

Расширение амплитудно-частотных характеристик коаксиальных шунтов

Е. В. БЕДАРЕВА*, Э. И. ЦИМБАЛИСТ*, П. Ф. БАРАНОВ*, А. А. ЛЕВИЦКИЙ**

* Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия,
e-mail: bedareva@tpu.ru,

** Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

Рассмотрены способы расширения динамических характеристик коаксиальных шунтов переменного тока. Использован мультипликативный метод повышения точности с применением амплитудных корректоров. Предложены варианты реализации коррекции, проведен их анализ. Применение компенсирующих цепей первого порядка подтвердило возможность расширения полосы рабочих частот коаксиальных шунтов.

Ключевые слова: коаксиальные шунты, динамические характеристики, коэффициент преобразования, амплитудный корректор.

The methods of improvement of AC coaxial shunts dynamic characteristics have been considered. A multiplicative method of accuracy increase with amplitude correctors application was used. The version of correction realization have been suggested and their analysis was carried out. The application of the first equalizing circuits confirmed the possibility of coaxial shunts working frequency band expansion.

Key words: coaxial shunts, dynamic characteristics, conversion factor, amplitude corrector.

При испытаниях электромеханического и силового оборудования в современных лабораториях необходимо измерять частотные и временные параметры действующей на них силы тока [1, 2]. С этой целью используют различные измерительные преобразователи тока в напряжение. Среди них из-за малой стоимости, температурной погрешности и сравнительной простоты изготовления широкое применение нашли шунты переменного тока коаксиальной конструкции [3–5]. Одной из важных характеристик шунта, определяющей его динамические свойства, является амплитудно-частотная характеристика (АЧХ), которая зависит от толщины стенки резистивной трубки и способа подключения потенциальных выводов [5]. В ряде случаев полоса пропускания АЧХ может не удовлетворять требованиям при испытаниях силового оборудования [2].

Цель данной статьи — рассмотрение способов увеличения полосы пропускания АЧХ коаксиальных шунтов при заданном уровне затухания посредством использования схем амплитудных корректоров.

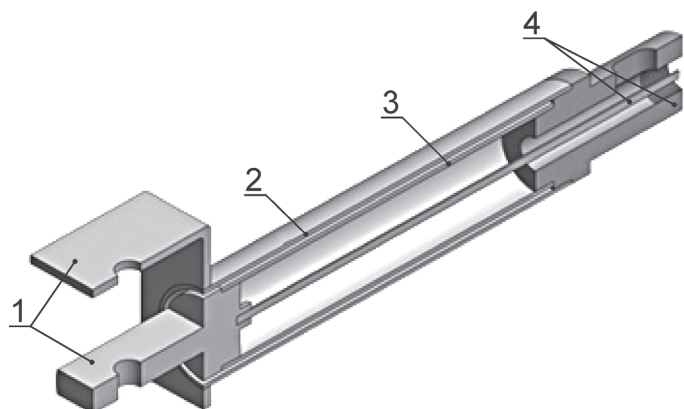


Рис. 1. Конструкция коаксиального шунта:

1 — токовые выводы; 2 — медная трубка; 3 — резистивная трубка; 4 — потенциальные выводы

Объект исследований — коаксиальный шунт со следующими параметрами: толщина резистивной трубки — 1 мм; длина — 90 мм; внутренний радиус — 10 мм; сопротивление при постоянной силе тока — 750 мкОм (рис. 1).

Коаксиальный шунт представляет измерительный преобразователь тока, содержащий токовые и потенциальные выводы. Конструктивно шунт состоит из двух вложенных друг в друга цилиндров, по которым ток протекает в противоположных направлениях. Внутренний цилиндр изготавливают из резистивного материала с большим удельным сопротивлением, например, манганина, а внешний — с меньшим, например, из меди.

Для обеспечения максимально возможной полосы пропускания АЧХ потенциальные выводы шунта подключены к внутренней поверхности его резистивной трубки [5].

