

К. Б. КАРАНДЕЕВ, Г. А. ШТАМБЕРГЕР
 (Новосибирск)

ОБ ИЗМЕРЕНИИ КОЭФФИЦИЕНТОВ КОРРЕЛЯЦИИ И КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ФУНКЦИЙ НУЛЕВЫМ МЕТОДОМ

Большинство известных методов измерения коэффициентов корреляции и корреляционных функций базируется, как известно [1, 2], на использовании метода непосредственной оценки. Различные типы аналоговых корреляторов выполняются по одной и той же структурной схеме, содержащей узлы задержки, умножения, интегрирования и измерительный прибор на выходе, по шкале которого отсчитывается измеряемая величина. Различные типы корреляторов отличаются друг от друга главным образом способами построения отдельных узлов. Использование метода непосредственной оценки в аналоговых корреляторах основано необходимостью быстрого действующих измерений. Повышение же точности может быть достигнуто, по-видимому, только применением компенсационного метода. Известно, что методы уравнивания, благодаря гибкости и высоким метрологическим характеристикам, получили широкое распространение при измерении синусоидальных напряжений и сопротивлений синусоидальному току [3—6]. Поэтому естественны попытки поиска путей реализации устройств для измерения и характеристик случайных величин с использованием нулевых методов уравнивания, обеспечивающих более высокую точность измерения, чем метод непосредственной оценки.

Нам известна единственная попытка [7] использования компенсационного метода для определения коэффициентов корреляции и корреляционных функций. В основу рассмотренного в [7] (и описанного в [1]) компенсатора положено непосредственное сравнение функции $u(t)$ и $u(t+\tau)$. Для этой цели оба сигнала включаются, как в обычном поляр-

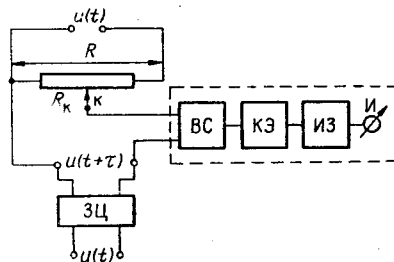


Рис. 1.

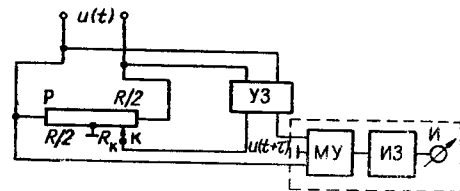


Рис. 2.

ном компенсаторе, не содержащем, однако, фазорегулятора (рис. 1). Вместо фазорегулятора применяется задерживающая цепь ЗЦ. В качестве указателя используется устройство, состоящее из вычитающей схемы ВС, квадратирующего элемента КЭ, интегрирующего звена ИЗ и индикатора И.

Изменением величины сопротивления делителя добиваются минимального показания указателя, при котором определяется значение коэффициента автокорреляции для заданной величины τ_1

$$\rho(\tau_1) = \frac{u(t)u(t+\tau_1)}{u^2(t)} = \frac{R_{K_1}}{R}$$

Однако при этом остается некомпенсированная часть разностного сигнала, которая при минимуме показания указателя будет равна

$$u^2(t)[1-\rho^2(\tau_1)].$$

Как указывается в [1], положительным свойством таких корреляторов является то, что определение значения $\rho(\tau)$ с помощью реохорда практически не зависит от правильной оценки некоррелированной части выходного напряжения указателя $u^2(t)[1-\rho^2(\tau)]$. Достаточно, чтобы указателем был правильно зафиксирован минимум. Требования к указателю, таким образом, существенно облегчаются. Дрейф нулевой точки и старение квадратирующего элемента не оказывают влияния на результат измерения $\rho(\tau)$. Это бесспорно существенные преимущества, позволяющие повысить точность измерения указанных величин.

В то же время трудности, связанные с определением минимума показания указателя, зависимость этого минимума от уровня сравниваемых сигналов и вследствие этого усложнение проблемы автоматизации, по-видимому, и были причиной того, что этот компенсатор не нашел широкого распространения. Однако приведенный пример показывает полезность применения методов уравнивания для измерения корреляционных функций. Нами предпринята попытка поисков путей измерения характеристик случайных процессов методами уравнивания в момент нулевого показания указателя. Эта задача может быть решена, как будет показано ниже, с помощью квазикомпенсационных цепей, обеспечивающих раздельное независимое измерение отдельных характеристик случайных процессов.

Нам кажется уместным привести здесь аналогию между тенденциями развития методов измерения характеристик случайных процессов и историей развития другого класса цепей переменного тока — мостовых, предназначенных для измерения комплексных сопротивлений. Примерно до начала пятидесятых годов для измерения компонент комплексных сопротивлений применялись различные варианты уравновешенных мостов, характеризующихся, как известно, довольно трудоемким процессом измерения. Стремление упростить этот процесс привело к созданию так называемых полууравновешенных мостов [8], позволяющих получить искомый результат в момент минимума показания указателя. Дальнейшие исследования в области мостовых методов измерений привели к созданию класса квазиуравновешенных мостов, позволивших решить проблему измерения искомых величин в момент нулевого показания указателя. Аналогичная картина наблюдалась и в области компенсационного метода для измерения комплексных напряжений (токов).

Сравнивая пути развития различных методов измерений, можно прийти к заключению, что описанная выше компенсационная цепь для измерения коэффициентов корреляции и корреляционных функций пред-

ставляет собой конкретную реализацию класса полууравновешенных компенсаторов. По-видимому, правомочно предположить в качестве дальнейшего шага возможность использования для решения подобных задач квазикомпенсационных цепей, приводимых к скалярным режимам измерения.

