

ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ЦЕПИ

УДК 621.317.733

Ф. Б. ГРИНЕВИЧ,
К. Б. КАРАНДЕЕВ, К. М. СОБОЛЕВСКИЙ

(Новосибирск)

ОБ ИЗМЕРЕНИИ ПАРАМЕТРОВ КАТУШЕК ИНДУКТИВНОСТИ МОСТАМИ С ДИСКРЕТНЫМ УРАВНОВЕШИВАНИЕМ

В [1] показано, что при измерениях индуктивности и добротности, оценивая точность измерения индуктивности L по величине $\frac{\Delta L}{L}$, точность измерения добротности Q при $Q > 1^*$ следует оценивать соответственно по величине $\frac{\Delta Q}{Q^2}$. Оценка точности измерения индуктивности по $\frac{\Delta L}{L}$ ни у кого не вызвала возражений, однако оценка точности измерения Q по величине $\frac{\Delta Q}{Q^2}$ не получила распространения и не вошла в ГОСТ на мосты переменного тока [2], несмотря на настоятельные рекомендации авторов. До настоящего времени считается, что погрешность измерения добротности следует оценивать и регламентировать по соотношению $\frac{\Delta Q}{Q}$.

При создании мостов с дискретным уравниванием особенно четко вырисовалась неприемлемость соотношения $\frac{\Delta Q}{Q}$ для оценки точности измерения добротности. Больше того, возник вопрос о том, рационально ли вообще измерять добротность и возможно ли технически получить удобные и простые схемы цифровых автоматических мостов, обеспечивающие равномерную точность измерения добротности и приемлемую стабильность чувствительности по добротности. Настоящая работа и посвящена рассмотрению этих вопросов.

Для большей ясности начнем с измерения емкостных сопротивлений. Так как емкость эквивалентна проводимости, то очевидно, что идеальным режимом для измерения емкости будет режим заданного напряжения, поскольку, измерив ток при помощи устройства, имеющего практически нулевое внутреннее сопротивление, получим непосредственно искомое значение емкости (наиболее подходящим инструментом для этого являются мосты с тесной индуктивной связью: компаратор тока имеет нулевое внутреннее сопротивление).

* Очевидно, что при $Q < 1$ вряд ли является правильным говорить об индуктивности с потерями — по-видимому, здесь уместнее вести разговор об активном сопротивлении с остаточной реактивностью индуктивного характера.

ности.

Следовательно, измерительные устройства, измеряющие или сравнивающие токи, будут идеальными для измерения емкостей. Этим и объясняется то, что мосты с тесной индуктивной связью, содержащие компаратор токов, получили исключительное распространение для измерения параметров конденсаторов. В частности, эти мосты весьма удобны для применения в цифровых приборах для измерения C , так как в силу принципа действия могут обеспечить прямой отсчет измеряемой величины и постоянную чувствительность.

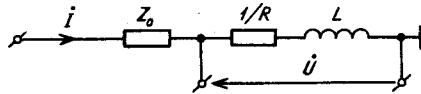
Касаясь вопроса об измерении тангенса угла потерь ($\operatorname{tg} \delta$) емкостных объектов, напомним, что при последовательной схеме замещения конденсатора тангенс угла потерь пропорционален последовательно включенному сопротивлению, а при параллельной — параллельно включенной проводимости. При этом $\operatorname{tg} \delta$ имеет реальный физический смысл как коэффициент потерь энергии, а его эквиваленты — последовательно включенное сопротивление и параллельно подключенная проводимость — составляют привычные для нас и естественные сочетания (противоестественным сочетанием следовало бы, например, считать последовательно соединенную проводимость). Очевидно, что мы имеем в виду противоестественные сочетания не вообще, а с точки зрения измерительной техники.

Перейдем теперь к рассмотрению особенностей измерения индуктивных сопротивлений. Так как индуктивность — это эквивалент не проводимости, а сопротивления, то для того чтобы получить постоянную и равномерную чувствительность в мосте с дискретным уравниванием, необходимо обеспечить режим заданного тока. Отсюда мы приходим к первому не очень утешительному выводу: мосты с компараторами токов (двойные мосты с тесной индуктивной связью) являются далеко не идеальным инструментом для измерения индуктивностей, так как в них можно обеспечить лишь противоположный требуемому режим — режим заданного напряжения. Следовательно, для измерения индуктивности, по-видимому, придется искать другие решения, если мы хотим обеспечить идеальный режим измерения (режим заданного тока) и постоянную чувствительность.