Теория электромагнитных процессов в данном шунте позволяет получить выражение для коэффициента преобразования входного тока в выходное напряжение (комплексного сопротивления шунта) [3]:

$$\dot{K}_{\text{ш}} = \dot{Z}_{\text{ш}} = \dot{U} / \dot{I} = R(1+j)m\Delta / \text{sh}[(1+j)m\Delta], \quad (1)$$

где $\dot{Z}_{\text{ш}}$ — комплексный коэффициент преобразования; R — сопротивление шунта на постоянном токе; $m = \sqrt{\omega\mu / (2\rho)}$ — величина, обратная эквивалентной глубине проникновения волны; ω — круговая частота; μ — магнитная постоянная; ρ — удельное сопротивление материала резистивной трубки; Δ — толщина резистивной трубки; j — мнимая единица; $\text{sh}[(1+j)m\Delta]$ — гиперболический синус комплексного аргумента $[(1+j)m\Delta]$.

Для рассчитанной с использованием (1) АЧХ верхняя частота полосы пропускания при 1 % затухании составляет около 80 кГц (частота среза шунта составляет 560 кГц).

В указанной полосе частот АЧХ хорошо аппроксимируется звеном первого порядка: $\dot{K}_{\text{ш}} = \dot{Z}_{\text{ш}} = \dot{U} / \dot{I} = R / (1+j\omega\tau_{\text{ш}})$ при постоянной времени шунта $\tau_{\text{ш}} \approx 0,3$ мкс.

Экспериментальное подтверждение теоретической зависимости АЧХ шунта и его линейности было осуществлено на установке, в которой в качестве источника, нормированного по значению силы тока, использован многофункциональный калибратор Fluke 5520A, а средством измерений служил синхронный усилитель с дифференциальным входом [6], работающий в режиме селективного вольтметра с разрешением 100 нВ.

Возможности калибратора позволяют измерять АЧХ шунта при силе тока 0,1 А в диапазоне частот 0—30 кГц, а линейность шунта — на частоте 1 кГц в диапазоне токов 0,1 — 2 А.

Измеренное значение модуля сопротивления шунта на частоте 1 кГц составило 744,6 мОм, изменение его АЧХ соответствовало поведению звена первого порядка, и в указанных пределах вариаций тока калибратора шунт являлся линейным элементом.

Таким образом, теория и эксперимент показывают, что расширение динамических характеристик шунта в виде увеличения полосы пропускания на заданном уровне ослабления АЧХ можно проводить неадаптивными методами с помощью схем линейных корректоров.

Способы улучшения динамических характеристик коаксиальных шунтов. В [5] использован конструктивный метод расширения АЧХ коаксиального шунта при применении оптимального подключения его выводов к внутренней поверхности резистивной трубки. Дальнейшее расширение характеристик осуществляется включением дополнительных пассивных или активных схем, реализующих структурные методы повышения точности. Они основываются на двух основных методах: уравнивающего преобразования и коррекции погрешностей [7].

Метод уравнивающего преобразования основан на масштабном преобразовании значения меры, т. е. на применении многозначных мер, заложенных в приборе, либо на масштабном преобразовании измеряемой величины, а именно на применении многозначной меры отношения. Для реализации данного метода необходима мера сравнения или эталонного калибратора тока, применение которого при решении поставленной задачи нецелесообразно.

Метод коррекции погрешности заключается в создании регулирующего влияния, управляемого возмущающим фактором и направленного на компенсацию погрешности, создаваемой этим же фактором в измерительном устройстве или создании воздействия, управляемого погрешностью измерительного устройства и направленного на ее уменьшение.

По способу корректирующего воздействия методы коррекции погрешности подразделяют на аддитивные, мультипликативные и аддитивно-мультипликативные.

Для расширения частотных характеристик коаксиальных шунтов целесообразно использовать мультипликативный метод повышения точности, основанный на применении амплитудных корректоров (АК) [7]. Одним из условий использования АК является обеспечение большей стабильности его характеристик по сравнению с аналогичными данными корректируемого устройства — шунта. Поэтому при анализе схем корректоров — амплитудных, фазовых сигналов (формы) обязательным является анализ их чувствительности к дестабилизирующим факторам.