Возможность применения квазикомпенсационных цепей, обеспечивающих независимое измерение коэффициентов корреляции и корреляционных функций проиллюстрируем на примере схемы, изображенной на рис. 2 [9]. Цепь состоит из реохорда P с общим сопротивлением R , средняя точка которого заземлена, устройства задержки $УЗ$, нулевого указателя $НУ$, множительного устройства $МУ$, интегрирующего звена $ИЗ$ и индикатора $И$, в качестве которого может служить в частном случае чувствительный микроамперметр магнитоэлектрической системы. Одно из исследуемых напряжений подается непосредственно к зажимам реохорда, второе — включается между подвижным контактом реохорда и указателем через устройство задержки. Как следует из рис. 2, на входы указателя подаются соответственно следующие напряжения:

$$\frac{u(t)}{2}; \quad u(t) \frac{R_k}{R} - u(t + \tau),$$

сам же указатель реагирует на среднее значение произведения входных величин, и его показание может быть представлено в виде

$$\begin{aligned} \alpha &= K \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T \left[u(t) \frac{R_{k_1}}{R} - u(t + \tau_1) \right] \frac{1}{2} u(t) dt = \\ &= K \left[\overline{u^2(t)} \frac{R_{k_1}}{R} - \overline{u(t) u(t + \tau_1)} \right], \end{aligned}$$

где K — коэффициент пропорциональности; R_{k_1} — сопротивление участка реохорда между средней его точкой и подвижным контактом k ; τ_1 — заданное значение времени задержки.

Изменяя положение подвижного контакта реохорда, можно добиться нулевого показания указателя, при котором справедливым является соотношение

$$\frac{\overline{u(t) u(t + \tau_1)}}{\overline{u^2(t)}} = \frac{R_{k_1}}{R}.$$

Таким образом, отдельное значение коэффициента корреляции при заданной величине задержки τ_1 будет определяться по отношению сопротивлений реохорда. Изменяя τ и добиваясь каждый раз регулировкой подвижного контакта нулевого показания указателя, можно получить корреляционную функцию

$$\rho_B(\tau) = \frac{\overline{u(t) u(t + \tau)}}{\overline{u^2(t)}} = \frac{R_k}{R}(\tau).$$

Благодаря использованию в измерительной цепи скалярных режимов измерения [3, 5, 6] процесс измерения коэффициентов корреляции и корреляционных функций столь же прост, как и в случае использования компенсаторов постоянного тока. Процесс измерения может быть легко автоматизирован, для чего перемещение подвижного контакта следует осуществлять с помощью реверсивного двигателя, управляемого напряжением с выхода интегрирующего звена указателя. Время, затрачиваемое

мое на проведение эксперимента, практически может быть не более времени, отводимого на осреднение. Существенной особенностью предлагаемого принципа построения коррелятора является возможность получения результатов как в аналоговой, так и цифровой форме.

Рассмотренные нами соотношения характеризуют вещественный ли [11]. Измерение мнимых коэффициентов корреляции и мнимых корреляционных функций может быть реализовано с помощью такой же схемы (см. рис. 2) при наличии специальных спектральных фазосдвигающих цепей, обеспечивающих поворот каждой из составляющих спектра напряжения $u(t)$ относительно самих себя в заданном диапазоне частот на угол $\pi/2$ без изменения исходных значений амплитуд. В результате этой операции будет получаться напряжение $u^k(t)$, ортогональное напряжению $u(t)$. При нулевых показаниях указателя (для заданных значений τ), достигаемых изменением положений подвижного контакта реохорда, можно определить мнимую корреляционную функцию

$$\rho_m(\tau) = \frac{\overline{u^k(t) u(t + \tau)}}{u^2(t)} = \frac{R_k}{R}(\tau).$$

Рассмотренный пример построения квазикомпенсатора является наглядной иллюстрацией возможности использования нулевых методов уравнивания для измерения характеристик случайных величин. Этим примером не исчерпывается класс подобных цепей, так как заданный скалярный режим измерения может быть реализован с помощью различных структур цепей, в частности весьма перспективных компенсаторов статического типа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ф. Ланге. Корреляционная электроника. Госиздат Судостроительной промышленности, 1963.
2. Б. С. Сеницын. Автоматические корреляторы и их применение. Новосибирск, РИО СО АН СССР, 1964.
3. К. Б. Карандеев, Г. А. Штамбергер. Обобщенная теория мостовых цепей переменного тока. Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1961.
4. Г. А. Штамбергер. О некоторых общих свойствах цепей уравнивания.— Электроизмерительные схемы и устройства.— Труды ИАЭ СО АН СССР, вып. 10. Новосибирск, РИО СО АН СССР, 1965.
5. Г. А. Штамбергер. Измерительные цепи уравнивания переменного тока.— ИВУЗ, Приборостроение, 1964, т. VII, № 4.
6. К. М. Соболевский. Электроизмерительные цепи уравнивания и элементы их общей теории.— Автометрия, 1965, № 2.
7. Р. Феу. Ein einfaches Korrelationsverfahren.— Nachrichtentechnik, 1958, Bd. 8, № 1.
8. К. Б. Карандеев. Мостовые методы измерений. Киев, Гостехиздат УССР, 1953.
9. К. Б. Карандеев, Г. А. Штамбергер. Способ измерения корреляционной функции. Авторское свидетельство № 206191.— ИПОТЗ, 1967, № 24.
10. Г. А. Штамбергер. О характеристиках переменных напряжений, подлежащих измерению.— Автометрия, 1967, № 3.
11. Г. А. Штамбергер. Измерения и геофизика.— Проблемы электрометрии. Новосибирск, «Наука», 1967.

Поступила в редакцию
7 февраля 1967 г.

* В [1] такие функции названы взаимно автокорреляционными и несимметричными автокорреляционными функциями.