

ВХОДНОЙ ИМПЕДАНС СИСТЕМЫ КОНВЕРТОРОВ ИМПЕДАНСА

Актуальность. Увеличение чувствительности первичного измерительного преобразователя (индуктивного, емкостного, резистивного) к контролируемому параметру является одной из основных задач при разработке средств измерения и контроля.

Анализ известных решений. Решению этой задачи посвящено много работ. Особый интерес для повышения чувствительности представляют преобразователи импеданса, позволяющие масштабировать полное сопротивление измерительного преобразователя [1,2]. Преобразователи с изменением знака импеданса существенно повышают чувствительность электрических цепей [3,4]. В работе [5] показано как увеличить абсолютное приращение реактанта первичного индуктивного преобразователя системой из последовательно соединенных токовых конверторов. Выводы из [5] справедливы для частного случая, не учитывающего коэффициенты преобразования конверторов, а также возможные способы включения измерительных преобразователей в схемы конверторов.

Постановка задачи. Целью работы является анализ входного импеданса системы из последовательно соединенных токовых конверторов для обоснования возможности повышения чувствительности к изменению импеданса первичного измерительного преобразователя.

Основная часть. Рассмотрим общий случай последовательного соединения произвольного количества n токовых конверторов импеданса, выполненных на основе дифференциального усилителя постоянного тока (рис.1).

Отдельный i -й конвертор преобразует линейные электрические импедансы Z_{1i}, Z_{2i}, Z_{3i} во входной импеданс Z_{exi} , равный согласно [6]

$$Z_{exi} = -Z_{1i} Z_{3i} / Z_{2i} \quad (1)$$

Найдем входной импеданс Z_{ex1} электрической цепи, которая состоит из произвольного количества n последовательно соединенных

токовых конверторов (рис.1). Входной импеданс последнего n-го конвертора согласно (1) равен

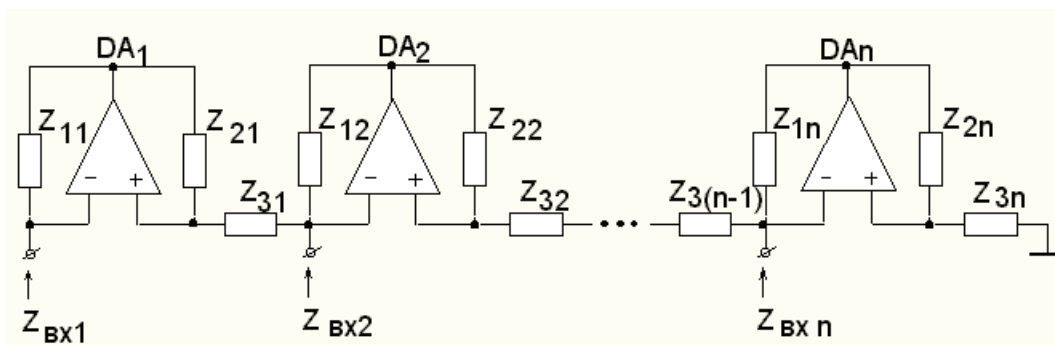


Рисунок 1 - Последовательное соединение токовых конверторов импеданса

$$Z_{\text{вх}n} = -Z_{1n}Z_{3n}/Z_{2n} \quad (2)$$

При этом $Z_{\text{вх}n}$ последовательно соединен с импедансом $Z_{3(n-1)}$, входящим в состав (n-1)-го конвертора. Конвертор с номером (n-1) преобразует суммарный импеданс $(Z_{3(n-1)} + Z_{\text{вх}n})$ в $Z_{\text{вх}(n-1)}$, равный

$$Z_{\text{вх}(n-1)} = -(Z_{3(n-1)} + Z_{\text{вх}n})Z_{1(n-1)}/Z_{2(n-1)} \quad (3)$$