Еще значительно более сложным является вопрос об измерении добротности Q индуктивных объектов. Так как $Q = \frac{\omega L}{R}$ при последовательной схеме замещения объекта и $Q = \frac{R}{\omega L}$ при параллельной схеме замещения, то нетрудно показать, что добротность Q прямо пропорциональна последовательно включенной проводимости $\frac{1}{R}$ или параллельно включенному сопротивлению R . На рисунке представлен один из вариантов схемы ветви моста с индуктивностью L , проводимостью $\frac{1}{R}$ и образцовым сопротивлением Z_0 . Для того чтобы обеспечить требуемый режим $I = \text{const}$, необходимо соблюсти условие $|R + j\omega L| \ll |Z_0|$. При этом напряжение \dot{U} , снимаемое с контролируемой катушки индуктивности с сопротивлением $R + j\omega L$, будет иметь составляющие, прямо пропорциональные R и $j\omega L$, т. е. схема будет обеспечивать достаточно равномерную чувствительность по последовательно включенным активному

или реактивному сопротивлению или по $\operatorname{tg} \delta$ и L , где $\operatorname{tg} \delta = \frac{R}{\omega L}$.

В то же время легко увидеть, что даже в этой идеальной схеме, не говоря уже о других, невозможно одновременно обеспечить равномерную чувствительность по сопротивлению ωL и по последовательно включенной с ним проводимости $\frac{1}{R}$, т. е. по L и по Q .



Действительно, поскольку $\dot{U} = j\omega L \left(1 - \frac{j}{Q}\right) i$, то при $I = \text{const}$ имеем:

$$\dot{S}_L = \frac{\partial \dot{U}}{\partial L} = j\omega i;$$

$$\dot{S}_Q = \frac{\partial \dot{U}}{\partial Q} = -\frac{\omega L}{Q^2} i. \quad (1)$$

Из равенств (1) видно, что в идеальном режиме чувствительность по L постоянна и не зависит ни от L , ни от Q , а чувствительность по Q прямо пропорциональна величине L и обратно пропорциональна квадрату величины Q . Безусловно, выражение для \dot{S}_Q связано с нормированием соответствующей погрешности по величине $\frac{\Delta Q}{Q^2}$, как это показано в [1].

Указанная связь определяется отнюдь не применением той или иной измерительной цепи, в том числе и мостовой. И в первом случае (при рассмотрении чувствительности), и во втором (при рассмотрении погрешности) множитель $\frac{1}{Q^2}$ появился вследствие того, что во внешних своих проявлениях сопротивление Z претерпевает приращения, обратно пропорциональные Q^2 .

Для иллюстрации сказанного обратимся к следующему примеру. Допустим, что катушка индуктивности имеет добротность $Q=100$. Если Q изменится на 1 и станет, например, равной 101, то на сколько процентов изменится напряжение U при условии, что катушка индуктивности включена в цепь, представленную на рисунке? Простой расчет показывает, что U изменится на 0,0001, т. е. на 0,01%. Отсюда следует, что даже в идеальном случае (идеальный режим заданного тока) изменение Q на 1 при $Q=100$ исключительно мало отражается на значении общего сопротивления катушки индуктивности и, следовательно, для своего обнаружения и измерения требует очень высокоточных приборов (в данном примере для измерения Q с погрешностью ± 1 при $Q=100$ требуется прибор класса 0,01). Очевидно, что если поставить задачу измерения Q с точностью до ± 1 при $Q \approx 1000$, то потребовался бы прибор класса 0,0001, что нереально.

Таким образом, мы неизбежно приходим к сформулированному в [1] заключению о необходимости нормирования погрешности измерения Q по $\frac{\Delta Q}{Q^2}$.

Указанное нормирование погрешности измерения Q связано с определенными практическими затруднениями. Прежде всего оно приводит к результатам, которые хотя и являются обоснованными по существу, тем не менее на первый взгляд кажутся неожиданными. Так, например, если принять нормируемую погрешность измерения в 0,5%, т. е. $\frac{\Delta Q}{Q^2} = 0,005$, то для $Q=100$ абсолютная погрешность измерения Q составит $\Delta Q=50$. Отсюда следует, что добротность порядка 100 на мосте среднего класса точности можно измерить с погрешностью $\pm 50\%$. Указанный результат не будет, естественно, столь неожиданным, если перейти к измерению $\operatorname{tg} \delta$. В самом деле, если при $\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{Q} = 0,01$ принять ту же точность измерения, что и выше, то погрешность измерения $\operatorname{tg} \delta$ будет составлять 0,005; следовательно, получим $\operatorname{tg} \delta = 0,01 \pm 0,005$, а значение Q при этом будет лежать в пределах от 66 до 200, т. е. окажется примерно таким же, как и ранее определенное значение Q .

Вторым существенным недостатком нормирования погрешности измерения Q по $\frac{\Delta Q}{Q^2}$ является его сложность, что может вызвать затруднения при составлении технической документации.