Реализация и анализ схем амплитудной коррекции. Амплитудный корректор — это четырехполюсник, который при использовании мультипликативного метода включается кас-

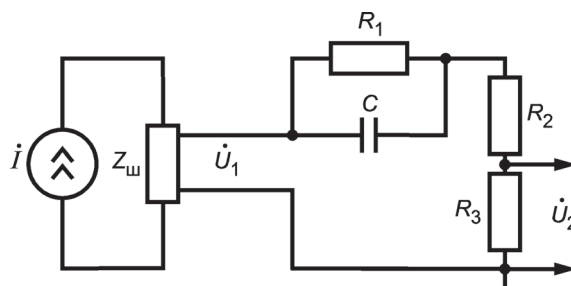


Рис. 2. Схема четырехзажимного подключения шунта и пассивной части АК

кадно с корректируемым устройством. Его задача заключается в дополнении с заданной погрешностью АЧХ коэффициента преобразования до постоянной величины в полосе рабочих частот.

В качестве примера проведем анализ пассивной части АК, предложенного в [2] (рис. 2).

Комплексный коэффициент преобразования такой схемы равен

$$\dot{K}_{\text{пр}} = \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}} = \dot{K}_{\text{ак}} \frac{R}{(1 + j\omega\tau_{\text{ш}})} = K(0) \frac{(1 + j\omega\tau_1)}{(1 + j\omega\tau)} \frac{R}{(1 + j\omega\tau_{\text{ш}})}, \quad (2)$$

где $K(0) = R_3/(R_1 + R_2 + R_3)$ — коэффициент преобразования АК при постоянном токе; $\tau_1 = R_1C$; $\tau = CR_1(R_2 + R_3)/(R_1 + R_2 + R_3)$;

$\dot{K}_{\text{ак}}$ — комплексный коэффициент преобразования АК; $\tau_{\text{ш}}$ — постоянная времени шунта; τ , τ_1 — постоянные времени АК; R_1 , R_2 , R_3 , C — сопротивления и емкость, входящие в цепь АК.

Из (2) следует одна из возможных стратегий коррекции — при $\tau_1 = \tau_{\text{ш}}$ компенсируется ноль и один из полюсов функции преобразования. Тогда увеличение в полосе пропускания АЧХ нарастает по мере уменьшения τ корректирующей цепи относительно постоянной времени шунта.

Предельный вариант расширения $A = \tau_{\text{ш}}/\tau$ в полосе пропускания АЧХ скорректированного шунта возникает, когда $\tau \ll \tau_1 = \tau_{\text{ш}}$. Однако это условие автоматически приводит к уменьшению передачи пассивной части АК на постоянном токе, т. е. $K(0) \ll 1$. Из этого следует, что чувствительность шунта к измеряемому току снижается из-за его малого сопротивления, а для восстановления чувствительности требуется схема на операционном усилителе, которая повлияет на результирующую АЧХ и снизит ее.

Условие $K(0) \ll 1$ приводит к дополнительным проблемам при выборе резисторов АК, обеспечивающих требуемую стабильность $K(0)$ и коэффициента преобразования в целом.

Действительно, используя (2), найдем полный дифференциал коэффициента $K(0)$, а затем и его максимальную относительную нестабильность, полученную с использованием линейных членов разложения в ряд Тейлора без учета знака отклонения сопротивлений от их номинального значения:

$$\delta_K = dK(0)/K(0) \approx [1 - K(0)] \delta_R, \quad (3)$$

где $\delta_R \approx \delta_{R1} + \delta_{R3}$ — относительная погрешность сопротивлений АК.

При $K(0) \ll 1$ и одинаковых относительных погрешностях сопротивлений δ_R этот параметр должен быть почти в два

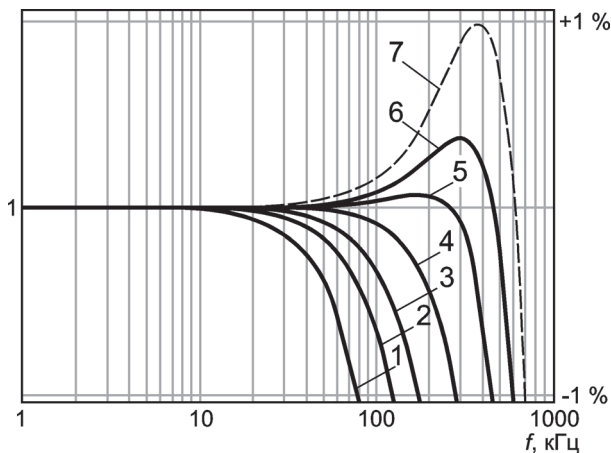


Рис. 3. Нормированные АЧХ коэффициентов преобразования (1 — шунта; 2—7 — шунта и АК):

