

4. Пономарев С. В. и др. Повышение точности метода измерения теплофизических свойств за счет выбора рациональных параметров проведения эксперимента и обработки опытных данных // Вестник ТГТУ. 2009. Т. 15. № 4. С. 718—728.

5. Липаев А. А. Применение метода периодического нагрева в экспериментальной теплофизике // Современные методы и средства исследований теплофизических свойств веществ: Сб. трудов междунар. науч.-техн. конф. СПбГУНИПТ. 2010. С. 182—195.

6. Ивлиев А. Д. Метод температурных волн в теплофизических исследованиях (анализ советского и российского опыта) // Теплофизика высоких температур. 2009. Т. 47. С. 771—792.

7. Ka'zmierzczak-Balata J. Bodzenta. Determination of thermal-diffusivity dependence on temperature of transparent samples by thermal wave method / J. Thermophys. 2010. V. 31. N. 1. P. 180—186.

8. Gonzalez-Mendizabal D. P., Bortot D. P., Lopez de Ramos A. L. A thermal conductivity experimental method based on the Peltier Effect // J. Thermophys. 1998. V. 19. N. 4. P. 1229—1238.

9. Дивина Д. А., Пономарев С. В., Дивин А. Г. Повышение точности определения теплофизических характеристик методом регулярного режима третьего рода // Сб. трудов II междунар. науч.-техн. конф. СПбГУНИПТ, 2012.

10. Angstrom A. J. Neue Methode das Warmeleitungsvermögenger Körperzubestimmen // Anna lender Phys. und Chemie, 1861. V. 114. P. 513—530.

11. Филиппов Л. П. Измерения теплофизических свойств веществ методом периодического нагрева. М.: Энергоатомиздат, 1984.

12. Пат. 2478939 РФ. Способ измерения коэффициента температуропроводности теплоизоляционных материалов методом регулярного режима третьего рода / С. В. Пономарев, Д. А. Дивина, Г. В. Шишкина // Изобретения. Полезные модели. 2013. № 10.

13. Кравчун С. Н., Липаев А. А., Кравчун С. Н. Метод периодического нагрева в экспериментальной теплофизике. Казань: Изд-во Казанского гос. ун-та, 2006.

14. Артюхина Е. Л. Разработка полигармонического метода температурных волн и устройства для контроля температуропроводности твердых изотопных материалов: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. Тамбов, 2013.

15. Артюхина Е. Л. Амплитудный полигармонический метод температурных волн для контроля температуропроводности твердых изотропных материалов // Вестник Тамбов. гос. техн. ун-та, 2013. Т. 19. № 2. С. 278—283.

16. Ивлиев А. Д. Применение метода температурных волн для исследования теплофизических свойств конденсированных веществ // Современные методы и средства исследований теплофизических свойств веществ: Сб. трудов конф. СПбГУНИПТ. 2010. С. 65—75.

Дата принятия 06.08.2014 г.

621.397.13

Оптимальная фильтрация пирометрического сигнала при ограниченной скорости изменения температуры объектов

А. В. КУЗНЕЦОВ

Научно-исследовательский институт промышленного телевидения «РАСТР»,
Великий Новгород, Россия, e-mail: outling@inbox.ru

Предложена статистическая модель пирометрического сигнала от объектов с ограниченной скоростью изменения температуры. Выведены выражения для расчета импульсной характеристики оптимального цифрового нерекурсивного фильтра. Полученные выражения проверены методами программного моделирования, подтверждена эффективность использования оптимальной фильтрации для предложенной модели пирометрического сигнала.

Ключевые слова: пирометр, методы пирометрии, оптимальная фильтрация.

The statistical model of pyrometric signal at object temperature change rate limitation is offered to provide the realization of the optimal filtering methods. The expressions for calculation of the pulse characteristic of the optimal digital nonrecursive filter are received. The results of experimental checking of received expressions by the program modelling methods are presented.

Key words: pyrometer, pyrometry methods, optimal filtering.

