

И. С. БОЛДЫРЕВА, О. А. ЛУЖЕЦКАЯ, Т. Н. МАНТУШ  
(Новосибирск)

### АЛГОРИТМ УРАВНОВЕШИВАНИЯ ШИРОКОПОЛОСНОГО ЦИФРОВОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ ПАРАМЕТРОВ КАТУШЕК ИНДУКТИВНОСТИ

В широкополосном цифровом измерителе параметров катушек индуктивности [1] реализован алгоритм поочередного подекадно-следающего уравнивания. Такое уравнивание обычно начинается с выбора пределов по основному параметру и заканчивается на младших декадах; в процессе уравнивания, осуществляемого цифровыми реверсивными устройствами по командам указателей (детекторов) равновесия и блока управления, следуют постепенные переходы от старших декад к младшим [2, 3].

Представляет интерес формальное описание алгоритмов подекадно-следающего уравнивания, которое проводится ниже на примере алгоритма нового цифрового измерителя параметров катушек индуктивности [1]. Такое описание может быть составлено для различных видов алгоритмов, отличающихся количеством и порядком переходов по декадам обоих параметров. Оно отражает работу блока управления прибора и позволяет построить его структурную схему, соответствующую заданному алгоритму.

Автоматический цифровой измеритель имеет пять пределов, обеспечивающих измерение индуктивностей от 10 мкГ до 999,9 мГ; на младшем пределе предусмотрен режим разрешенного нуля старшей декады. Диапазон измеряемых тангенсов угла потерь от 0,001 до 0,999. Блок-схема измерителя показана на рис. 1.

Уравнивание измерительной цепи (ИЦ) по  $L$  и  $\operatorname{tg} \delta$  осуществляется реверсивными счетчиками РС —  $L$  и РС —  $\operatorname{tg} \delta$ . Счетчик РС —  $L$  включает в себя реверсивный счетчик пределов, четыре декадных счетчика и реверсивный элемент на три состояния, уравнивающей измерительную цепь двумя дополнительными ступенями по 0,5 единиц младшей декады  $L$  — 4; счетчик РС —  $\operatorname{tg} \delta$  состоит из трех декадных счетчиков и реверсивного элемента, уравнивающего цепь двумя ступенями по 0,5 единиц декады  $\operatorname{tg} \delta$  — 3. Введением дополнительных ступеней обеспечивается устойчивая работа прибора в следящем режиме (см. ниже). Между счетчиками всех декад одного параметра, включая реверсивные элементы и счетчик пределов, имеются счетные связи. Индикация состояний счетчиков осуществляется цифровыми отсчетными устройствами ЦОУ —  $L$ , ЦОУ —  $\operatorname{tg} \delta$ .

Сигнал неравновесия измерительной цепи, пройдя усилитель УСН и преобразователь частоты ПЧ (выход 2), поступает на сигнальные входы двух фазовых (квадратурных) указателей ФУ —  $L$  и ФУ —  $\operatorname{tg} \delta$ . На опорные входы указателей поступают сигналы с выходов преобразователя 1, 3. Детектирование осуществляется на одной промежуточной частоте, на которую переносятся фазовые соотношения сигналов рабочей частоты.

Алгоритм уравнивания, осуществляемый блоком управления БУ, представлен на рис. 2, где условно изображены состояния БУ, при которых производится выбор пределов (П) и регулировка соответствующих декад  $L$  и  $\operatorname{tg} \delta$ . Стрелки показывают последовательность переходов

