

Измерение частотной зависимости шунта Fluke A40B

Ю. П. Семенов¹, Е. В. Кривицкая², А. О. Фокина³

ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»

¹Y.P.Semenov@vniim.ru, ²E.V.Krivitskaya@vniim.ru, ³a.fokina22@yandex.ru

Аннотация. In order to characterize the AC shunt, it is necessary to set 4 parameters: DC resistance, frequency dependence, load dependence, and temperature dependence. To measure the frequency dependence of the shunt, traditional methods are based on the use of thermal converters. Using the Fluke A40V-1 mA shunt as an example, the possibility of measuring the frequency dependence by comparing with measures of AC resistance is shown.

Ключевые слова: shunt; frequency dependence; electrical resistance; thermal converters; uncertainty

I. ВВЕДЕНИЕ

Идеальный резистивный шунт – пассивный линейный преобразователь тока в напряжение в соответствии с законом Ома и не имеющий ни индуктивности, ни емкости.

Резистивные шунты применяются для преобразования тока в напряжение прежде, чем выполняются измерение тока или мощности в какой-либо системе.

Независимо от рода тока (постоянный, переменный или импульсный) основной характеристикой шунта является коэффициент преобразования – отношение разности потенциалов U , появляющейся на выходном разъёме при прохождении тока I через входной разъём. На постоянном токе коэффициент преобразования (КП) является скалярной величиной, равной сопротивлению шунта R , на переменном токе КП – комплексная величина, учитывающая не только потери энергии на нагрев шунта, но и затраты энергии на создание электромагнитного поля, обусловленные его остаточными параметрами – индуктивностью или емкостью.

Простейшая векторная диаграмма шунта переменного тока [1] представлена на рис. 1, где $\dot{Z} = \dot{U}/\dot{I} = |Z|e^{j\psi}$; $|Z|$ – модуль коэффициента преобразования шунта, ψ – угол фазового сдвига между векторами напряжения и тока. Эта диаграмма соответствует эквивалентной электрической схеме, в которой остаточные параметры, представленные в виде эквивалентной индуктивности $L_{\text{экв}} = (\text{Im } \dot{Z})/\omega$, где $\omega = 2\pi f$, f – частота переменного тока, последовательно соединены с активным сопротивлением шунта $R_a = \text{Re } \dot{Z}$. Точность шунта переменного тока характеризуется двумя параметрами – модульной и фазовой погрешностями. Модульная погрешность – это разность между модулем полного сопротивления шунта Z и сопротивлением шунта R на постоянном токе, а фазовая погрешность – это угол

ψ , причём фазовая погрешность считается положительной, если вектор напряжения $\dot{U}$ опережает вектор тока $\dot{I}$ [2]. В зависимости от применения погрешность фазового угла может быть критически важной или второстепенной величиной, но в любом случае погрешность должна быть малой, а ее величина оценена для составления бюджета неопределенности. При очень малом значении фазового угла выходное напряжение шунта точно воспроизводит форму кривой тока даже при больших искажениях или пульсациях тока. Это обеспечивает точные измерения высокочастотной мощности, исследовании (контроле) токов сложной или искаженной формы волны.

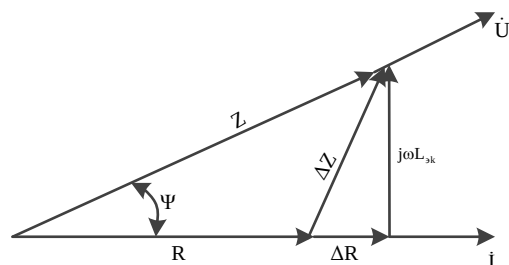


Рис. 1. Векторная диаграмма шунта переменного тока

Коаксиальные шунты Fluke 40B являются одними из наиболее точных и широко применяемых в национальных метрологических институтах мира диапазоне частот от постоянного тока до 100 кГц. В основе их конструкции лежит принцип «беличьей клетка», который впервые был разработан в лаборатории эталонов мощности ВНИИМ, а впоследствии стал общепринятым стандартом. В соответствии с этим принципом используется большое число резисторов, соединенных параллельно посредством тонких металлических дисков, соединенных с разъёмами тока и напряжения таким образом, чтобы их индуктивность и взаимная индуктивность имели минимальные значения. Резисторы, используемые в конструкции шунта, имеют очень малые значения индуктивности и емкости, и все остаточные параметры определяются конструкцией шунта.

