

13. Пригожин, И. Современная термодинамика. От тепловых двигателей оддиссипативных структур / И. Пригожин, Д. Кондепуди; пер. с англ. Ю. А. Данилова и В. В. Белого, под ред. А. П. Агеева. – М.: Мир, 2002. – 461 с.
14. Сорока, Б. С. Энергоэкологический анализ эффективности использования топлива и энергии с применением математического и компьютерного моделирования. 1. Методика расчета энергетической эффективности и ее теплофизическое обоснование / Б. С. Сорока, В. С. Кудрявцев, Р. С. Карабчиевская // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2010. – № 1. – С. 11–21.
15. Soroka, B. Combined power and environmental optimization of the fuel type by reheating and thermal treatment processes / B. Soroka, P. Sandor // Proceedings of the 21<sup>st</sup> World Gas Conference. – Nice, France, 6–9 June 2000. – 15 p.
16. Soroka, B. Simplified design method of efficiency's and NO<sub>x</sub> yield's evaluation at the industrial furnaces under replacement of type of combustible gas / B. Soroka, P. Sandor // Proceedings of the VII International Scientific Conference on Combustions and Heat Technics: University of Miskolc, 1998, May 27–29. – Miskolc, 1998. – P. 103–113.
17. Продукты сгорания природного газа при высоких температурах / И. Н. Карп [и др.]. – Киев: Техника, 1967. – 382 с.
18. Білодід, В. Д. Енергетичний потенціал горючих вторинних енергоресурсів і водню, а також витрати на їх підготовку до прямого спалювання / В. Д. Білодід, Г. О. Куц // Проблеми загальної енергетики. – 2011. – Вип. 2 (25). – С. 32–39.
19. Lalovic, M. Flame temperature as a function of the combustion conditions of gaseous fuels / M. Lalovic, Z. Radovic, N. Jaukovic // MTAEC9. – 2006. – No40(3). – P. 89–82.
20. Bionas Gasification with Preheated Air: Energy and Exergy Analyses / R. M. Karamarković [et al.] // Thermal Science. – 2012. – Vol. 16, issue 2. – P. 535–550.
21. Performance Analysis of Biomass Gasification and Power System with High Temperature Steam / K. Umeki [et al.] // Proceedings of 8<sup>th</sup> International Symposium on High Temperature Air Combustion and Gasification, July 5–7, 2010, Poznan, Poland. – P. 415–423.
22. Szewczyk, D. High Temperature Burners (HTB) as the result of the connection of HiTAC combustion technology with central recuperative systems / D. Szewczyk, J. Engdahl, A. Stachowski // Proceedings of 8<sup>th</sup> International Symposium on High Temperature Air Combustion and Gasification, July 5–7, 2010, Poznan, Poland. – P. 337–345.
23. Seong, B. G. High-temperature corrosion of recuperators used in steel mills / B. G. Seong, S. Y. Hwang, K. Y. Kim // Surface and Coatings Technology. – 2000. – Vol. 126, issues 2–3. – P. 256–265.

Поступила 25.10.2012

УДК 539.1.074

## **ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОНТРОЛЛЕР ДЛЯ ОБРАБОТКИ ПЕРВИЧНОЙ ИНФОРМАЦИИ**

**Инж. СКРЯБИНА Е. В., докт. техн. наук САПОЖНИКОВ Н. Е.**

*Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности*

Весьма актуальной на сегодняшний день в ядерной энергетике является задача продления срока эксплуатации технических средств. Как правило, для тех средств, срок эксплуатации которых продлен, проводится мониторинг основных характеристик, что приводит к лавинообразному росту информации об этих характеристиках. Таким образом, необходимо решить задачу избыточности информации, передаваемой от технических средств,

прошедших продление срока эксплуатации. Возможным путем решения этой задачи является применение измерительных контроллеров, территориально совмещенных с первичными преобразователями информации.

Существующие контроллеры, использующие программно-алгоритмические методы обработки цифровых позиционных кодов, мало пригодны для решения этой задачи по причинам малой стойкости к радиационному воздействию, невозможности программным путем решить в реальном масштабе времени задачи, в алгоритме которых множество групповых операций умножения и сложения, что характерно для статистического анализа.

Рассмотрение методов и структур существующих измерительных устройств с одновременной возможностью первичной обработки больших информационных массивов привели к выводу, что поставленная задача может быть решена путем применения комбинированного измерительного контроллера на основе цифровой и вероятностной форм представления информации. Схема такого измерительного контроллера приведена на рис. 1.