Предельно достижимая точность измерений температуры быстродействующими пирометрическими преобразователями с аналоговым каналом связи, в частности, в телевизионном стандарте (далее пирометрами), ограничена шумами видеотракта, состоящего из пирометрического датчика, канала связи и устройства ввода видеосигнала в компью-

тер. При этом фильтрующий алгоритм, минимизирующий погрешность оценки температуры, должен быть оптимизирован с учетом известных статистических свойств сигнала и шума. Однако разнообразие свойств объектов измерений и параметров термических процессов усложняет создание достаточно общей статистической модели сигнала, что зат-

рудняет проектирование универсального пирометра. На практике обычно ограничиваются межкадровым усреднением оценки измеренной температуры в прямоугольном скользящем окне, причем время усреднения (длительность окна) в большинстве случаев выбирают эмпирически. Также, если при низкоскоростных процессах, например нагреве массивных металлических слитков, увеличение длительности окна с целью повышения отношения сигнал—шум не вызывает затруднений, то при анализе быстротекущих процессов эмпирический подход может существенно исказить результаты.

В настоящей работе сделана попытка построить статистическую модель пирометрического сигнала, характерного для технологических процессов с априорно известными минимально и максимально возможными значениями температуры объекта $T_{\min}$, $T_{\max}$, а также модуля скорости ее изменения $v_{\min}$, $v_{\max}$ при условии $v_{\max} \ll (T_{\max} - T_{\min})/t_d$, где t_d — период дискретизации. Подобные условия температурного контроля в промышленности встречаются чрезвычайно широко — при термообработке изделий и заготовок в металлургии [1, 2], восстановительной термообработке металлоконструкций [3], закалке, отжиге стекла [4] и во многих других областях.

Для таких процессов распределение плотности вероятности скорости изменения температуры объекта можно представить в виде

$$\rho_v(v) = \begin{cases} [2(v_{\max} - v_{\min})]^{-1} & \text{при } v_{\min} \leq |v| \leq v_{\max}; \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (1)$$

В общем случае при возможных скачкообразных изменениях режима нагрева или структуры объекта (например, отслоение окалины) процесс $v(t)$ можно полагать близким к дельта-коррелированному белому шуму. Тогда процесс изменения температуры объекта $T_0(t)$, описываемый стохастическим уравнением

$$dT_0(t)/dt = v(t), \quad (2)$$

должен быть отнесен к нестационарным процессам с независимыми приращениями. Дисперсия таких процессов — монотонно возрастающая функция времени [5, 6], но так как

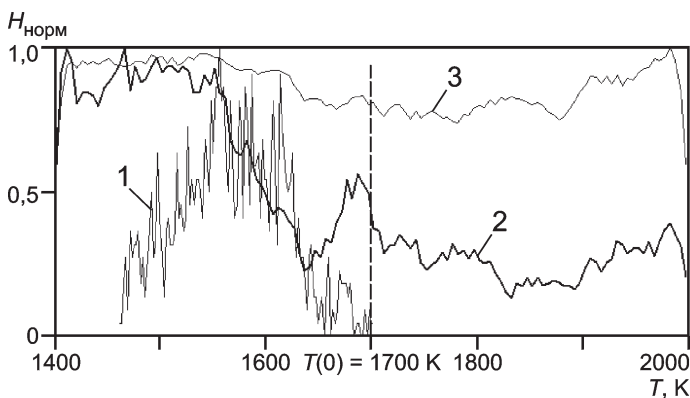


Рис. 1. Нормированные гистограммы распределения значений реализации процесса $T(t)$ (результат моделирования) для значений $T_{\min} = 1400$ К, $T_{\max} = 2000$ К, $v_{\min} = 0$, $v_{\max} = 10$ К/отсчет при ограничении периода наблюдения длительностью отсчетов 1024, 32768, 1024², соответственно, кривые 1—3