2 — $A = 1,5$; $K(0) = 0,6$; 3 — $A = 2$; $K(0) = 0,4$; 4 — $A = 3$; $K(0) = 0,3$; 5 — $A = 5$; $K(0) = 0,15$; 6 — $A = 10$; $K(0) = 0,09$; 7 — $A = 10$; $K(0) = 0,09$; $\tau_{\text{ш}}/\tau_1 \neq 1$

раза меньше требуемой относительной нестабильности δ_K , что ужесточит требования при их выборе.

Следовательно, использование в предложенной схеме АК с максимально возможным расширением полосы пропускания шунта $A = \tau_{\text{ш}}/\tau$ может быть нецелесообразным.

Рассмотрим поведение схемы АК для относительно небольших значений коэффициента A . На основании (2) получим систему уравнений:

$$\begin{cases} R_1 = (A-1)(R_2 + R_3); \\ K(0) = R_3 / A(R_2 + R_3) = K(\infty) / A; \\ K(\infty) = R_3 / (R_2 + R_3) < 1. \end{cases} \quad (4)$$

Задав значения коэффициента A при фиксированных значениях сопротивления $R_1 = 100$ Ом и емкости $C = 3$ нФ, определим все параметры элементов схемы АК, используя систему уравнений (4). Такой подход позволяет получить нормированные АЧХ скорректированного шунта при различных значениях коэффициента A , и определить границы полосы пропускания на уровне $\pm 1\%$ затухания коэффициента преобразования (рис. 3).

Рассмотренная выше стратегия выбора элементов АК предполагала, что АЧХ скорректированного шунта будет монотонно уменьшаться с повышением частоты. Из рис. 3 следует, что в этом случае (при $A = 1,5, \dots, 3$, кривые 2—4) АЧХ не имеет выброса, и схема пассивного корректора позволяет расширить полосу рабочих частот на уровне затухания 1% с 80 кГц до 300 кГц.

Если допустить перепоправку нормированной характеристики в пределах $\pm 1\%$ -ной зоны, то она при относительно больших коэффициентах A будет происходить из-за того, что шунт в расширенной полосе частот перестанет быть звеном первого порядка (кривые 5, 6). Перепоправку АЧХ в указанной 1% -ной зоне также вызывает незначительные изменения соотношения между постоянными времени τ_1 , $\tau_{\text{ш}}$ (кривая 7). При такой немонотонности АЧХ скорректированного шунта ее верхняя частота в зоне $\pm 1\%$ достигнет 600 кГц, а его частота среза по уровню 3 дБ почти 2 МГц.

Таким образом, нескорректированный шунт на частоте среза 560 кГц имел 30%-ное затухание нормированного коэффициента преобразования, а скорректированный — резко расширил свои динамические свойства, обеспечивая на той же частоте завал АЧХ менее 1% (кривые 6, 7) и выигрыш более чем в тридцать раз относительно нескорректированного шунта.

Однако говорить о расширении в динамических свойствах скорректированных измерительных преобразователей можно только после расчета чувствительности схем корректоров к дестабилизирующим факторам, так как проблема точности является центральной в теории чувствительности, и с ней связана достоверность математического анализа и эксперимента.

Следовательно, нужно оценить изменения корректирующих свойств АК (как наиболее стабильного элемента схемы измерительного преобразователя) из-за отклонения параметров его элементов от номинальных значений, считая свойства шунта неизменными.

Так как в устройствах с коррекцией остаточная погрешность является величиной второго и более высоких порядков малости, то необходимо определить погрешность, являющуюся полным приращением функции преобразования измерительного устройства, в том числе, и от больших приращений ее аргументов [8]. С этой целью найдем расстояние между АЧХ с номинальными параметрами элементов АК и измененными под влиянием дестабилизирующих факторов параметрами элементов корректора. За меру сходства этих двух функций примем неотрицательное число, названное расстоянием. В теории приближения функций используют линейную или среднеквадратическую меру.