или с учетом (2)

$$Z_{\text{вх}(n-1)} = -\frac{Z_{1(n-1)}}{Z_{2(n-1)}} \left(Z_{3(n-1)} - Z_{3n} \frac{Z_{1n}}{Z_{2n}} \right) \quad (4)$$

Для импеданса $Z_{\text{вх}1}$ по аналогии с (4) можно записать

$$Z_{\text{вх}1} = -\frac{Z_{11}}{Z_{21}} \left(Z_{31} - \frac{Z_{12}}{Z_{22}} \left(Z_{32} - \dots - \frac{Z_{1(n-1)}}{Z_{2(n-1)}} \left(Z_{3(n-1)} - Z_{3n} \frac{Z_{1n}}{Z_{2n}} \right) \right) \dots \right) \quad (5)$$

Преобразуем (5) к виду конечного ряда:

$$Z_{\text{вх}} = -Z_{31} \frac{Z_{11}}{Z_{21}} + Z_{32} \frac{Z_{11}Z_{12}}{Z_{21}Z_{22}} - \dots + (-1)^n Z_{3n} \frac{Z_{11}Z_{12}Z_{13} \dots Z_{1n}}{Z_{21}Z_{22}Z_{23} \dots Z_{2n}}, \quad (6)$$

тогда в общем виде входной импеданс \square электрической цепи из n последовательно соединенных конверторов можно определить как

$$Z_{\text{вх}} = \sum_{i=1}^n (-1)^i Z_{3i} \prod_{j=1}^i \frac{Z_{1j}}{Z_{2j}}. \quad (7)$$

В качестве любого из Z_{1i} Z_{2i} Z_{3i} , может быть использован первичный измерительный преобразователь. Рассмотрим, каким будет абсолютное приращение входного импеданса $\Delta Z_{\text{вх}}$ при вариациях величин Z_{1i} Z_{2i} Z_{3i} . При этом сделаем допущение,

справедливое на практике, что соответствующие импедансы во всех конверторах равны по величине, т.е.

$$Z_{11} = Z_{12} = \dots = Z_{1i} = \dots = Z_1; Z_{21} = Z_{22} = \dots = Z_{2i} = Z_2; Z_{31} = Z_{32} = \dots = Z_{3i} = \dots = Z_3$$

Тогда (7) приводится к виду

$$Z_{d1} = Z_3 \sum_{i=1}^n (-1)^i \left(\frac{Z}{Z_2} \right)^i \quad (8)$$

Примем в качестве первичных измерительных преобразователей все импедансы Z_1 , которые в процессе измерений изменяют свое значение на величину ΔZ_1 . При этом входной импеданс системы конверторов изменяется до значения

$$Z'_{ex} = Z_3 \sum_{i=1}^n (-1)^i \frac{(Z_1 + \Delta Z_1)^i}{Z_2^i} \quad (9)$$

Абсолютное приращение входного импеданса определим как

$$\Delta Z'_{ex} = Z_3 \sum_{i=1}^n (-1)^i \left(\frac{Z_1}{Z_2} \right)^i \left[\left(1 + \frac{\Delta Z_1}{Z_1} \right)^i - 1 \right] \quad (10)$$

Аналогично для случаев, когда измерительными преобразователями являются импедансы Z_2 или Z_3 определим абсолютные приращения входных импедансов системы конверторов $\Delta Z''_{ex}$ и $\Delta Z'''_{ex}$

$$\Delta Z''_{ex} = Z_3 \sum_{i=1}^n (-1)^i \left(\frac{Z_1}{Z_2} \right)^i \left[\frac{1}{\left(1 + \Delta Z_2 / Z_2 \right)^i} - 1 \right], \quad (11)$$

$$\Delta Z'''_{ex} = \Delta Z_3 \sum_{i=1}^n (-1)^i \left(Z_1 / Z_2 \right)^i \quad (12)$$

