привело к значительному снижению паразитной емкости. Дальнейшее улучшение качества намотки, за счет использования намотки типа универсаль внутри секций, ещё более снизило паразитную емкость. Использование волновой намотки не привело к заметному изменению результирующей емкости обмотки по сравнению с предыдущим случаем. Некоторое возрастание паразитной емкости может быть связано с большей длиной жгута.

Таким образом, можно сделать вывод о целесообразности применения для изготовления декад ИДН намотки волнового типа. Намотка типа секционная универсаль за счет минимальной ёмкости может быть использована для изготовления первой ступени первой и второй декад ИДН. Неравномерность взаимных ёмкостей между выводами декады может быть снижена за счет обмоток первой и второй декад, которые будут расположены во внешнем слое и выполнены по волновому типу.

Относительная погрешность коэффициента деления

Иллюстрацией практического применения сделанных выводов служат измерения относительной погрешности коэффициента деления двух декад ИДН, изготовленных в соответствии с выбранными способами.

Намотки обеих декад выполнены жгутом, скрученным из десяти проводов диаметром 0,19 мм с шагом скрутки порядка 20 витков/м. На тороидальные магнитопроводы намотано 100 витков жгута, то есть суммарное количество витков обмотки составляло 1000.

Декада с намоткой типа секционная универсаль (рис. 3) состояла из десяти секций. Каждая секция включала 9 витков, выполненных намоткой универсаль, десятый виток соединял секции друг с другом.



Рис. 3. Декада с намоткой типа секционная универсаль

На вход исследуемой декады подавался сигнал с генератора-калибратора Fluke 5520A. С помощью прецизионного мультиметра Agilent 3458 измерялись напряжения на выводах декады, затем по полученным данным рассчитывались относительные погрешности коэффициента деления. Результаты этих экспериментов приведены на рис. 4. Полученные в данном опыте результаты сравнивались с таковыми, полученными при использовании эталонного масштабного преобразователя ДИ-3.

Из представленных графиков видно, что в диапазоне частот 0,02...10 кГц применение намоток типа секционная универсаль и волнового типа позволяет снизить максимальную погрешность коэффициента деления относительно образца. Также можно заметить, что благодаря указанным способам намотки поведение погрешности в частотном диапазоне существенно равномернее.

Ограничение частотного диапазона, по сравнению с таковым у эталона связано, на наш взгляд, с существенно большими емкостями обмоток. В то же время, большее число витков позволяет уме-

нышить погрешность вблизи нижней границы частотного диапазона. Также, увеличение длины проводов обмотки увеличивает индуктивности рассеяния, что также проявляется на высоких частотах.

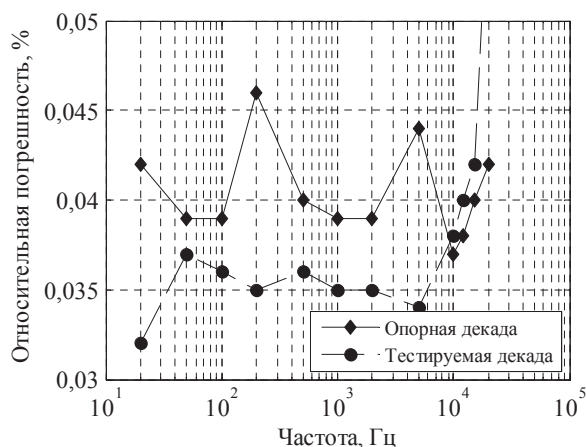


Рис. 4. Частотная зависимость относительной погрешности деления ИДН

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ройтман М.С., Ким В.Л., Калиниченко Н.П. Кодоуправляемые прецизионные делители напряжения // Измерения, контроль, автоматизация. — 1986. — Вып. 1 (57). — С. 3–17.
2. Ким В.Л. Методы и средства повышения точности индуктивных делителей напряжения. — Томск: Изд-во ТПУ, 2009. — 214 с.
3. Магнитные свойства кольцевых магнитопроводов из аморфных и нанокристаллических сплавов в защитных контейнерах ГАММАМЕТ® 501. URL: <http://gamma-met.ru/ru/gm501.htm> (дата обращения: 18.09.2012).

Выводы

Исследовано влияние различных способов намотки декад индуктивного делителя напряжения на относительную погрешность коэффициента передачи.

С учётом свойств магнитопровода и требований к входному сигналу определено минимальное количество витков обмотки декады.

Показано, что использование дополнительного секционирования обмотки позволяет уменьшить на 15 % неравномерность коэффициента передачи для средних отводов декады в диапазоне частот 0,02...10 кГц и снизить погрешность деления в 2 и более раз по сравнению с традиционными способами намотки.

Работа проведена в соответствии с грантом № НК-566П/13 по направлению «Создание электронной компонентной базы» в рамках мероприятия 1.2.1 «Проведение научных исследований научными группами под руководством докторов наук» федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.

4. Боровик Е.С., Еременко В.В., Миллер А.С. Лекции по магнетизму. 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Физматлит, 2005. — 512 с.
5. Skubis T. Optimal Multifilar Winding Connection for Inductive Voltage Dividers // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. — 1998. — V. 47. — Iss. 1. — P. 204–208.
6. Гриневич Ф.Б., Грохольский А.Л., Соболевский К.М., Цапенко М.П. Трансформаторные измерительные мосты / под ред. К.Б. Карандеева. — М.: Энергия, 1970. — 280 с.

Поступила 18.09.2012 г.