Набор шунтов Fluke A40B позволяет измерять силу тока от 1 мА до 100 А, при этом в режиме номинальной нагрузки на выходном разъёме поддерживается напряжение 0,8 В (это номинальное значение напряжения позволяет применять цифровые вольтметры с

использованием наиболее точных диапазонов). Соответствующие номинальные значения сопротивления шунтов лежат в диапазоне от 800 Ом до 0,008 Ом.

Две проблемы существуют при применении коаксиальных шунтов в широком диапазоне номинальных значений: нагрузка входным импедансом вольтметра (и на постоянном, и на переменном токе) при измерении токов менее 10 мА и нагрев шунта измеряемым током при измерении токов более 10 А. Обе погрешности являются доминирующими, а их значения быстро увеличиваются с частотой.

II. ТРАДИЦИОННЫЙ МЕТОД КАЛИБРОВКИ ШУНТОВ

При применении шунтов типа «беличьей клетки» измеряемый переменный ток определяется соотношением $I_f = (U/R_{cal}) \cdot [1 + (AC_f - DC)_{cal}]$, где значения сопротивления на постоянном токе R_{cal} и относительной разности напряжений $(AC_f - DC)_{cal}$, измеренной в процессе калибровки шунта при переменном токе частотой f и при постоянном токе. При этом предполагается, что калибровка выполнена при номинальной нагрузке шунта ($I_{ном}$) и при заданных внешних условиях – температуре и относительной влажности, в противном случае вносятся соответствующие поправки. Значение $(AC_f - DC)_{cal}$ определяется как разность между синусоидальным переменным током, необходимым для получения заданной разности потенциалов на выходе, и средним значением постоянного тока при двух полярностях, необходимым для получения того же значения разности потенциалов, причём положительная разность означает, что больший переменный ток требуется для получения той же разности потенциалов.

Для калибровка шунта применяется электрическая цепь, состоящая из источника регулируемого постоянного/переменного тока, эталонного термопреобразователя (ТП), калибруемого шунта и средств измерения разности потенциалов на выходных зажимах ТП и шунта. Фактически ТП и измеритель разности потенциалов на его выходе служат только для калибровки источника тока (его регулирования и установления равенства тепловых эффектов, оказываемых постоянным током и соответствующим действующим значением переменного тока), а точность определения разности потенциалов на зажимах шунта определяется метрологическими характеристиками измеряющего эту величину вольтметра и точностью его калибровки.

Преимуществом такого метода измерений (и калибровки) является (1) определение значения $(AC_f - DC)_{cal}$ при номинальной нагрузке, (2) высокая точность ТП и практическая независимость от частоты, (3) очень хорошая изоляция между входом и выходом ТП, что обуславливает пренебрежимо малые погрешности из-за общего (common mode) тока измерительной системы, который может служить источником значительной неопределенности при питании аппаратуры от сети промышленной частоты.

Наряду с этим существует ряд недостатков метода, среди них: (1) медленное установление термической

стабильности; (2) квадратичная зависимость выходного сигнала, что обуславливает плохую линейность амплитуды; (3) влияние небольших местных изменений параметров окружающей среды (источники тепла, сквозняки); (4) зависимость от полярности постоянного тока. Кроме того, следует отметить отсутствие серийного производства высококачественных ТП, что делает их недоступными для большинства потребителей. Существенным недостатком этого метода калибровки шунта переменного тока является невозможность установить его фазовую погрешность и действительное значение его сопротивления на постоянном токе R_{cal} .