в действительности значения температуры всегда ограничены диапазоном $(T_{\min}; T_{\max})$, дисперсия процесса $T_0(t)$ должна быть конечной величиной, что можно учесть методом отражающих границ [5]. Согласно этому методу, если некоторая реализация процесса $T_0(t)$ пересекает границу $T = T_{\max}$ при $t = \tau$, то она заменяется другой реализацией $T_1(t)$, совпадающей с $T_0(t)$ в интервале $(0; \tau)$, т. е. результирующий процесс $T(t)$ можно представить как

$$T(t) = \begin{cases} T_0(t) & \text{при } T_0(t) \leq T_{\max}; \\ T_1(t) & \text{при } T_0(t) > T_{\max}. \end{cases}$$

Плотность вероятности примет вид [5]:

$$\rho_T(T, t) = \rho_{T_0}(T, t) + \rho_{T_0}(2T_{\max} - T, t), \quad 0 < T \leq T_{\max}.$$

При введении второй отражающей границы при $T = T_{\min}$ и возникающих многократных отражениях от обеих границ, а также учитывая монотонно растущую дисперсию процесса $T_0(t)$, можно ожидать, что, начиная с некоторого момента времени, распределение плотности вероятности значений температуры будет достаточно близко к равномерному:

$$\rho_T(T) = \begin{cases} 0 & \text{при } T < T_{\min}, T_{\max} < T; \\ (T_{\max} - T_{\min})^{-1} & \text{при } T_{\min} \leq T \leq T_{\max}, \end{cases} \quad (3)$$

с математическим ожиданием

$$M_T = (T_{\min} + T_{\max})/2 \quad (4)$$

независимо от начального значения процесса $T(0)$. Это согласуется с представлением, что для универсального пирометра, не ориентированного на конкретную задачу, значения температуры объекта следует полагать равновероятными в пределах границ диапазона измерений.

В качестве иллюстрации на рис. 1 приведены нормированные гистограммы распределения температуры одной реализации случайного процесса длительностью 1024² отсчетов, рассчитанной при ограничении периода наблюдения длительностью 1024, 32768, 1024² отсчетов. Случайный процесс моделировали средствами вычислительного пакета Mathcad в соответствии с (1), (2) и методом отражающих границ для значений $T_{\min} = 1400$ К, $T_{\max} = 2000$ К, $T(0) = 1700$ К, $v_{\min} = 0$, $v_{\max} = 10$ К/отсчет.

Очевидно, что минимальная длительность наблюдения, при которой значения процесса $T(t)$ можно считать равномерно распределенными в интервале $(T_{\min}; T_{\max})$, зависит от диапазона возможных значений модуля скорости $(v_{\min}; v_{\max})$ и уменьшается при его расширении. Принятая модель, обеспечивающая ограниченную дисперсию и постоянное значение математического ожидания (3), (4), допускает стационарность и эргодичность процесса $T(t)$. Такое допущение довольно грубое, однако оно позволяет определить импульсную характеристику фильтра, минимизирующего дисперсию погрешности воспроизведения пирометрического сигнала, методами оптимальной линейной фильтрации при аддитивном нормальном белом шуме в видеотракте пирометра [7].

Поскольку у белого шума дисперсия мгновенных значений σ_N^2 равна его спектральной плотности мощности S_N [7], то последнюю можно определить из известного максималь-

ного отношения сигнал—шум SNR на выходе фотоприемника. Для максимального размаха сигнала от «черного» до «белого» уровня $U_6 = 1$:

$$S_N = \sigma_N^2 = \text{SNR}^{-2}. \quad (5)$$

Положим спектральную излучательную способность объекта на эффективной длине волны $\lambda_{\text{эф}}$ [8] постоянной в пределах диапазона $(T_{\min}; T_{\max})$, а зависимость размаха выходного сигнала фотоприемника от спектральной энергетической яркости объекта — линейной (ПЗС-матрица). Тогда при $U_6 = 1$ и согласовании диапазона энергетических яркостей объекта с динамическим диапазоном фотоприемника, зависимость размаха пирометрического сигнала от температуры объекта T на основании приближения Вина примет вид [8]:

$$u(T) = \exp\left[c_2 \left(T_{\max}^{-1} - T^{-1}\right) / \lambda_{\text{эф}}\right], \quad (6)$$

где $c_2 = 1,43879 \cdot 10^{-2}$ м·К — вторая постоянная излучения закона Вина.