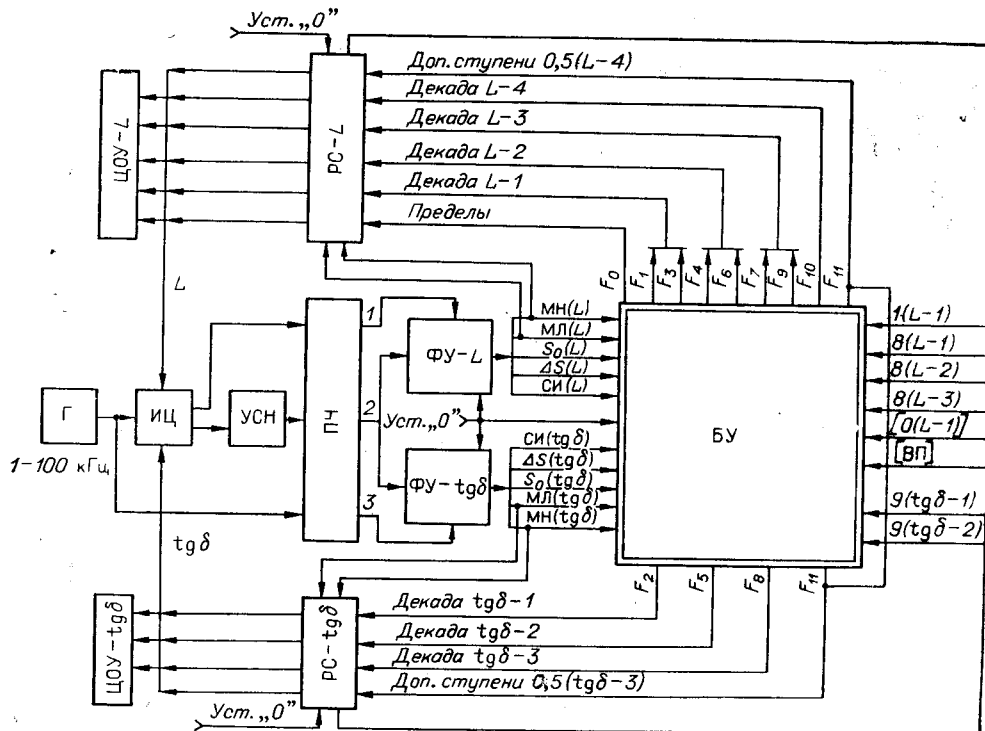


Рис. 1.

дов с декады на декаду. На последнем переходе либо отключается система уравнивания (режимы разовых и повторных измерений), либо включаются дополнительные ступени  $L-D$ ,  $tg\delta-D$  (следящий режим).

Для записи логических функций переходов по алгоритму должны быть выделены все условия, по которым эти переходы осуществляются. Очевидно, что при дискретном уравнивании основным условием прекращения регулировки данной декады является проход или достижение равновесия по регулируемому параметру. Это условие отмечают указатели сигналами  $\Delta S(L)$ ,  $\Delta S(tg\delta)$ , соответствующими проходу равновесия по  $L$ ,  $tg\delta$ , и сигналами  $S_0(L)$ ,  $S_0(tg\delta)$ , соответствующими достижению частичного или полного равновесия (см. рис. 1). Указатели выдают также счетные импульсы СИ ( $L$ ), СИ ( $tg\delta$ ), направляемые блоком управления на входы счетчиков, и сигналы МЛ ( $L$ ), МН ( $L$ ), МЛ ( $tg\delta$ ), МН ( $tg\delta$ ), показывающие знак неравновесия («мало», «много») по  $L$  и по  $tg\delta$  и задающие направление счета.

Однако не все условия переходов по алгоритму учитываются сигналами указателей. Рассмотрим процесс уравнивания, начиная с выбора предела по индуктивности, и выделим дополнительные условия, которые необходимо учесть для осуществления автоматического уравнивания во всем диапазоне возможных значений измеряемых параметров.

При измерении параметров индуктивных объектов автоматический выбор предела во избежание резких перегрузок элементов измерительной цепи целесообразно начинать снизу: по команде Уст. «О» включается первый предел, указатели равновесия устанавливаются в состояние МЛ ( $L$ ), МЛ ( $tg\delta$ ), а БУ в нулевое положение (переход 0), обеспечивающее поступление СИ ( $L$ ) на счетчик пределов. При запрещенном

