

**К. М. СОБОЛЕВСКИЙ**  
 (Новосибирск)

### ПРИНЦИПЫ ПРЯМОГО ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

В связи с усложнением условий эксплуатации различных видов современной промышленной продукции, характеризуемой теми или иными электрическими параметрами [1], все большее значение приобретает задача измерения и контроля временных характеристик указанных параметров. Специфическим аспектом данной задачи является измерение (контроль) некоторых функций малых временных изменений электрических параметров за определенный промежуток времени. Эти функции, называемые в дальнейшем коэффициентами неустойчивости электрических параметров исследуемых или контролируемых объектов, характеризуют поведение объектов в заданных условиях. Хорошо известными примерами коэффициентов неустойчивости электрических параметров являются температурные коэффициенты емкости (ТКЕ), индуктивности (ТКИ) или сопротивления (ТКС), определяемые как величины, пропорциональные отношению абсолютного приращения электрического параметра к начальному значению последнего. Построение устройств (в том числе и высокопроизводительных) для прямого измерения (контроля) подобных коэффициентов неустойчивости в настоящее время не представляет принципиальных затруднений [2]. Ниже покажем, что простые и высокопроизводительные устройства для прямого измерения (контроля) коэффициентов неустойчивости электрических параметров нетрудно построить и при других зависимостях этих коэффициентов от абсолютного приращения и начального значения электрического параметра (см., например, [3]).

В общем случае коэффициент неустойчивости  $\alpha$  некоторого исследуемого электрического параметра  $P_x$  может быть выражен как величина, пропорциональная отношению приращения  $\Delta f_1(P_x)$  определенной функции  $f_1(P_x)$  при изменении значения аргумента  $P_x$  от начального  $P_{xн}$  до конечного  $P_{xк}$  значения к значению другой функции  $f_2(P_x)$  при начальном значении параметра:

$$\alpha = k \frac{\Delta f_1(P_x)}{f_2(P_{xн})} = k \frac{f_1(P_{xк}) - f_1(P_{xн})}{f_2(P_{xн})}, \quad (1)$$

где  $k$  — коэффициент пропорциональности. Поскольку величина  $\Delta f_1(P_x)$  обусловлена малым абсолютным изменением  $\Delta P_x$  параметра

$P_x$ :  $\Delta P_x = P_{xк} - P_{xн}$ , — то выражение (1) можно записать в виде

$$\alpha = k \frac{f_1'(P_{xн})}{f_2(P_{xн})} \Delta P_x = kF(P_{xн})\Delta P_x, \quad (2)$$

где  $F(P_{xн})$  — значение функции  $F(P_x) = \frac{f_1'(P_x)}{f_2(P_x)}$  при начальном значении  $P_{xн}$  электрического параметра  $P_x$ .

В частном случае, когда  $F(P_x) = 1$ , из (2) получаем соотношение

$$\alpha = k\Delta P_x, \quad (3)$$

отвечающее оценке неустойчивости электрического параметра непосредственно с помощью величины, пропорциональной его абсолютному приращению  $\Delta P_x$ . Такой коэффициент неустойчивости имеет практический смысл, например, в случае относительных электрических параметров, характеризующих остаточные активные или реактивные параметры пассивных комплексных величин (тангенс угла потерь, постоянная времени).

Если  $F(P_x) = \frac{1}{P_x}$ , то из (2) находим выражение для наиболее широко используемых коэффициентов неустойчивости

$$\alpha = k \frac{\Delta P_x}{P_{xн}} = k\delta P_x, \quad (4)$$

приобретающих в конкретных условиях смысл температурных коэффициентов (например, ТКЕ, ТКИ, ТКС) или иных.

При  $F(P_x) = \frac{1}{P_x^2}$  выражение (2) приобретает вид

$$\alpha = k \frac{\Delta P_x}{P_{xн}^2}; \quad (5)$$

таким коэффициентом температурной неустойчивости характеризуют, например, начальную магнитную проницаемость  $\mu$  ферритовых изделий при  $\mu \gg 100$  (указанный температурный коэффициент называют относительным температурным коэффициентом начальной магнитной проницаемости).