Приведенные выше рассуждения убедительно показывают, что добротность, как одна из характеристик комплексного сопротивления катушек индуктивности, является крайне неудобным измеряемым параметром. Не имея четкого электротехнического смысла (величина, обратная потерям), в то же время она приводит к необходимости исследования противоестественных сочетаний элементов электрических цепей и к сложному нормированию погрешности измерения. Поэтому возникает серьезное сомнение, следует ли при создании аппаратуры для измерения параметров катушек индуктивности всегда ориентироваться на измерение их добротности. В данной статье мы не имеем возможности ответить на поставленный вопрос во всем объеме, поэтому ограничимся его наиболее актуальной в настоящее время частью — рассмотрим, нужно и возможно ли создать удобные и точные дискретно уравниваемые мосты для измерения индуктивности и добротности катушек.

Ставя под сомнение целесообразность повсеместного использования добротности как одной из непосредственно измеряемых характеристик катушек индуктивности, хотелось бы отметить, что оценка катушек индуктивности по их добротности, а не по тангенсу угла потерь носит скорее традиционный, нежели принципиальный характер. Понятие «добротность», возникшее в радиотехнике, является удобным для оценки качества колебательных контуров; примечательно, однако, что даже в этой области наряду с указанным понятием используется также понятие затухания, характеризующего величину, обратную добротности. Очевидно, что применительно к комплексному сопротивлению его «затухание» есть не что иное, как величина $\operatorname{tg} \delta$.

Продолжим теперь рассмотрение поставленного вопроса по существу.

Предположим, что необходимо создать прибор с дискретным уравниванием для измерения Q в пределах от 1 до 1000, что соответствует пределам изменения тангенса угла потерь $\operatorname{tg} \delta = 1 \text{--} 0,001$. Прибор для измерения комплексных сопротивлений катушек индуктивности с потерями, лежащими в таких пределах, нужен, и его создание должно быть реальным. Допустим, что погрешность измерения составляет около 0,05% и что для уравнивания прибора по Q имеются три декады с максимальным отсчетом 999 и минимальным 001. Рассмотрим, каковы будут

метрологические возможности прибора с дискретным уравниванием при измерении Q со значениями, отвечающими краям диапазона измерения.

Если измеряемая добротность равна единице (отсчет 001), тогда, согласно (1), имеем

$$S_Q = I \omega L, \quad (2)$$

т. е. приращение напряжения U на единицу младшей декады равно полному падению напряжения на индуктивном сопротивлении катушки; при такой большой чувствительности погрешность уравнивания моста младшей декадой составляет $\frac{\Delta Q}{Q^2} = \frac{1}{1^2} = 1$, т. е. все 100%, — практически ни о каком уравнивании не приходится говорить. С другой стороны, если добротность близка к 1000 (например, $Q=999$), тогда

$$S_Q \cong \frac{I \omega L}{1\,000\,000}, \quad (3)$$

т. е. приращение напряжения U на единицу младшей декады в 1 000 000 раз меньше, чем при $Q=1$, и составляет 0,0001%; при этом также невозможно говорить ни о каком уравнивании прибора младшей декадой, поскольку указанное значение чувствительности лежит существенно ниже порога чувствительности. Следовательно, в то время как при малых добротностях из-за чрезмерной чувствительности уравнивание прибора младшей декадой оказывается очень грубым, при больших добротностях из-за ничтожно малой чувствительности это уравнивание вообще бесполезно. Мало того, при больших добротностях даже чувствительность по старшей декаде, которая в данном случае участвует в уравнивании прибора, может оказаться ниже порога чувствительности (очевидно, что в рассмотренном примере при $Q=999$ чувствительность по декаде сотен составляет 0,01%, в то время как принятая нами погрешность моста равна 0,05%).

Для обеспечения возможности уравнивания моста при малых значениях добротности можно, естественно, ввести еще декады с десятками и сотыми долями (или даже тысячными), т. е. сделать прибор пятидекадным (или шестидекадным) по добротности с максимальным отсчетом 999,99 (или 999,999), или же вместо введения дополнительных декад использовать принцип плавающей запятой. Поэтому вопрос об измерении малых значений добротности не является определяющим.

Основные затруднения связаны с измерением больших добротностей, когда оказывается, что информационные возможности прибора с дискретным уравниванием используются в ничтожно малой доле: из всех имеющихся в приборе декад уравнивания по добротности едва

tg δ	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005	0,006	...
Q	1000	500	333	250	200	167	...