III. ИЗМЕРЕНИЕ ИМПЕДАНСА ШУНТА

Большинства указанных недостатков лишен метод определения параметров шунта переменного тока, основанный на измерении его импеданса [3]. Импеданс шунта представлен простейшей последовательной RL или параллельной RC эквивалентной схемой и рассчитывается из значений S-параметров, измеренных посредством векторного анализатора цепей (VNA). Для того, чтобы обеспечить прослеживаемость показаний VNA к единице электрического сопротивления производится его предварительная калибровка с использованием нагрузки 50 Ом на его разъемах. Параметры нагрузки рассчитываются на основе теории длинных линий и измерении геометрических размеров. Анализатор KeySight (Agilent) 5071C является широкополосным прибором, диапазон частот которого простирается от 9 кГц до 4,5 ГГц, а наибольшая точность измерения достигается при измерении импеданса того же порядка величины, что и сопротивление нагрузки. Его базовая погрешность, достигаемая при оптимальном соотношении условий, составляет 0,09 %. Процесс измерений включает также измерение действительного значения сопротивления на постоянном токе с использованием цифрового мультиметра. Измеренное сопротивление R_{cal} имеет значительно более высокую точность, чем результаты измерений импеданса анализатором, и поэтому используются для соответствующего смещения последних. Непосредственное сопоставление результатов на постоянном и переменном токе выполнить невозможно, поскольку они относятся к различным величинам, а также вследствие высокого уровня шума при измерениях анализатором при частотах менее 10 МГц. Причиной этого шума является несогласованность значений выходного импеданса анализатора и шунта. Для приведения результатов измерений посредством анализатора при частотах в диапазоне до 60 МГц к значению сопротивления на постоянном токе проводится регрессионный анализ результатов согласно принятой эквивалентной схеме (LR или RC). Описанный метод применен для измерения шунта 10 А (сопротивление 0,08 Ом). Приведённые в [3] результаты – относительная погрешность шунта $(AC_f - DC)_{cal}$ и фазовая погрешность ψ – совпадают в пределах оценки неопределенности с результатами измерений с использованием термопреобразователя.

Точность метода невелика, а процедура довольно трудоемкая, но результаты характеризуют обе составляющие погрешности и могут быть использованы в метрологической практике при выполнении калибровок среднего уровня точности.

IV. НОВЫЙ МЕТОД КАЛИБРОВКИ ШУНТОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА. АНАЛИЗ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ СХЕМЫ ШУНТА

Во ВНИИМ разработан и исследован метод калибровки шунтов на основе измерения импеданса посредством цифровых RLC-метров и анализаторов импеданса. В качестве примера практического применения рассмотрим калибровку шунта Fluke A40B с номинальным значением тока 1 мА (сопротивление 800 Ом). Доминирующим источником погрешности шунта на переменном токе является шунтирование его выходного импеданса (800 Ом) входным импедансом вольтметра (порядка (1,5–10) МОм параллельно с емкостью (70–130) пФ). Для снижения этой составляющей погрешности на выходе шунта включён встроенный в него электронный усилитель с автономным источником питания, посредством которого выходное сопротивление шунта снижается до 0,02 Ом.

Анализ частотной зависимости передаточной функции шунта с учетом влияния параметров соединительных кабелей и нагрузки на выходном (потенциальном) разъёме выполнен с использованием эквивалентной схемы шунта [4, 5], приведённой на рис. 2.

$$Z = R \cdot [1 - (R + R_{\Pi})] + i\omega L_3,$$

где

$$L_3 = L - R^2 (C_{\text{вх}} + C_{\text{вых}}) - (R/R_0)(L + L_{\Pi}) - RR_{\Pi}C_{\text{вых}};$$