Как известно [2], прямое измерение или контроль коэффициентов неустойчивости, определяемых выражением (4), удобно производить с помощью измерительных цепей, обеспечивающих в момент равновесия (или квазиравновесия) прямо или обратно пропорциональную зависимость между исследуемым параметром  $P_x$  и электрическим параметром  $P_0$  переменного образцового элемента цепи, если предусмотреть логарифмический характер зависимости угла поворота  $\varphi$  движка (ротора) переменного образцового элемента от электрического параметра  $P_0$ :

$$\varphi = m \ln P_0, \quad (6)$$

где  $m = \text{const}$ . Логарифмическая шкала изменения электрического параметра образцового элемента электроизмерительной цепи при пропорциональной зависимости между  $P_x$  и  $P_0$ , позволяющая свести задачу измерения (контроля)  $\alpha$ , выражаемого формулой (4), к нахождению разности углов  $\Delta\varphi = \varphi_k - \varphi_n$ , отвечающих равновесию цепи

при начальном и конечном значениях параметра  $P_x$ , для целей измерения ТКЕ и ТКИ впервые использовалась, по-видимому, в [4, 5]. Применение для указанных целей электроизмерительной цепи, уравновешиваемой по методу развертывающего преобразования [6], в сочетании с устройством дискретной или непрерывной оперативной памяти [2, 7], позволило успешно решить задачу высокопроизводительного измерения и контроля малых относительных временных изменений близких по величине однородных электрических параметров в условиях, когда время выдачи результата измерения (контроля) одного параметра существенно меньше необходимого времени изменения этого параметра [2].

Вполне очевидно, что задача прямого (в частности, высокопроизводительного) измерения или контроля коэффициента  $\alpha$ , выражаемого формулой (3), решается аналогично изложенному выше, с той лишь разницей, что вместо логарифмической шкалы изменения электрического параметра образцового элемента электроизмерительной цепи при прямо пропорциональной зависимости между  $P_x$  и  $P_0$  требуется линейная шкала, что существенно упрощает построение контрольно-измерительных устройств.

Нетрудно убедиться, однако, что аналогичные рассмотренным выше принципы построения приборов и автоматов для измерения или контроля коэффициентов неустойчивости электрических параметров могут быть применены и в случае коэффициентов  $\alpha$ , выражаемых формулами, отличающимися от (3) и (4).

Действительно, предположим, как и в [2], что между  $P_x$  и  $P_0$  в момент равновесия (или квазиравновесия) электроизмерительной цепи имеет место прямо или обратно пропорциональная связь:

$$P_0 = k_1 P_x \text{ или } P_0 = \frac{k_1}{P_x}, \quad (7)$$

где  $k_1 = \text{const}$  (в принципе могут существовать и иные виды связи между  $P_x$  и  $P_0$ ), и предъявим к шкале изменения электрического параметра образцового элемента требование обеспечения прямого отсчета коэффициента неустойчивости

$$\alpha = k_2 \Delta\varphi, \quad (8)$$

где  $k_2 = \text{const}$ . Тогда на основе выражения (2) с учетом (7) и (8), переходя к предельным значениям величин  $\Delta P_x$  и  $\Delta\varphi$ , найдем следующие соотношения, определяющие требуемый характер шкалы образцового элемента:

для прямо пропорциональной связи  $P_x$  и  $P_0$

$$F(P_{xн}) \frac{\partial P_0}{\partial \varphi} = k_3 = \text{const}; \quad (9)$$

для обратно пропорциональной связи  $P_x$  и  $P_0$

$$\frac{1}{P_0^2} F(P_{xн}) \frac{\partial P_0}{\partial \varphi} = -k_3 = \text{const}; \quad (10)$$

здесь  $k_3 = \frac{k_1 k_2}{k}$ .

Следовательно, предусматривая определенную связь между  $P_x$  и  $P_0$  и необходимый при этом характер шкалы образцового элемента электроизмерительной цепи, можно распространить разработанные

ранее [2] принципы построения высокопроизводительных устройств измерения и контроля относительных временных изменений электрических параметров на более широкую область прямого измерения (контроля) любых коэффициентов неустойчивости электрических параметров.

Заметим, что в отдельных случаях построение измерительных устройств на основе рассматриваемых принципов может оказаться достаточно простым и для определенных сложных видов коэффициентов неустойчивости. Так, например, если для коэффициента  $\alpha$ , выражаемого формулой (5), построить измерительную цепь с обратной пропорциональной зависимостью между  $P_x$  и  $P_0$ , то из выражения (10) получим следующую зависимость, которой при этом должна удовлетворять шкала образцового элемента электроизмерительной цепи [3]:

$$\frac{dP_0}{d\varphi} = -k_1^2 k_3 = \text{const.} \quad (11)$$

Как видно из выражения (11), в данном случае шкала образцового элемента может быть линейной, что позволяет реализовать прямое измерение или контроль указанного коэффициента  $\alpha$  на основе многих известных разновидностей электроизмерительных цепей. В частности, такой измерительной цепью может явиться любая уравновешенная, квазиуравновешенная, компенсационно-мостовая и другая цепь для измерения величины  $P_x$  (см., например, [8—12]), если параметр  $P_0$ , уравновешивающий цепь по величине  $P_x$ , при равновесии или квазиравновесии обратно пропорционален последней [3]. На других примерах реализации измерительной цепи для прямого измерения рассматриваемого коэффициента  $\alpha$  останавливаться не будем.