Для измерительных преобразователей, работа которых прогнозируется с заданной погрешностью в оговоренной полосе частот, надо ориентироваться на линейную меру расстояния, так как при квадратичной мере приближения необходимо гарантировать малую дисперсию отклонений функций в частотных точках.

Во многих случаях разбросом детерминированных отклонений параметров элементов АК можно пренебречь и считать, что эти отклонения равны для элементов одного вида.

При использовании в АК конденсаторов типа NP0 (C0G), емкость которых в рабочем диапазоне практически не зависит от температуры, времени, напряжения и частоты, нестабильность постоянных времени цепи будет определяться только нестабильностью сопротивлений $\delta_R = \Delta R/R$.

Исходя из принятых допущений, получим выражения для относительных погрешностей передачи АК на постоянном токе $\delta K(0)$, постоянных времени $\delta \tau$ и $\delta \tau_1$. Используем для этого формулы относительного приращения элементарных функций.

Относительная погрешность $\delta \tau$ определяется как

$$\left. \begin{aligned} \delta \tau = \Delta \tau / \tau &= (\delta_x - \delta_y) / (1 + \delta_y) = (2\delta_R - \delta_R) / (1 + \delta_R) \approx \delta_R; \\ \delta_x &= (\delta_{R_1} + \delta_{x_1} + \delta_{R_1}) \delta_{x_1} \approx 2\delta_R; \\ \delta_{x_1} &= (R_2 \delta_{R_2} + R_3 \delta_{R_3}) / x_1 \approx \delta_R; \\ \delta_y &= (R_1 \delta_{R_1} + R_2 \delta_{R_2} + R_3 \delta_{R_3}) / y = \delta_R. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Аналогично найдем

$$\delta\tau_1 = \delta_R;$$

$$\delta K(0) = 2\delta_R (R_1 + R_2) / [(1 + \delta_R)R_1 + (1 + \delta_R)R_2 + (1 + \delta_R)R_3].$$

Проанализируем граничный случай влияния нестабильности сопротивлений на АЧХ скомпенсированного шунта при фиксированных значениях выигрыша АК: $R_1 = 100 \text{ Ом}$, $R_2 = 1,1 \text{ Ом}$, $R_3 = 10 \text{ Ом}$, $C = 3 \text{ нФ}$.

Отклонения АЧХ скорректированного шунта от номинальной определим по формуле

$$\Delta|\dot{K}_{\text{пр}}| = |\dot{K}_{\text{пр}}|_{\text{н}} - |\dot{K}_{\text{пр}}|_{\text{р}}, \quad (6)$$

где $|\dot{K}_{\text{пр}}|_{\text{н}}$ — АЧХ с номинальными параметрами элементов;

$|\dot{K}_{\text{пр}}|_{\text{р}}$ — АЧХ с учетом влияния нестабильности сопротивлений АК.

На рис. 4 представлены результаты аналитического моделирования АЧХ скорректированного шунта при относительных нестабильностях δ_R 0,01 — 1 %.

Из зависимостей, представленных на рис. 4, следует, что для обеспечения границ полосы пропускания на уровне $\pm 1 \%$ затухания коэффициента преобразования скорректированного шунта в АК необходимо использовать сопротивления с отклонениями от номиналов не ниже 0,1 % (кривые 2—4). Использование сопротивлений с погрешностью 0,5 % приводит к уменьшению полосы пропускания до 500 кГц (кривая 5). Применение сопротивлений с погрешностью 1 % и более в предельном случае выводит АЧХ за пределы рассматриваемой зоны (кривая 6).

Поскольку вероятность сочетания параметров схемы, близких к граничным, в реальных устройствах мала, то оценки по методу наихудшего случая оказываются значительно завышенными. Более точные рекомендации можно получить, если воспользоваться статистическими методами, учитывающими вероятностные законы распределения параметров элементов АК.