$$C_{\text{вх}} = C_{\Pi} + C_{\Pi}/2,$$

$$C_{\text{вых}} = C_0 + C_{\Pi}/2.$$

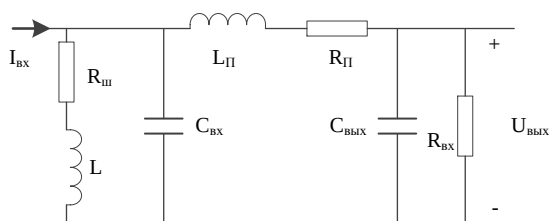


Рис. 2. Эквивалентная схема шунта

Параметры с индексом «п» относятся к соединительному кабелю входного (токового) разъёма шунта, а с индексом «0» – к входному импедансу прибора для измерения напряжения на выходном разъёме шунта. Если входное сопротивление прибора во много раз (10^6 и более) превышает сопротивление шунта и соединительного кабеля, а также если сопротивление кабеля существенно меньше сопротивления шунта или $C_{\text{вых}} \ll C_{\text{вх}}$, то влиянием ряда параметров (L_{Π} , R_{Π} , C_{Π} , C_0) можно пренебречь без заметного снижения точности. Указанные выше условия выполняются в случае шунта Fluke A40B-1мА, поэтому в дальнейшем применяется упрощенная эквивалентная схема, содержащая только два последовательно соединённых элемента – сопротивление

шунта и его эквивалентна индуктивность $L_3 = L - R^2 \cdot C_{\text{вх}}$, приведённая на рис. 3.

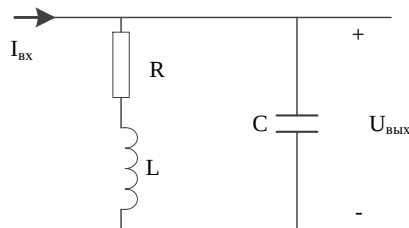


Рис. 3. Упрощенная эквивалентная схема шунта

Для шунтов типа «беличья клетка» емкость может достигать значений до двух нанофард и должна учитываться при измерении шунтов при высоких частотах. Измерения показали, что емкость шунта 1 мА не превышает 14,6 пФ и ее влиянием можно пренебречь при измерениях в диапазоне частот до 1 МГц.

V. ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ НАСТРОЙКА ИЗМЕРИТЕЛЯ ИМПЕДАНСА

Измерение импеданса осуществлялось посредством прецизионного RLC-метра Keysight (Agilent) E4980A с использованием стандартного измерительного кабеля длиной 1 метр. Кабель позволяет проводить измерения объектов с четырех-парной (4TP) схемой включения. Базовая погрешность измерителя составляет 0,05 %, но его предварительные исследования показали, что при выполнении предварительной настройки SOL (Short, Open, Load) с использованием высококачественных эталонов в некоторых диапазонах измерений и при выборе оптимального режима погрешность измерений может быть снижена в 10–12 раз. Настройка SOL выполнена с применением эталонов Short и Open из состава набора H2-2 и резистора 1 кОм с расчетной частотной характеристикой (РРЧХ). Резистивный элемент этого резистора выполнен в виде двойного бифиляра из провода Kanthal LX диаметром 28 мкм. Резистивный провод закреплён на поверхности основания из кварцевого стекла, что обеспечивает стабильность его положения в пространстве и защищает от механических напряжений. Действительное значение сопротивления этого резистора остается неизменным в пределах 0,001 % в диапазоне частот от нуля до 100 кГц и может быть рассчитано с такой точностью в диапазоне частот до 2 МГц. Настройка выполнена при всех частотах предстоящих измерений шунта и внесена в память прибора. При их применении следует учесть различие номинальных значений измеряемого сопротивления шунта и эталона Load, исходя из того, что погрешность измерителя характеризуется мультипликативной составляющей.