Прямое измерение (или контроль) коэффициентов неустойчивости электрических параметров с использованием электроизмерительных цепей, шкалы образцовых элементов в которых удовлетворяют условиям постоянства некоторого соотношения характеризующих их величин [см., например, формулы (6), (9)—(11)], связано в принципе с некоторой погрешностью метода, которая отсутствует лишь в отдельных частных случаях [прежде всего при измерении или контроле коэффициентов  $\alpha$ , выражаемых формулой (3)]. Указанная методическая погрешность обусловлена тем, что прямой отсчет величины  $\alpha$  производится по ее интегральному значению, которое реально характеризует этот коэффициент и выражается очевидной формулой

$$(\alpha)^P = k \int_{P_{xn}}^{P_{xk}} F(P_x) dP_x; \quad (12)$$

в то же время истинное значение  $(\alpha)^H$  величины  $\alpha$  определяется выражением (2). Формула относительной погрешности метода, получаемая путем подстановки реально используемого [выражение (12)] и истинного [выражение (2)] значений коэффициента  $\alpha$  в обычное выражение для относительной погрешности измерения  $\delta(\alpha) = \frac{(\alpha)^P - (\alpha)^H}{(\alpha)^H}$ ,

имеет в общем случае следующий вид:

$$\delta(\alpha) = \frac{\Delta\alpha}{\alpha} = \frac{\int_{P_{xn}}^{P_{xk}} F(P_x) dP_x}{(P_{xk} - P_{xn})F(P_{xn})} - 1.$$

В случае измерения (контроля) рассматриваемым способом коэффициентов неустойчивости, выражаемых формулой (4), относительная погрешность метода может быть найдена по формуле

$$\delta(\alpha) = \frac{\ln(1 + \delta P_x)}{\delta P_x} - 1$$

и составляет приблизительно  $\delta(\alpha) \cong -1,5\delta P_x$ .

При измерении (контроле) коэффициентов  $\alpha$ , выражаемых формулой (5), относительная погрешность метода определяется из выражения

$$\delta(\alpha) = -\frac{\delta P_x}{1 + \delta P_x},$$

т. е. составляет примерно  $\delta(\alpha) \cong -\delta P_x$ .

Таким образом, поскольку обычно относительные изменения исследуемых электрических параметров в задачах определения коэффициентов неустойчивости весьма невелики (составляют сотые, тысячные и даже меньшие доли единицы), то, как видно из приведенных примеров, погрешностью метода можно пренебречь. Во всех же остальных отношениях [2] рассматриваемые принципы обеспечивают более простые решения задач, чем иные способы, требующие применения в измерительных приборах более точных измерительных цепей и достаточно сложной обработки измерительной информации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. К. Б. Карандеев. Измерительные информационные системы и автоматика.— Вестник АН СССР, 1961, № 10.
2. Е. А. Ковалев, К. М. Соболевский. Об одном классе устройств высокопроизводительного контроля и измерения временных изменений электрических параметров.— Автометрия, 1967, № 1.
3. К. М. Соболевский, Е. А. Ковалев. Способ измерения относительного температурного коэффициента магнитной проницаемости. Авторское свидетельство № 200004.— Бюллетень изобретений, 1967, № 16.
4. В. А. Малев, Д. С. Диканов, П. И. Вайнбойм. Авторские свидетельства № 100733 и 100827.— Бюллетень изобретений, 1955, № 6.
5. П. И. Вайнбойм. Измерение температурных коэффициентов емкости конденсаторов устройством с непосредственным отсчетом.— Измерительная техника, 1957, № 5.
6. К. Б. Карандеев, Ф. Б. Гриневич, В. П. Шульц. О построении автоматических мостовых устройств сортировки слюдяных конденсаторов.— Автоматический контроль и методы электрических измерений (Труды II конференции, 1960 г.). Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1962.
7. Н. Ф. Балинец, И. Ф. Ивлев, Е. А. Ковалев, К. М. Соболевский. Устройство для контроля и сортировки радиодеталей. Авторское свидетельство № 169592.— Бюллетень изобретений, 1965, № 7.
8. К. Б. Карандеев. Специальные методы электрических измерений. М.—Л., Госэнергоиздат, 1963.
9. К. Б. Карандеев, Г. А. Штамберггер. Обобщенная теория мостовых цепей переменного тока. Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1961.
10. Ф. Б. Гриневич. Автоматические мосты переменного тока. Новосибирск, РИО СО АН СССР, 1964.
11. К. М. Соболевский. Электроизмерительные цепи уравнивания и элементы их общей теории.— Автометрия, 1965, № 2.
12. Ф. Б. Гриневич, Е. Е. Добров, К. Б. Карандеев. Автокомпенсационные мостовые цепи.— Автометрия, 1965, № 5.

Поступила в редакцию  
5 июля 1967 г.