Другие возможности расширения динамических характеристик шунта. Приведенная на рис. 3 схема пассивного корректора имеет комплексный коэффициент передачи в виде дробно-рациональной функции с одним нулем и одним полюсом. Как отмечалось выше, при рассмотренных принципах коррекции АЧХ шунта одной корректирующей цепью не удастся полностью скорректировать его инерционность, представленную даже звеном первого порядка.

Помимо рассмотренной в [2] схемы коррекции расширение полосы пропускания АЧХ можно достичь различными вариантами активных корректоров, в которых их передаточные функции полностью корректировали бы характеристику шунта,

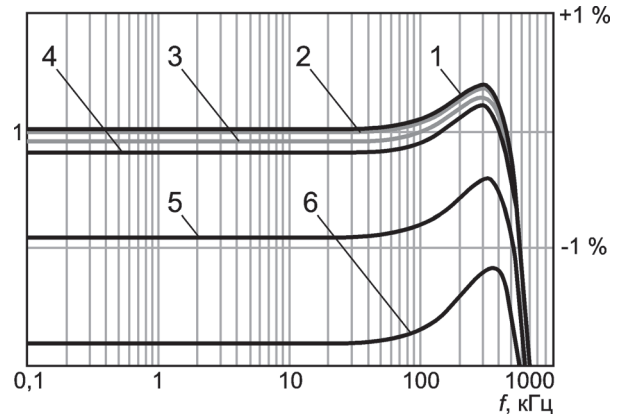


Рис. 4. Влияние нестабильности сопротивлений АК на АЧХ скорректированного шунта (1—6 — шунта и АК):

1 — $\delta_R = 0 \%$; 2 — $\delta_R = 0,01 \%$; 3 — $\delta_R = 0,05 \%$; 4 — $\delta_R = 0,1 \%$;
5 — $\delta_R = 0,5 \%$; 6 — $\delta_R = 1 \%$

представленную функцией первого порядка. Такую возможность можно реализовать множеством схем, примеры которых показаны на рис. 5, а, б при условии, что в полосе предполагаемых рабочих частот операционный усилитель (ОУ) ведет себя как безынерционный элемент. В этом случае модули коэффициентов преобразования схем пропорциональны отношению двух полиномов первого порядка, компенсирующих при равенстве постоянных времени шунта и корректирующих цепей, а неравномерность АЧХ обуславливается на более высоких частотах влиянием высокочастотных нулей и полюсов характеристики шунта.

Недостатком всех предложенных выше схем является взаимная коррекция частотных характеристик объектов разной физической природы (с одной стороны шунта, с другой — элементов электронной схемы).

Выбор элементов схем амплитудных корректоров. Расширение полосы рабочих частот скорректированного шунта требует грамотного выбора пассивных и активных элементов АК, так как их частотные свойства и различного вида нестабильности параметров могут значительно снизить ожидаемый положительный эффект.

Рассмотрим требования к ОУ в схемах активных корректоров (см. рис. 5, а, б), когда частотные искажения усилителя не должны оказывать влияния до сотен кГц. У такого ОУ должна быть малая плотность шумов из-за низких уровней

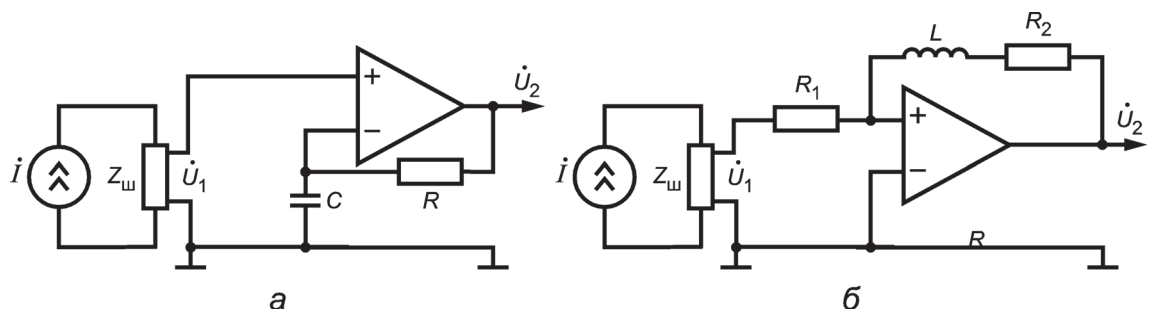


Рис. 5. Схемы активных корректоров преобразователей тока в напряжение:

а — активно-емкостная с обратной связью, б — активно-индуктивная с обратной связью

ней напряжения на выходе шунта при относительно малых протекающих через него токах.