Используя (2), (6), определим скорость изменения пирометрического сигнала:

$$w(t, T) = du(t)/dt = du(T(t))/dt = f(T) v(t),$$

$$\text{где } f(T) = c_2 \left(\lambda_{\text{эф}} T^2\right)^{-1} \exp\left[c_2 \left(T_{\max}^{-1} - T^{-1}\right) / \lambda_{\text{эф}}\right].$$

Тогда распределение плотности вероятности процесса $w(t)$:

$$p_w(w, T) = \begin{cases} [2f(T)(v_{\max} - v_{\min})]^{-1} & \text{при } f(T)v_{\min} \leq |w| \leq f(T)v_{\max}; \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (7)$$

Из допущения о стационарности процесса $T(t)$ и соответственно пирометрического сигнала $u(t)$ следует, что процесс $w(t)$ должен быть центрированным. Дисперсия частного распределения процесса $w(t)$:

$$D_w(T) = 2 \int_{f(T)v_{\min}}^{f(T)v_{\max}} \frac{w^2}{2f(T)(v_{\max} - v_{\min})} dw = \frac{1}{3} \frac{v_{\max}^3 - v_{\min}^3}{v_{\max} - v_{\min}} f^2(T).$$

С учетом (3) получим дисперсию совместного распределения значений процесса $w(t)$ по обеим координатам:

$$D_w = \frac{1}{3(T_{\max} - T_{\min})} \frac{v_{\max}^3 - v_{\min}^3}{v_{\max} - v_{\min}} \int_{T_{\min}}^{T_{\max}} f^2(T) dT. \quad (8)$$

Процесс $w(t)$, полученный путем преобразования (7) из широкополосного процесса $v(t)$, можно полагать также близким к дельта-коррелированному, спектральная плотность мощности которого постоянна и равна его дисперсии:

$$S_w(\omega) = S_w = D_w,$$

где $\omega = 2\pi f$ — циклическая частота.

Спектральную плотность мощности флуктуационной составляющей пирометрического сигнала найдем как результат прохождения процесса $w(t)$ через идеальный интегратор:

$$S_U(\omega) = S_w / \omega^2 = D_w / \omega^2. \quad (9)$$

Из выражений (5), (8), (9) определим коэффициент передачи оптимального фильтра, минимизирующего дисперсию погрешности воспроизведения процесса $u(t)$ [7]:

$$K(j\omega) = \frac{S_U(\omega)}{S_U(\omega) + S_N} e^{-j\omega t_0} = \left(1 + \frac{1}{\text{SNR}^2} \frac{\omega^2}{D_w}\right)^{-1} e^{-j\omega t_0}, \quad (10)$$

где t_0 — групповая задержка фильтра.

Вследствие дискретизации с периодом t_d сумма пирометрического сигнала и шума преобразуется в аналоговый случайный процесс с дискретным временем [10]. Соответствующий (10) физически реализуемый дискретный нерекурсивный оптимальный фильтр имеет частотную характеристику [11]:

$$H(j\Omega) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \left(1 + \frac{1}{\text{SNR}^2 D_w} (\Omega + 2\pi k)^2\right)^{-1} e^{-j\Omega \frac{N-1}{2}}, \quad (11)$$

где $\Omega = \omega t_d$ — нормированная частота; $(N-1)/2$ — групповая задержка фильтра.

Существуют различные методы расчета коэффициентов импульсной характеристики фильтра по заданной комплексной частотной характеристике, например метод частотной выборки, в основе которого лежит обратное дискретное преобразование Фурье от ряда дискретных значений функции $H(j\Omega)$ [10]. Однако использование современных вычислительных программных пакетов позволяет определять импульсную характеристику фильтра непосредственно вычислением обратного преобразования Фурье от частотной характеристики (11), полученной на интервале $(-\pi; \pi)$:

$$h(n) = \int_{-\pi}^{\pi} \left(1 + \frac{1}{\text{SNR}^2 D_w} \Omega^2\right)^{-1} e^{-j\Omega \frac{N-1}{2}} e^{j\Omega n} d\Omega, \quad (12)$$

где $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$.