Из рассмотрения (10), (11), (12) можно сделать следующие выводы. Если считать, что

$$\Delta Z_1 / Z_1 = \Delta Z_2 / Z_2 = \Delta Z_3 / Z_3 = \Delta Z / Z, \quad (13)$$

то максимальное абсолютное приращение входного импеданса системы конверторов наблюдается при включении измерительных преобразователей в качестве Z_1 . При этом справедливо $|\Delta Z'_{ex}| > |\Delta Z''_{ex}| > |\Delta Z'''_{ex}|$. Абсолютное приращение входного импеданса пропорционально количеству n конверторов и отношению Z_1 / Z_2 . Для реализации эффекта увеличения абсолютного приращения входного

импеданса измерительные преобразователи необходимо включать либо только в конверторы с четным n , либо только с нечетным n . При этом в первом случае $\Delta z'_{\text{ex}} > 0$; $\Delta z''_{\text{ex}} < 0$; $\Delta z'''_{\text{ex}} > 0$, а во втором $\Delta z'_{\text{ex}} < 0$; $\Delta z''_{\text{ex}} > 0$; $\Delta z'''_{\text{ex}} < 0$. На рис.2 приведены рассчитанные по формулам (10),(11),(12) графические зависимости абсолютных приращений от величины вариации импедансов Z_1 , Z_2 , Z_3 при условии (13)

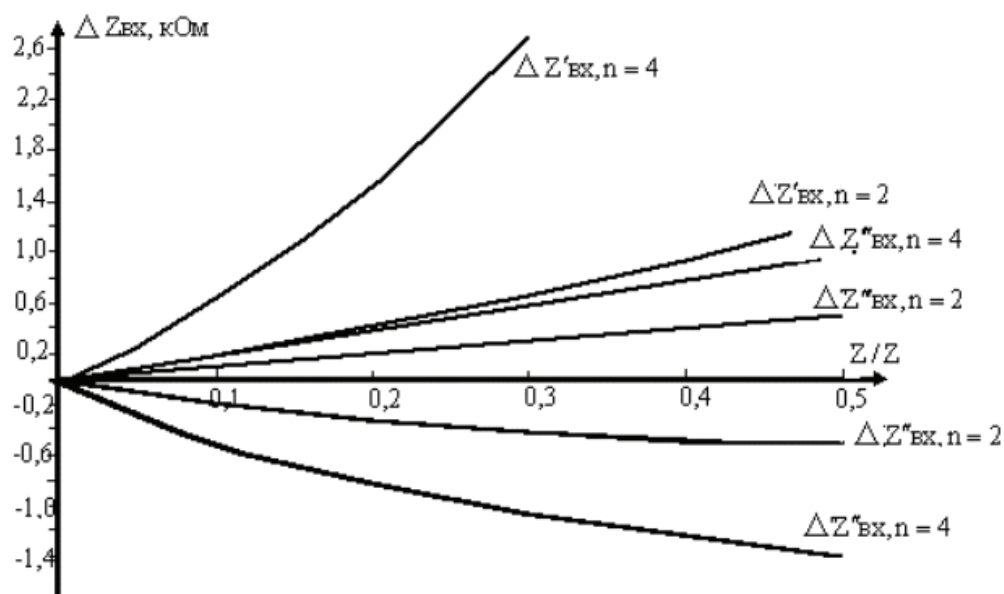


Рисунок 2 - Абсолютное приращение $\Delta Z_{\text{вх}}$ как функция вариации преобразуемых импедансов $\Delta Z/Z$ при включении измерительных преобразователей в четные конверторы ($Z_3=1$ кОм, $Z_1/Z_2=1$)