Рассмотрим специализированный усилитель AD797 фирмы AnalogDevice, у которого частота f_T , как произведение усиления на ширину полосы пропускания, составляет 110 МГц. Плотность напряжения его шумов равна $1 \text{ нВ/Гц}^{-1/2}$, но сила тока шумов не ниже, чем у стандартного ОУ, поэтому данный усилитель обладает преимуществами при низкоомных источниках сигнала.

Как известно, на высоких частотах используется интеграторное приближение для дифференциального коэффициента усиления ОУ. Оно показывает, что вплоть до граничной частоты $f = f_T/K = f_T\beta$ усиление схемы K с обратной связью определяется значением коэффициента обратной связи β . Если $f = 0,5 \text{ МГц}$, то такой усилитель будет вносить малые частотные искажения вплоть до усиления в несколько сотен кГц. Он будет практически безинерционным и удовлетворяет требованиям к изготовлению схем активных корректоров. Что касается пассивных элементов АК, то при их выборе необходимо обратить особое внимание на погрешность изготовления, температурную нестабильность и инерционность.

Так как сопротивление шунтов низкоомное, сопротивления в пассивных частях АК обычно ниже 300 Ом, поэтому они относятся к низкоомным резисторам, для которых инерционность определяется паразитной индуктивностью. Для ее уменьшения следует выбирать чип-резисторы, предназначенные для поверхностного монтажа схем. Необходимые для установки в АК резисторы с нужной точностью и малым температурным коэффициентом сопротивления можно найти среди продукции российских и иностранных фирм.

Выводы. Рассмотренные способы позволяют расширить полосу пропускания амплитудно-частотной характеристики коаксиального шунта с использованием различных компенсирующих цепей. Элементы, входящие в амплитудный корректор, должны быть стабильными к различным дестабилизирующим факторам.

Аналитическое моделирование показало, что для обеспечения границ полосы пропускания на уровне $\pm 1 \%$ затухания коэффициента преобразования скорректированного

шунта в амплитудном корректоре необходимо использовать сопротивления с отклонениями от номиналов не ниже 0,1 %.

Для дальнейшего расширения динамических характеристик шунта необходимо использовать амплитудные корректоры более высокого порядка или применять для коррекции объекты одинаковой природы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант №13-08-90748)

Литература

1. **Kawamura T. e. a.** Recent Developments on High Current Measurement Using Current Shunt // Transactions on electrical and electronic engineering. 2007. V. 2. N. 5. P. 516—522.
2. **Johnson C. M., Palmer P. R.** Current measurement using compensated coaxial shunts // IEE Proc. — Sci., Measurement and Technol. 1994. V.141. №. 6. P. 471—480.
3. **Векслер М. С., Теплинский А. М.** Шунты переменного тока. Л.: Энергоатомиздат, 1987.
4. **Данилов А. А.** Современные промышленные датчики тока // Современная электроника. 2004. № 1. С. 26—35.
5. **Нефедьев Д. И.** Метод поверки (калибровки) резистивных преобразователей больших постоянных токов // Датчики и системы. 2006. № 5. С. 47—51.
6. **Бедарева Е. В. и др.** Влияние способов подключения потенциальных выводов на динамические характеристики коаксиальных шунтов // Изв. Томского политех. ун-та. 2013. Т. 322. № 4. С. 159—164.
7. **Баранов П. Ф., Бориков В. Н.** Синхронный усилитель с дифференциальным входом для метрологического обеспечения масштабных измерительных преобразователей // Приборы. 2013. № 4. С. 8—11.
8. **Туз Ю. М.** Структурные методы повышения точности измерительных устройств. Киев.: «Вища-школа», 1976.
9. **Калниболотский Ю. М., Казанджан Н. Н., Нестер В. В.** Расчет чувствительности электронных схем. К.: Техніка, 1982.

Дата принятия 09.04.2014 г.