VI. СОЕДИНИТЕЛЬНЫЙ АДАПТЕР

Шунт Fluke A40B-1мА снабжён двумя коаксиальными разъёмами типа N, в то время как наивысшей возможной точности измерения посредством RLC-метра может быть достигнута только при использовании 4TP включения измеряемого объекта. Для устранения этого

несоответствия разработано переходное устройство (адаптер). Применение любого адаптера, размещённого в пространстве между плоскостями определения измерителя и измеряемого объекта, нарушает процесс введения поправок по результатам предварительной настройки. Конструкция адаптера имеет минимальные физические размеры и позволяет объединить внешние проводники коаксиальных разъемов кабелей измерителя в непосредственной близости от разъемов шунта. Центральный проводник потенциального разъёма (U) шунта электрически отделён от измерительной цепи измерителя встроенным усилителем, поэтому разъемы «Low Current» и «Low Potential» измерителя объединены коаксиальным тройником.

VII. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения импеданса шунта выполнены при тех же значениях частоты, при которых была проведена настройка в диапазоне от 20 Гц до 400 кГц. В каждой точке устанавливалось и поддерживалось (по показаниям на дисплее измерителя) номинальное значение измерительного тока ($1 \pm 0,002$) мА и выполнялись измерения в режиме «Meas Time-Long» и «AVG-32», вводилась поправка к отсчетам в размере 0,8 от величины поправки, установленной при выполнении настройки с использованием РРЧХ 1 кОм. Действительное значение сопротивления шунта на постоянном токе 800,047 Ом. Результаты измерений на переменном токе приведены в таблице. В последнем столбце для сопоставления приведены значения разности $(AC_f - DC)_{cal}$ в соответствии со спецификацией шунта Fluke A40B-1mA (ppm)/(пересчёт в Ом).

ТАБЛИЦА I

Частота, кГц	Сопротивление (R_0), Ом	Электрическая ёмкость (C_p), пФ	$\pm(AC_f - DC)_{cal}$, ppm/Ом
0,02	800,059	-	
0,05	800,074	-	
0,12	800,056	-	
1,00	800,056	2,6	53/0,042
5,00	800,052	14,7	
10,0	800,046	14,9	72/0,057
20,0	800,042	14,8	
30,0	800,059	14,9	72/0,057
40,0	800,061	14,9	
50,0	800,039	14,9	
100,0	800,092	15,1	150/0,120
200,0	800,268	15,2	
400,0	800,962	15,3	

Приведённые результаты показывают, что частотная зависимость в диапазоне частот от нуля до 50 кГц не заметна на фоне случайных флуктуаций, среднее значение сопротивления составляет 800,0596 Ом, то есть смещено на 0,013 Ом (или 16 ppm) относительно значения на постоянном токе R_{cal} . При частотах от 50 до 400 кГц зависимость близка к квадратичной, что соответствует теоретической оценке. Экспериментальные результаты находятся в пределах, установленных спецификацией.

VIII. ВЫВОДЫ

Предложенный метод показал неплохие результаты при измерении наиболее сложного из шунтов серии Fluke A40B. Метод реализуется значительно проще, чем известный метод на основе VNA. Подтверждена возможность измерения всех параметров (за исключением нагрузочного коэффициента), необходимых для измерения всех параметров, необходимых для применения шунта в качестве преобразователя тока в широком диапазоне частот (до 1 МГц) посредством прямых измерений импеданса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Векслер М.С., Теплинский А.М. Шунты переменного тока. Энергоиздат, Ленинград, 1987, 120 с.
- [2] P.S. Filipi, M. Boecker, AC-DC current shunts and system for extended current and frequency ranges, IEEE Trans.Instrum. Meas., vol.55, no. 4, pp.1222-1227, Aug. 2006.
- [3] M.Quameur, F. Ziade and Y. Le Bihan, Novel Broadband Calibration Method of Current Shunts Based on VNA, IEEE Trans.Instrum. Meas., , vol.68 no. 3, pp.54-863, March 2019.
- [4] S. Svenison, K.-E. Rydler and V. Tarasso. Improved model and phase-angle verification of current shunts for AC and power measurements. 2004 CPEM Digest, London, UK, 27 June – 2 July, pp. 82
- [5] B. Pinter, M. Lindič, B. Voljč, Z. Svetik, R. Lapuh. Modeling of AC/DC current shunts, CPEM2010, стр.599–600.