Для проверки полученных соотношений выполняли программное моделирование процесса фильтрации в среде пакета Mathcad. Исходный пирометрический сигнал U_T в соответствии с (1)–(3), (6) и шум U_N (5) формировали в виде последовательностей длиной $K = 1024^2$ элементов. На вход фильтра порядка $N = 31$, синтезированного по (8), (12), подавали сумму последовательностей

$$X_i = U_{T_i} + U_{N_i}, \quad i = 0, \dots, K-1.$$

В результате вычисляли последовательность Y на выходе фильтра из $K-(N-1)$ элементов, устраняя при этом групповую задержку:

$$Y_q = \left[\sum_{n=0}^{N-1} h(n) \right]^{-1} \sum_{n=0}^{N-1} \left[h(n) X_{q - \frac{N-1}{2} + n} \right], \quad q = \frac{N-1}{2}, \dots, K-1 - \frac{N-1}{2}. \quad (13)$$

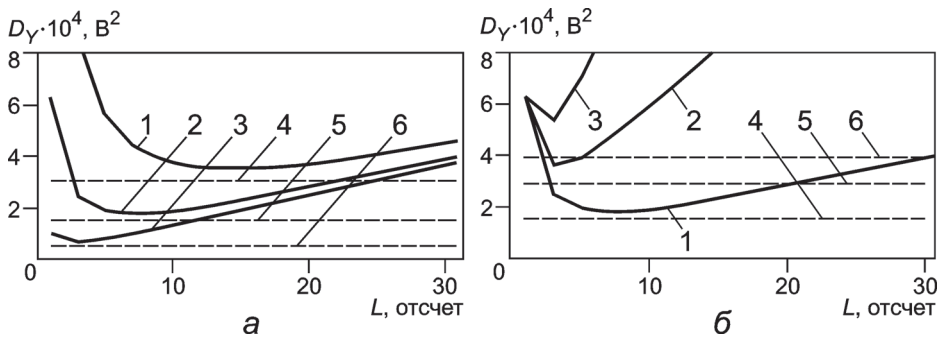


Рис. 2. Дисперсии D_Y погрешностей фильтрации пирометрического сигнала при усреднении в зависимости от размера окна:

а — при $v_{\min} = 0,1$ К/отсчет, $v_{\max} = 10$ К/отсчет, отношении сигнал—шум 20, 40, 100 (кривые 1—3), а также дисперсии погрешности оптимальной фильтрации для $N = 31$ при отношении сигнал—шум 20, 40, 100 (кривые 4—6); б — при $\text{SNR} = 40$, $v_{\min} = 0,1$ К/отсчет, $v_{\max} = 10, 20, 30$ К/отсчет (кривые 1—3), для $N = 31$ и $v_{\max} = 10, 20, 30$ К/отсчет (кривые 4—6)

Дисперсия погрешности фильтрации составила

$$D_Y = \frac{1}{[K - (N - 1)]} \sum_q [Y_q - X_q]^2. \quad (14)$$

Для оценки эффективности фильтрации полученные результаты сравнивали с теоретическим значением минимальной дисперсии погрешности воспроизведения сигнала при оптимальной фильтрации, определяемым из [7], которое с учетом (5), (9) преобразовывали к виду:

$$\varepsilon^2 = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \frac{S_U(\omega) S_N(\omega)}{S_U(\omega) + S_N(\omega)} d\omega = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \frac{\omega^{-2} D_w \text{SNR}^{-2}}{\omega^{-2} D_w + \text{SNR}^{-2}} d\omega. \quad (15)$$

Аналогично (14) рассчитывали дисперсию погрешности при усреднении последовательности X в прямоугольном скользящем окне $h(n) = \text{const} = 1$ для различных значений длительности окна L . В этом случае выходная последовательность P формировалась в соответствии с выражением

$$P_q(L) = \frac{1}{L} \sum_{n=0}^{L-1} \left[X_{q - \frac{L-1}{2} + n} \right].$$

Результаты расчетов для пирометрического сигнала при $T_{\min} = 1400$ К и $T_{\max} = 2000$ К, различных значениях максимальной и минимальной скорости изменения температуры объекта и разных отношениях сигнал—шум представлены на рис. 2, а, б.

