

## ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ЦЕПИ

УДК 621.317.733.025

Е. А. БУДНИЦКАЯ, А. И. НОВИК

(Киев)

### О СВОЙСТВАХ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ МОСТОВОЙ ЦЕПИ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ КОМПАРАТОРОМ ТОКОВ\*

В автоматических цифровых экстремальных мостах [1, 2], а также в ряде других приборов для высокоточных измерений параметров электрических цепей применяются трансформаторные мостовые цепи (мосты с тесной индуктивной связью между плечами). Одним из основных элементов трансформаторного моста (рис. 1) является индуктивный компаратор токов КТ, последовательно с обмотками  $n_1 - n_k$  которого

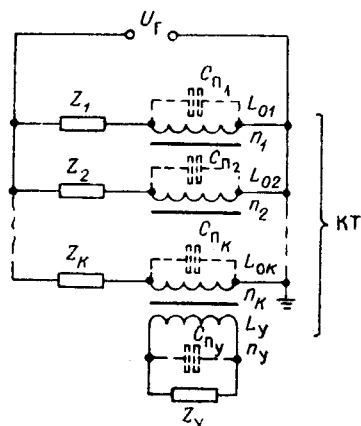


Рис. 1.

включаются исследуемое и образцовые сопротивления  $Z_1 - Z_k$ . К указательной обмотке  $n_y$  компаратора токов подключается указатель равновесия, имеющий входное сопротивление  $Z_y$ . Часто на ветви такого моста подаются различные по амплитуде напряжения, снимаемые с обмоток трансформатора напряжений (на рис. 1 не показан). Однако введение в схему этого трансформатора не меняет характера электрических процессов, происходящих в компараторе токов. Поэтому для упрощения в дальнейшем рассматриваются только одинарные мосты с индуктивным компаратором токов, хотя все изложенное в равной степени относится и к двойным мостам, содержащим еще и трансформатор напряжений.

В зависимости от соотношения между сопротивлением указателя  $Z_y$  и выходным сопротивлением измерительной цепи можно реализовать различные режимы работы компаратора токов. Предельными являются режим холостого хода ( $Z_y = \infty$ ) и режим короткого замыкания ( $Z_y = 0$ ). Обычно параметры схемы и указателя равновесия выбираются так, чтобы обеспечить макси-

\* Материал был доложен на Республиканской межвузовской конференции по вопросам радиоэлектроники и автоматики в г. Львове в 1967 г.

мальное приближение к режиму холостого хода. Это вызвано стремлением к получению наибольшей чувствительности по напряжению. Однако, как показали исследования, другой предельный режим работы компаратора токов — режим короткого замыкания — обладает целым рядом интересных особенностей и имеет преимущества перед режимом холостого хода.

Использование режима короткого замыкания в компараторах токов трансформаторных мостов предложено в [3, 4], где показано одно из преимуществ этого режима — лучшая сходимость процесса уравнивания по сравнению с мостами, в которых компаратор работает в режиме холостого хода.

В настоящей работе продолжено исследование электрических процессов в схемах с короткозамкнутым компаратором, причем обращено внимание на другую особенность этих схем — высокое постоянство абсолютной чувствительности по регулируемому параметру, что имеет весьма важное значение в автоматических экстремальных мостах. Показано также, что возможна реализация режима короткого замыкания без потери чувствительности измерительной цепи, причем технически эта реализация не сложнее, чем для режима холостого хода.