нуле старшей декады исходному состоянию соответствует показание 10.00 мкГ (показание по  $\text{tg } \delta = 0.000$ ). Если при этом  $10 \text{ мкГ} < L_x \leq 100 \text{ мГ}$ , то начнется переключение пределов и будет продолжаться до тех пор, пока на выходе ФУ —  $L$  не возникнут сигналы  $\Delta S(L)$  или  $S_0(L)$ , которые вызовут переход на декаду  $L-1$ . По этим же сигналам произойдет переход на декаду  $\text{tg } \delta - 1$ , откуда по сигналам  $\Delta S(\text{tg } \delta)$  или  $S_0(\text{tg } \delta)$  снова на  $L-1$  и т. д. Однако если значение индуктивности попадает в верхний предел (ВП) или выходит за его границу, определяемую полным набором декад (999,9 мГ), то при включении этого предела сигналы  $\Delta S(L)$ ,  $S_0(L)$  будут отсутствовать. Несмотря

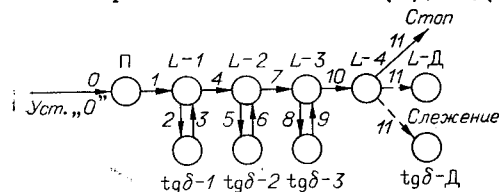


Рис. 2.

на это, должен быть произведен переход на декаду  $L-1$ . Таким образом, включение верхнего предела можно считать дополнительным условием для перехода 1 по алгоритму (см. рис. 2). При работе на верхнем пределе должны быть введены также дополнительные условия на уход с декад  $L-1$ ,  $L-2$ ,  $L-3$  по мере их заполнения (цифра 9) в состоянии указателя МЛ ( $L$ ). Такой уход может быть осуществлен двояко: либо по набору на декаде цифры 9, либо по набору цифры 8. В первом случае необходимо исключить вторичное уравнивание этими декадами, т. е. по переходам 3, 6, 9 с параметра  $\text{tg } \delta$  должны обеспечиваться обходы декад  $L-1$ ,  $L-2$ ,  $L-3$ . В приборе использован второй, более простой путь: он не требует обходов и обеспечивает заполнение декад двойной их регулировкой. Итак, вторая группа дополнительных условий для переходов 2, 4, 5, 7, 8, 10 по алгоритму заключается в наборе на декадах  $L-1$ ,  $L-2$ ,  $L-3$  цифр 8 в состоянии МЛ ( $L$ ) указателя ФУ —  $L$ .

Аналогичные дополнительные условия должны быть введены для переходов 3 и 6 по заполнению декад  $\text{tg } \delta - 1$ ,  $\text{tg } \delta - 2$  в состоянии МЛ( $\text{tg } \delta$ ) указателя ФУ —  $\text{tg } \delta$ . В противном случае окажется невозможным уравнивание при значениях  $\text{tg } \delta > 0,9$ . Поскольку уравнивание на этих декадах производится один раз, то оставлять их следует по набору девяток. Имеет смысл предусмотреть также возможность обхода декады  $\text{tg } \delta - 1$  на случай неправильного показания указателя ФУ —  $\text{tg } \delta$  при малых значениях  $\text{tg } \delta$  из-за связи контуров уравнивания. Поскольку к моменту прихода на эту декаду правильным состоянием указателя при  $\text{tg } \delta > 0$  всегда должно быть состояние МЛ( $\text{tg } \delta$ ), то обход можно выполнить по сигналу МН( $\text{tg } \delta$ ).

Наконец, при работе автоматического измерителя в режиме разрешенного нуля старшей декады (измерение индуктивностей  $L_x < 10 \text{ мкГ}$ ) необходимо ввести еще одно дополнительное условие для перехода 2: набор единицы на декаде  $L-1$  в состоянии МН ( $L$ ) указателя ФУ —  $L$ . Это условие связано с тем, что измерительная цепь не может быть уравнирована по  $\text{tg } \delta$  при полном выводе всех декад по индуктивности.