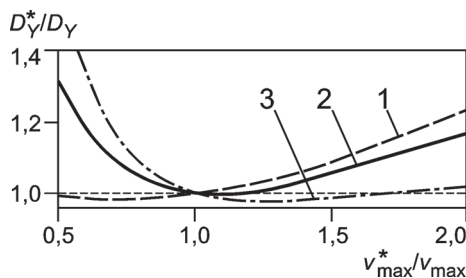


Рис. 3. Отношение дисперсий погрешности фильтрации для $v_{\min} = 0,1$ К/отсчет и $\text{SNR} = 100$ при изменении принятого значения $v_{\max}^*$ относительно истинного $v_{\max} = 1, 10, 30$ К/отсчет (кривые 1—3)

Для пирометрического сигнала при $v_{\min} = 0,1$ К/отсчет, $v_{\max} = 10$ К/отсчет значения дисперсии погрешности оптимальной фильтрации, рассчитанные по (15), составили $3,247 \cdot 10^{-4}$, $1,624 \cdot 10^{-4}$, $6,495 \cdot 10^{-5}$ для отношения сигнал—шум $\text{SNR} = 20; 40; 100$, соответственно. Эффективность проведенной фильтрации (см. прямые 4—6 на рис. 2) достаточно близка к теоретической, что позволяет сделать вывод о справедливости принятых допущений и применимости методов оптимальной фильтрации в рамках решаемой задачи. Как и следовало ожидать, усреднение в прямоугольном скользящем окне даже при его оптимальном размере оказывается менее эффективным (см. кривые 1—3 на рис. 2, а).

Анализируя рис. 2, б, отметим, что с увеличением $v_{\max}$ выигрыш в эффективности оптимальной фильтрации перед усреднением возрастает. Оптимальный размер окна усреднения уменьшается, а снижение эффективности усреднения при отклонении размера окна от оптимального происходит более резко, что, по-видимому, объясняется сближением статистических характеристик сигнала и помехи.

Таким образом, эмпирический выбор размера окна усреднения, широко применяемый на практике, иногда может приводить к существенному увеличению погрешности воспроизведения пирометрического сигнала по сравнению с оптимальной фильтрацией, проводимой в соответствии с предложенными соотношениями. На практике выбор порядка N фильтра (12), очевидно, должен определяться как возможностью ограничения его импульсной характеристики членами, превышающими некоторый заданный порог, так и максимально допустимой групповой задержкой (13).

Для вычисления чувствительности алгоритма фильтрации к неточности задания априорной информации были проведены численные расчеты относительного изменения дисперсии погрешности фильтрации D_Y^*/D_Y при изменении принятых при синтезе фильтра значений $v_{\max}^*$, $v_{\min}^*$ относительно истинных $v_{\max}$, $v_{\min}$ для $T_{\min} = 1400$ К, $T_{\max} = 2000$ К и типичного значения отношения сигнал—шум 40дБ ($\text{SNR} = 100$). Результаты расчетов для изменения $v_{\max}^*$ при фиксированной скорости $v_{\min} = 0,1$ К/отсчет изображены на рис. 3.

Смещение абсцисс минимумов отношения D_Y^*/D_Y от ожидаемого значения $v_{\max}^*/v_{\min}^* = 1$, по-видимому, объясняется неидеальностью статистических свойств тестового сигнала. Тем не менее, можно отметить невысокую чувствительность алгоритма фильтрации к неточности задания $v_{\max}^*$.