Недостатком трансформаторного моста с компаратором, работающим в режиме холостого хода, является сильная зависимость напряжения неравновесия от таких нестабильных параметров, как магнитная проницаемость сердечника компаратора и паразитные емкости, шунтирующие обмотки компаратора токов. Это объясняется принципом работы такого компаратора, входным сигналом которого является ток, а выходным — напряжение (точнее, э. д. с.), причем связь входного и выходного сигналов осуществляется через взаимную индуктивность обмоток, величина которой непосредственно зависит от параметров сердечника. Кроме того, компаратор, работающий в режиме холостого хода, представляет собой колебательную систему из индуктивностей и емкостей. Добротность этой системы, как правило, велика, собственная частота обычно лежит вблизи от рабочей частоты моста, поэтому зачастую возникают резонансные явления, вызывающие на отдельных участках диапазона измерения резкие изменения чувствительности моста. Следует отметить, что емкости, которыми определяется резонансная частота компаратора токов, в основном представляют собой паразитные межвитковые емкости обмоток. Их величина под влиянием температуры и влажности может изменяться в несколько раз. Поэтому попытки стабилизировать чувствительность измерительной цепи за счет разноса резонансной и рабочей частот моста малоэффективны, так как резонансная частота с течением времени может изменяться в широких пределах. При этом речь идет не о колебаниях чувствительности на 20—50%, которые не влияют ни на работоспособность, ни на технические характеристики моста, а об изменениях чувствительности измерительной цепи во много раз.

Отмеченные факторы существенно затрудняют использование весьма высокоточных и удобных во всех остальных отношениях трансформаторных мостовых цепей при построении автоматических мостов. Особенно резко эти недостатки проявляются при серийном производстве приборов, когда наряду с долговременной стабильностью чувствительности отдельного экземпляра схемы очень желательно иметь еще и минимальный разброс чувствительности от прибора к прибору.

Перечисленные недостатки могут быть практически полностью устранены, если компаратор токов использовать в режиме короткого замыкания. При этом в качестве детектора равновесия должен применяться

индикатор тока (а не напряжения) с возможно меньшим входным сопротивлением. Работа компаратора токов в таком режиме аналогична работе трансформатора тока. Параметры сердечника уже не влияют на коэффициент передачи компаратора. Благодаря короткому замыканию одной из тесно связанных обмоток компаратора добротность колебательной системы оказывается близкой к нулю, и возможность возникновения резонансных явлений исключается.

Найдем соотношения, характеризующие предельные режимы работы компаратора токов, а также условия осуществимости режима короткого замыкания. Для упрощения выкладок будем считать, что коэффициент связи между любой парой обмоток компаратора токов равен единице и что остаточными параметрами обмоток (активными сопротивлениями и индуктивностями рассеяния) можно пренебречь. Пользуясь одним из известных методов расчета цепей, получим выражение для напряжения  $U_y$  на указательной обмотке моста и для тока указателя  $I_y$  в общем случае:

$$U_y = U_r \frac{j \omega n_y a H}{\frac{j \omega L_y}{Z_y} + P}; \quad (1)$$

$$I_y = \frac{U_y}{Z_y} = U_r \frac{j \omega n_y a H}{j \omega L_y + Z_y P}, \quad (2)$$

где  $U_r$  — напряжение генератора;  $n_1 - n_k$ ,  $n_y$  — числа витков обмоток компаратора токов;  $a$  — удельная индуктивность на один виток обмотки, зависящая от параметров сердечника;  $H = \pm \frac{n_1}{Z_1} \pm \frac{n_2}{Z_2} \pm \dots \pm \frac{n_k}{Z_k}$ ;  $P = 1 + \frac{j \omega L_{01}}{Z_1} + \frac{j \omega L_{02}}{Z_2} + \dots + \frac{j \omega L_{0k}}{Z_k} - \omega^2 (L_{01} C_{n1} + L_{02} C_{n2} + \dots + L_{0k} C_{nk} + L_y C_{ny})$ ;  $L_{01} - L_{0k}$ ,  $L_y$  — индуктивности обмоток компаратора токов;  $C_{n1} - C_{nk}$ ,  $C_{ny}$  — паразитные емкости, шунтирующие соответствующие обмотки компаратора токов.