Введем следующие символы для обозначения сигналов, соответствующих всем рассмотренным дополнительным условиям (см. рис. 1):  $[ВП]$ ,  $[0(L-1)]$  — сигналы по состояниям счетчика пределов, соответствующим включению верхнего предела и разрешенному нулю старшей декады;  $8(L-1)$ ,  $8(L-2)$ ,  $8(L-3)$  — сигналы по состояниям декадных счетчиков РС —  $L$ , соответствующим включению восьмерок в декадах  $L-1$ ,  $L-2$ ,  $L-3$ ;  $9(\delta-1)$ ,  $9(\delta-2)$  — сигналы по состояниям декадных счетчиков РС —  $\text{tg } \delta$ , соответствующим включению девяток в декадах  $\text{tg } \delta - 1$ ,  $\text{tg } \delta - 2$ ;  $1(L-1)$  — сигналы по состоянию счетчика декады  $L-1$ , соответствующему включению единицы. Тогда алгоритм

уравновешивания можно записать в виде следующих логических функций его переходов:

$$\begin{aligned}
 F_0(t) &= \text{Уст. «О»}; \\
 F_1(t+1) &= F_0(t) \{ \Delta S(L) + S_0(L) + [\text{ВП}] \}; \\
 F_2(t+1) &= F_1(t) \{ \Delta S(L) + S_0(L) + [\text{ВП}] 8(L-1) \text{МЛ}(L) + \\
 &\quad + [0(L-1)] 1(L-1) \text{МН}(L) \}; \\
 F_3(t+1) &= F_2(t) \{ \Delta S(\delta) + S_0(\delta) + 9(\delta-1) \text{МЛ}(\delta) + \text{МН}(\delta) \}; \\
 F_4(t+1) &= F_3(t) \{ \Delta S(L) + S_0(L) + [\text{ВП}] 8(L-1) \text{МЛ}(L) \}; \\
 F_5(t+1) &= F_4(t) \{ \Delta S(L) + S_0(L) + [\text{ВП}] 8(L-2) \text{МЛ}(L) \}; \\
 F_6(t+1) &= F_5(t) \{ \Delta S(\delta) + S_0(\delta) + 9(\delta-2) \text{МЛ}(\delta) \}; \\
 F_7(t+1) &= F_6(t) \{ \Delta S(L) + S_0(L) + [\text{ВП}] 8(L-2) \text{МЛ}(L) \}; \\
 F_8(t+1) &= F_7(t) \{ \Delta S(L) + S_0(L) + [\text{ВП}] 8(L-3) \text{МЛ}(L) \}; \\
 F_9(t+1) &= F_8(t) \{ \Delta S(\delta) + S_0(\delta) \}; \\
 F_{10}(t+1) &= F_9(t) \{ \Delta S(L) + S_0(L) + [\text{ВП}] 8(L-3) \text{МЛ}(L) \}; \\
 F_{11}(t+1) &= F_{10}(t) \{ \Delta S(L) + S_0(L) \};
 \end{aligned}$$

Здесь через  $F_i(t)$ ,  $F_i(t+1)$  обозначены функции соответствующих переходов в данный  $t$  и последующий  $t+1$  моменты времени.

Записанные выражения раскрывают структуру БУ, реализующего данный алгоритм. Очевидно, что БУ представляет собой устройство с памятью, имеющее 11 состояний (по числу переходов в алгоритме). В его основу положен двоичный счетчик на четырех триггерах, переключаемый под действием импульсов, соответствующих записанным в логических функциях символам и поступающих с указателей равновесия и уравновешивающих реверсивных счетчиков (см. рис. 1). В блоке управления эти импульсы разделены по двум ( $L$  и  $\text{tg } \delta$ ) входным каналам, которые взаимно блокируются: при уравновешивании по  $L$  исключается возможность переключения БУ от импульсов канала  $\text{tg } \delta$  и наоборот. Благодаря этому обеспечивается четкая реализация алгоритма при наличии взаимосвязи контуров уравновешивания. Для подачи счетных импульсов  $\text{СИ}(L)$ ,  $\text{СИ}(\text{tg } \delta)$  на требуемые декадные реверсивные счетчики используются ключи, открываемые последовательно по мере переключения счетчика БУ.