Аналогичные результаты были получены при расчетах для случая изменения $v_{\min}^*$ относительно истинных значений $v_{\min} = 0,01; 0,1$ и $0,3$ К/отсчет при фиксированной скорости $v_{\max} = 10$ К/отсчет. При этом изменения D_Y^*/D_Y оказались на порядок меньше, чем при изменении $v_{\max}^*$ относительно истинных значений $v_{\max} = 1; 10$ и 30 К/отсчет (см. рис. 3).

Выводы. Предложена статистическая модель пирометрического сигнала от объектов с ограниченной скоростью изменения температуры для широкого круга задач пирометрического контроля, реализующая методы оптимальной фильтрации для снижения погрешности измерений. Получены выражения для расчета коэффициентов импульсной характеристики оптимального цифрового нерекурсивного фильтра, минимизирующего дисперсию погрешности воспроизведения пирометрического сигнала при аддитивном воздействии нормального белого шума.

Л и т е р а т у р а

1. **Диомидов Б. Б., Литовченко Н. В.** Прокатное производство. М.: Металлургия, 1979.
2. **Ильин С. И., Корягин Ю. Д.** Технология термической обработки сталей. Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2009.
3. **СО 153-34.17.459—2003.** Инструкция по восстановительной термической обработке элементов теплоэнергетического оборудования.

4. **Мазурин О. В., Белоусов Ю. Л.** Отжиг и закалка стекла. М.: Изд. МИСИ и БТИСМ, 1984.
5. **Тихонов В. И., Миронов М. А.** Марковские процессы. М.: Сов. радио, 1977.
6. **Левин Б. Р.** Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Радио и связь, 1989.
7. **Зюко А. Г.** Помехоустойчивость и эффективность систем связи. М.: Связь, 1972.
8. **Свет Д. Я.** Оптические методы измерения истинных температур. М.: Наука, 1982.
9. **Румшиский Л. С.** Элементы теории вероятностей. М.: Наука, 1970.
10. **Рабинер Л. Р., Шафер Р. В.** Цифровая обработка речевых сигналов / Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1981.
11. **Бушнев Д. В., Романов А. В.** Теоретические основы цифровой обработки сигналов. Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. техн. ун-та, 2005.

Дата принятия 25.09.2014 г.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

621.317.7

Подход к построению универсальных преобразователей параметров многоэлементных двухполюсников

Д. А. БОБЫЛЕВ, Л. П. БОРОВСКИХ

Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, Москва, Россия,
e-mail: da-bobylev@mail.ru; borovski@ipu.ru

Рассмотрены современные принципы построения и предложена оптимальная структура преобразователей параметров многоэлементных двухполюсников. Дано сравнение импульсных и частотных методов измерения указанных параметров, описан универсальный алгоритм их вычисления по данным измерений.

Ключевые слова: многоэлементный двухполюсник, частотные и импульсные методы, фазочувствительное преобразование.

The modern construction principles for converters of multielement one-ports parameters are considered and the optimal conversion structure has been suggested. The pulse and frequency measuring methods are compared. The universal algorithm for computation of parameters by measurements data is described.

Key words: multielement one-port, frequency and pulse methods, phase-sensitive transformation.

Круг научно-технических задач, требующих измерений параметров многоэлементных двухполюсников (ПМД), довольно широк. Примерами могут служить преобразование параметров датчиков, контроль параметров элементов и устройств в процессе их производства или функционирования, исследование физико-химических процессов и др. [1].

Еще до начала компьютеризации измерительной техники были разработаны различные методы и средства преобразования ПМД, предложены соответствующие классификации. Большинство методов носит узкоспециализированный характер и нацелено на решение конкретных научно-

технических задач. Они или предназначены для измерений ПМД одной или нескольких конкретных схем замещения, или диапазоны измеряемых параметров сильно ограничивают их возможности. На каждом этапе компьютеризации ее возможности, первоначально ограниченные, адаптировались к уже сложившейся системе методов и средств измерений (СИ) параметров комплексных величин без кардинального изменения основных аспектов данной проблемы.

В настоящее время широкое применение современных средств вычислительной техники и развитие элементной базы позволяют создать универсальные СИ ПМД, основан-