В выражениях (1) и (2) через  $H$  обозначен многочлен, который при равновесии моста обращается в нуль. При отклонении регулируемого параметра (числа витков одной из обмоток) от состояния равновесия величина  $H$  меняется линейно. Через  $P$  обозначен многочлен, стоящий в знаменателе. Нетрудно показать, что для получения постоянной абсолютной чувствительности моста в точке равновесия необходимо, чтобы знаменатель в выражениях (1) и (2) не изменялся. Однако, анализируя структуру многочлена  $P$ , легко убедиться, что величина его действительной части (которая при реактивных плечевых сопротивлениях и работе вдали от резонанса превалирует над мнимой частью) может изменяться в сильной степени при колебаниях рабочей частоты моста  $\omega$ , параметров сердечника, величин паразитных емкостей. При определенном соотношении параметров и частоты эта составляющая становится равной нулю (резонанс). Легко видеть также, что в режиме холостого хода, когда первым слагаемым в знаменателе формулы (1) можно пренебречь в силу очень большой величины  $Z_y$ , знаменатель дроби представляет собой многочлен  $P$  в чистом виде. Его нестабильностью и объясняется отмеченное выше непостоянство чувствительности измерительной цепи.

В режиме идеального короткого замыкания, как видно из (2), слагаемое в знаменателе дроби, содержащее многочлен  $P$ , исключается, так как  $Z_y = 0$ , и формула приобретает простой вид

$$I_{y.k.z} = U_r \frac{H}{n_y}. \quad (3)$$

Очевидно, что в этом случае чувствительность цепи по току не будет зависеть от нестабильных факторов, перечисленных выше.

Получим для примера выражение чувствительности по регулируемому параметру  $n_2$  для четырехплечего трансформаторного моста с короткозамкнутым компаратором, когда элементы  $Z_1$  и  $Z_2$  представляют собой конденсаторы. При этом  $\frac{1}{Z_1} = j\omega C_1$ ,  $\frac{1}{Z_2} = j\omega C_2$  и из (3) следует

$$I_{y.k.z} = U_r \frac{j\omega(C_1 n_1 - C_2 n_2)}{n_y}, \quad (4)$$

откуда можно найти абсолютную чувствительность по  $n_2$

$$S_{n_2} = \frac{\partial I_{y.k.z}}{\partial n_2} = -U_r \frac{j\omega C_2}{n_y}. \quad (5)$$

Как видно из (5), в выражение чувствительности входят лишь стабильные величины.

Очевидно, что обеспечить идеальный режим короткого замыкания на практике невозможно; к нему можно лишь более или менее приближаться (как и к режиму холостого хода). Рассмотрим, какие необходимо выполнить соотношения для реализации такого режима. Как следует из (2), режим короткого замыкания будет обеспечен, если выполняется условие

$$|Z_y P| \ll \omega L_y. \quad (6)$$

Для мостов с реактивными плечевыми сопротивлениями (при сравнительно малых величинах тангенса угла потерь) условие (6) может быть представлено в более удобном для практического использования виде

$$\left| \frac{\omega L_y}{Z_y} \right| \gg A \left( 1 - \frac{\omega^2}{\omega_p^2} \right), \quad (7)$$

где  $A = 1 + \frac{L_{01}}{L_1} + \frac{L_{02}}{L_2} + \dots + \frac{L_{0k}}{L_k}$ ;  $L_1 - L_k$  — индуктивности плечевых сопротивлений, включенных последовательно с соответствующими обмотками компаратора токов (при отсутствии в мосте плечевых сопротивлений индуктивного характера коэффициент  $A$  равен единице);  $\omega_p$  — собственная резонансная частота моста, при которой величина  $P$  имеет минимальное или нулевое значение. С помощью выражения (7) легко может быть найдено необходимое соотношение между входным сопротивлением указателя  $Z_y$  и индуктивным сопротивлением указательной обмотки в каждом конкретном случае. Из этого выражения следует, что легче всего режим короткого замыкания реализуется в том случае, когда рабочая и резонансная частоты моста лежат недалеко друг от друга; однако в этом случае необходимо учитывать возможную нестабильность величины  $\omega_p$ .

Кратко остановимся на вопросе о реальной чувствительности мостов с короткозамкнутым компаратором токов. Из выражений (3)—(5) следует, что чувствительность схемы обратно пропорциональна количеству витков указательной обмотки. Однако условием обеспечения режима короткого замыкания (7) накладывается ограничение на минимальное число витков  $n_y$ , так как индуктивность  $L_y$  пропорциональна квадрату этого числа витков. Таким образом, становятся очевидными два пути повышения реальной чувствительности мостовой цепи с короткозамкнутым компаратором: 1) увеличение магнитной проницаемости сердечника (точнее, повышение удельной индуктивности на один виток указательной обмотки), при котором та же величина  $L_y$  обеспечивается при меньшем числе витков  $n_y$ ; 2) снижение входного сопротивления указателя  $Z_y$ .