Из рисунка видно, что уже при $n=4$ максимальные значения принимает зависимость (10). Зависимость $\Delta z'''_{\text{ex}} (\Delta z_3/z_3)$ линейна, а $\Delta z'_{\text{ex}} (\Delta z_1/z_1)$ и $\Delta z''_{\text{ex}} (\Delta z_2/z_2)$ не линейны, причем $\Delta z''_{\text{ex}} (\Delta z_2/z_2)$ асимптотически стремится к значению -1 (при $n=2$) и к значению -2 (при $n=4$), что свидетельствует об ограниченной чувствительности при использовании Z_2 в качестве измерительного преобразователя. Анализ зависимостей абсолютного приращения $\Delta z_{\text{ex}} (\Delta z/z)$ показывает целесообразность использования Z_1 в качестве первичного измерительного преобразователя, т.к. только в этом случае достигается максимальная чувствительность.

Система из последовательно соединенных конверторов будет работоспособна при выполнении условия устойчивости по

постоянному току, а именно - для каждого усилителя постоянного тока коэффициент отрицательной обратной связи должен быть больше коэффициента положительной обратной связи. Для отдельного конвертора условие устойчивости имеет вид[5]

$$\frac{Z_n}{Z_n + Z_{1i}} > \frac{Z_{3i}}{Z_{3i} + Z_{2i}}, \quad (14)$$

где Z_i - импеданс нагрузки, подключенной к входу i -го конвертора.

Очевидно, что в системе последовательно соединенных конверторов условие (14) будет автоматически выполняться для всех конверторов, начиная со второго, т.к. инвертирующий вход усилителя каждого I -го конвертора через импеданс $Z_{3(i-1)}$ подключен к неинвертирующему входу усилителя $(i-1)$ -го конвертора, имеющему большое входное сопротивление (т.е. $Z_{i(i-1)} \rightarrow \infty$). Следовательно, устойчивость системы конверторов определяется условием устойчивости только первого конвертора, которое по аналогии с (14) имеет вид

$$\frac{Z_n}{Z_n + Z_{11}} > \frac{Z_{31} + \sum_{i=2}^n (-1)^i Z_{3i} \prod_{j=1}^i Z_{1j} / Z_{2j}}{Z_{31} + \sum_{i=2}^n (-1)^i Z_{3i} \prod_{j=1}^i Z_{1j} / Z_{2j} + Z_{21}}. \quad (15)$$

Выводы. Анализ входного импеданса последовательно соединенных токовых конверторов показал возможность реализации измерительной системы на основе преобразователей импеданса с высокой чувствительностью к изменению полного сопротивления первичного измерительного преобразователя. Проведенный анализ позволил получить условия реализации высокой чувствительности и обеспечения устойчивости по постоянному току.

ЛИТЕРАТУРА

1. Филановский И.М., Персианов А.Ю., Рыбин В.К. Схемы с преобразователями сопротивления. - Л.: Энергия, 1973. -192 с.
2. Карпов Е.А., Марунчак Л.В., Рядинских А.С. Синтез нелинейных преобразователей. - М.: Энергоатомиздат, 1986. -136 с.
3. Индуктивный датчик: А.с.1629876 ССР, МКИ 5G01R 27/26/ Н.А.Филинюк, А.И.Никольский, В.Г.Красиленко, И.И.Билык (СССР). - №4413794; Заявл. 20.04.88; Опубл.23.02.91.Бюл.№7 - 4с.
4. Твердоступ Н.И., Бакушев В.А.. Автогенераторные средства электромагнитного контроля на основе преобразователей импеданса.-

В кн. «XI Всесоюзн. научно-техн. конф. «Неразрушающие физические методы и средства контроля». Часть 3. - М.: МНПО «Спектр», 1987. -с.147 - 148.

5. Твердоступ Н.И. О повышении чувствительности измерителей магнитной проницаемости с помощью конверторов отрицательных импедансов. - В кн.: Приборы и методы экспериментальных исследований. - Днепропетровск: ДГУ, 1985. с.40 - 43.

Достал И. Операционные усилители. – М.: Мир, 1982. – с 512.

Получено 15.11.07 г.