В заключение рассмотрим некоторые особенности реализации системы автоматического уравновешивания, обеспечивающие устойчивую работу измерителя в следящем режиме. Возможность возникновения автоколебаний, свойственных цифровым следящим приборам с дискретным уравновешиванием [4], возрастает при измерении параметров нелинейных объектов (катушек индуктивностей с ферритовыми сердечниками) и при переменной чувствительности измерительной цепи. Нелинейность объекта может нарушить однозначный выбор предела измерения, когда при переходе с одного предела на другой изменяется прикладываемое к объекту напряжение (ток), а переменная чувствительность, кроме того, может привести к автоколебаниям, исключающим устойчивый отсчет результата измерения.

Неустойчивость на границах пределов за счет нелинейности индуктивности устраняется следующим способом [5]. Введен дополнительный предел, переключение которого осуществляется так, что после перехода на новый предел и изменения напряжения (тока) на объекте это напряжение (ток) сохраняется при обратном переходе на предыдущий предел. Возможность автоколебаний исключается благодаря тому, что грани-

цы пределов могут быть пройдены при одном и том же напряжении на объекте.

Диаграмма изменения напряжений по пределам при таком уравнивании изображается в виде гистерезисных петель, количество которых определяется числом скачков напряжения на границах пределов. При одном скачке, имеющемся в измерителе параметров катушек

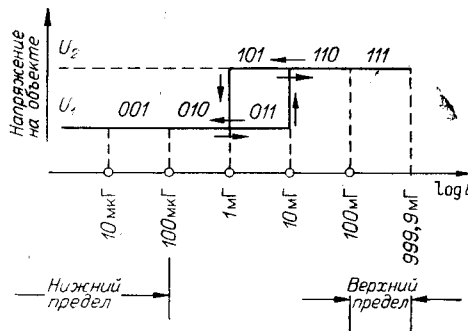


Рис. 3.

индуктивности, эта диаграмма имеет вид, показанный на рис. 3. В прямом направлении пределы переключаются по нижней ветви петли (напряжение на объекте  $U_1$ ), а в обратном — по верхней (напряжение на объекте  $U_2$ ). Измерение на пределе 1—10 мГ, на границах которого возможны скачки, происходит при двух напряжениях на объекте. На рис. 3 указаны также состояния реверсивного счетчика пределов, соответствующие различным пределам измерения. Поскольку на пределе 1—

10 мГ возможна работа при двух напряжениях, то этому пределу выделены два состояния счетчика (011 и 101).

Для обеспечения устойчивого отсчета в следящем режиме при переменной чувствительности измерительной цепи (чувствительность по  $L$  внутри каждого предела изменяется на порядок) в систему уравнивания введены дополнительные реверсивные элементы на три состояния. Два таких элемента по ( $L$  и  $\text{tg } \delta$ ) включаются после регулировки декады  $L-4$  (см. рис. 2) и уравнивают измерительную цепь ступенями по 0,5 единиц (см. рис. 1). Состояния дополнительных реверсивных элементов не индицируются, поэтому, несмотря на их возможные «качания» в окрестностях точки равновесия (вследствие повышения чувствительности измерительной цепи), обеспечивается устойчивый отсчет результата измерения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. Е. Бутт, Т. Н. Мантуш, Б. Н. Панков, В. И. Титков. Широкополосный цифровой измеритель индуктивности и тангенса угла потерь.— Приборы и системы управления, 1973, № 2.
2. Ф. Б. Гриневич, А. В. Чеботарев, А. И. Новик. Цифровой автоматический экстремальный мост переменного тока.— Автометрия, 1965, № 5.
3. Ф. Б. Гриневич, А. И. Новик, Ю. А. Смоляр, А. К. Тибулевиц, Р. Д. Тучин, Н. А. Фещенко. Разработка и внедрение цифровых экстремальных мостов переменного тока.— Приборы и системы управления, 1971, № 8.
4. Ф. Б. Гриневич, К. Б. Карандеев, М. П. Цапенко. Об устойчивости следящих цифровых измерительных приборов, зависящей от их статических характеристик.— Автометрия, 1967, № 1.
5. Ф. Б. Гриневич, А. И. Новик, Т. Н. Мантуш. Способ автоматического уравнивания многопредельных цифровых следящих мостов. Авторское свидетельство № 244499.— ИПОТЗ, 1969, № 18.

Поступила в редакцию 10 января 1972 г.