Авторами разработано устройство, которое можно использовать в качестве входного каскада избирательного усилителя, подключаемого к выходу измерительной цепи (рис. 2).

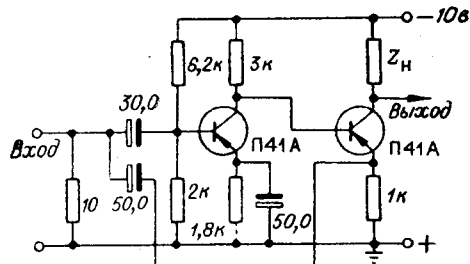


Рис. 2.

Это устройство представляет собой усилитель с токовым входом, имеющий входное сопротивление около 0,1—0,5 ом. На выходе устройства действует напряжение, примерно равное произведению входного тока на сопротивление нагрузки  $Z_n$ . В дальнейшем это напряжение усиливается обычным усилителем. Устройство содержит два транзистора и собрано по схеме усилителя с глубокой параллельной отрицательной обратной связью (автокомпенсатор

тока). В нем используется также способность полупроводникового триода работать в качестве трансформатора сопротивления. Описываемое устройство может работать при входных токах менее  $10^{-7}$  а. Верхний предел величины входного тока 2—3 ма.

Эффективность режима короткого замыкания в компараторе токов проверялась экспериментально с применением описанного входного устройства нуль-индикатора тока. В настоящее время этот режим используется в рядеготавливаемых к выпуску серийных цифровых мостов, а также в выпускаемой серийно усовершенствованной модели цифрового автоматического моста для высокоточного измерения параметров конденсаторов (мост типа Р589). При этом получена стабильная чувствительность измерительной цепи около 0,2 мкв на один шаг младшей декады, при которой на выходе входного устройства действует напряжение около 2 мв на шаг. Для сравнения укажем, что в измерительной цепи моста типа Р570, где компаратор токов работал в режиме холостого хода, чувствительность схемы составляла 30—200 мкв на шаг младшей декады, т. е. в десять и более раз ниже, чем в новой схеме в совокупности со входным устройством. Если учесть, что это устройство содержит всего два транзистора, а для реализации режима холостого хода необходим эмиттерный повторитель, содержащий также один или два транзистора, то станет очевидным, что режим короткого замыкания может быть обеспечен практически без усложнения прибора, причем получается выигрыш в величине чувствительности и резко возрастает стабильность этой чувствительности.

В заключение отметим, что при разработке цифровых автоматических мостов, работающих на нескольких частотах (в особенности это

касается приборов для измерения параметров катушек индуктивности), представляется крайне затруднительным обеспечить четкую и надежную работу системы автоматического уравнивания без использования режима короткого замыкания в компараторе токов. Это относится как к экстремальным мостам, так и к мостам с фазочувствительным детектированием.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ф. Б. Гриневиц, А. В. Чеботарев, А. И. Новик. Цифровой автоматический экстремальный мост переменного тока.— Автометрия, 1965, № 5.
2. Ф. Б. Гриневиц, А. В. Чеботарев, А. И. Новик. Цифровой автоматический экстремальный мост переменного тока. Авторское свидетельство № 175126.— Бюллетень изобретений, 1965, № 19.
3. Ю. В. Братусь, В. П. Карпенко, И. С. Сериков, Ю. А. Скрипник. Автоматический мост для измерения комплексных сопротивлений. Авторское свидетельство № 203768.— ИПОТЗ, 1967, № 21.
4. Ю. В. Братусь, В. П. Карпенко, И. С. Сериков. Сходимость мостовых схем с индуктивными компараторами токов.— Сб. «Методы и аппаратура для измерения электрических и магнитных величин». Киев, «Наукова думка», 1966.

*Поступила в редакцию  
29 июля 1968 г.*