может быть использована одна старшая. Действительно, как видно из таблицы значений Q , соответствующих дискретным значениям потерь энергии (tg δ) в исследуемом объекте при линейном законе их изменения (0,001, 0,002, ...), возможности многодекадного уравнивания

и отсчета от 1000 до 500, от 500 до 330 и т. д. являются излишними: информация не используется и в сотой доле; здесь достаточно иметь возможность уравнивать мост по добротности (и отсчитывать Q) вначале по 500, затем по 200 и т. д.* При этом вполне очевидно, что чем больше добротность Q , тем меньше реальная возможность использования многодекадного отсчета Q , что противоречит здравому смыслу.

Из изложенного выше следует, что прибор с дискретным уравниванием (в частности, цифровой мост) для измерения индуктивности и добротности комплексных сопротивлений катушек будет обладать крайне неоптимальными характеристиками, использование его элементов будет весьма нерациональным. Автоматическое уравнивание такого прибора осуществить чрезвычайно трудно. В то же время такой прибор в лучшем случае может обеспечить измерительную информацию, лишь приближающуюся к той, которую значительно проще получить измеряя индуктивность и тангенс угла потерь катушек.

Поэтому, по мнению авторов, при построении приборов с дискретным уравниванием (в особенности цифровых мостов переменного тока) для измерения параметров катушек индуктивности целесообразно отказаться от измерения добротности и перейти к измерению тангенса угла потерь, как это принято при измерении комплексных сопротивлений емкостного характера.

Переход на измерение тангенса угла потерь катушек индуктивности и принятие его в качестве основной непосредственно измеряемой характеристики потерь в комплексных сопротивлениях емкостного и индуктивного характера были бы экономически выгодными, позволяя создавать измерительные приборы как для измерения емкостных, так и индуктивных сопротивлений с унифицированными узлами и облегчая создание универсальных приборов. Кроме того, переход на одну характеристику облегчил бы сравнение результатов измерений параметров элементов различного характера. Указанный переход тем более целесообразен, что он отнюдь не требует отказываться от понятия «добротность» и возможности использования последней в тех выражениях и расчетах, где это удобно.

ВЫВОДЫ

Добротность как одна из характеристик комплексного сопротивления катушек индуктивности ни для последовательной, ни для параллельной схемы замещения последних не является приемлемым и физически обоснованным измеряемым параметром. Оценка катушек индуктивности по их добротности объясняется скорее всего определенной исторической традицией, а не принципиальными соображениями.

* Заметим, что необходимое для уравнивания прибора точное приращение добротности ΔQ , отвечающее некоторому приращению $\Delta \operatorname{tg} \delta$ потерь энергии в исследуемом объекте при начальном значении добротности Q , равном Q_0 , может быть найдено по формуле

$$\Delta Q = \frac{-Q_0^2 \Delta \operatorname{tg} \delta}{1 + Q_0 \Delta \operatorname{tg} \delta},$$

которую нетрудно получить из условия одинакового изменения напряжения \dot{U} как при изменении Q на некоторую произвольную величину ΔQ , так и при изменении $\operatorname{tg} \delta$ на величину $\Delta \operatorname{tg} \delta$ (при $Q_0 \Delta \operatorname{tg} \delta \ll 1$ эта формула превращается в известное соотношение между погрешностями по Q и по $\operatorname{tg} \delta$ [1]).

Требуемое нормирование погрешности по добротности оказывается сложным и может вызвать затруднения при составлении технической документации, поскольку, как было ранее показано авторами, при оценке точности измерения индуктивности по относительной погрешности ее измерения необходимо точность измерения добротности оценивать соответственно по отношению абсолютной погрешности измерения добротности к квадрату ее значения.

Мосты с дискретным уравниванием для измерения индуктивности и добротности комплексных сопротивлений катушек, обладая крайне неоптимальными метрологическими характеристиками, отличаясь весьма нерациональным использованием их элементов и являясь чрезвычайно трудно автоматизируемыми, в лучшем случае могут обеспечить измерительную информацию, лишь приближающуюся к той, которую можно значительно проще получить измеряя индуктивность и тангенс угла потерь катушек.

При построении мостов с дискретным уравниванием для измерения параметров катушек индуктивности целесообразно отказаться от измерения добротности и перейти к измерению тангенса угла потерь, что обеспечит возможность создания измерителей емкости и индуктивности с унифицированными узлами, облегчит создание универсальных приборов и упростит сравнение результатов измерений параметров элементов различного характера.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ф. Б. Гриневич, К. Б. Карандеев. Об определении погрешности измерения комплексных сопротивлений.— Труды Ин-тов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов, вып. 57 (117). Под ред. К. П. Широкова. М.—Л., Стандартгиз, 1962.
2. Мосты переменного тока измерительные. ГОСТ 9486—60*. Государственные стандарты СССР. Электроизмерительные приборы. М., Изд-во стандартов, 1966.

*Поступила в редакцию
19 декабря 1966 г.,
окончательный вариант —
20 апреля 1967 г.*