Рис. 1. Схема измерительного контроллера

Блок преобразователей формы представления входного сигнала состоит из четырех видов преобразователей: амплитуда – вероятность, фаза – вероятность, частота – вероятность, двоичное число – вероятность, на каждый из которых получен патент Украины [1–3]. Их задача – преобразовать входной сигнал датчиков от указанной формы представления в вероятностную, что выполняется в соответствии с выражением [4]:

$$y_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{при } x_i > R(t_{ij}); \\ 0 & \text{при } x_i \leq R(t_{ij}), \end{cases} \quad (1)$$

где  $x_i$  –  $i$ -е значение параметра преобразуемого сигнала  $X(t)$ ;  $R(t_{ij})$  –  $j$ -е значение параметра вспомогательного случайного сигнала  $R(t)$ , изменяющегося в интервале изменения  $X(t)$ ;  $i = 1, N$  – число циклов преобразования сигнала  $X(t)$ ;  $j = 1, K$  – количество статистических испытаний каждого значения  $x_i$  внутри временного интервала  $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$ ;  $y_{ij}$  – значение вероятностного отображения параметра сигнала  $x_i$  из ряда  $Y_i(t) = \{y_{i1}; y_{i2}; \dots; y_{ij}; \dots; y_{iK}\}$ .

Таким образом, каждое входное значение  $x_i$  заменяется соответствующим ему вероятностным отображением  $Y_i(t)$ , вероятность появления «1» в котором

$$P(y_{ij} = 1) = P[R(t) < (x_i = r)] = \sum_{q=1}^r y_{ijq} P_q = M[Y_i(t)] \quad (2)$$

есть математическое ожидание от отображения и равняется значению интегрального закона распределения вспомогательного сигнала  $R(t)$  при уровне сравнения  $x_i$ . Если  $R(t)$  подчиняется равномерному закону, то

$$P(y_{ij} = 1) = M[Y_i(t)] = x_i. \quad (3)$$

То есть возможно обратное преобразование  $x_i$  из вероятностного отображения.

Замечательным свойством вероятностного отображения является то, что каждое его значение не зависит от предыдущего и последующего, а следовательно, для выполнения операции умножения над двумя вероятностными отображениями необходим конъюнктор на два входа, что более чем в 800 раз меньше аппаратного объема матричного умножителя для перемножения двух 16-разрядных двоичных чисел. Для выполнения сложения необходим всего лишь двоичный счетчик и т. д.

Отсюда следует, что вероятностный процессор, реализованный на ПЛИС фирмы Altera, – наименее восприимчивый к радиационному воздействию, будет иметь аппаратный объем более чем в 100 раз меньше, чем аналогичный цифровой, что и позволяет территориально совместить измерительный вероятностный контроллер с первичными измерительными преобразователями.

К сожалению, вероятностное преобразование имеет и свои минусы: более низкий частотный диапазон обрабатываемых сигналов при работе в реальном масштабе времени, обратную зависимость точности от быстродействия.

Были проанализированы количественные характеристики этой зависимости, для чего определены дисперсия, среднеквадратическая [5] и абсолютная погрешности вероятностного преобразования:

$$D(x_i^*) = \frac{1}{K^2} \sum_{j=1}^K \sum_{l=1}^2 [y_{ijl} - M(y_{ijl})]^2 P_l = \frac{1}{K} [F_{x_i}(R) - F_{x_i}^2(R)]; \quad (4)$$

$$\sigma(x_i^*) = \frac{1}{\sqrt{K}} \sqrt{F_{x_i}(R) - F_{x_i}^2(R)}; \quad (5)$$

$$\Delta_{\text{ВП}} = \sqrt{2} \Phi^{-1}(P) \sigma(x_i^*) = \frac{\sqrt{2} \Phi^{-1}(P)}{\sqrt{K}} \sqrt{F_{x_i}(R) - F_{x_i}^2(R)}. \quad (6)$$

Выражение (6) позволяет решить в общем виде задачу определения ошибки, возникающей при вероятностном преобразовании некоторой произвольной величины, и показывает, что при увеличении количества статистических испытаний  $K$  погрешность уменьшается. Для выявления количественных закономерностей рассмотрим случай, когда вспомогательная случайная функция распределена нормально с интегральным законом

$$F(R) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-0,5\xi^2} d\xi. \quad (7)$$

С использованием функции Лапласа выражение (7) примет вид

$$F(R) = 0,5 \left[ 1 + \Phi \left( \frac{r - m_r}{\sigma_r} \right) \right],$$

где  $m_r$  и  $\sigma_r$  – математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение вспомогательной случайной функции  $R(t)$ . Подставляя выражение для  $F(R)$  в формулу для приведенной погрешности, имеем

$$\gamma_{\text{ВП}} = \frac{\sqrt{2}\Phi^{-1}(P)100\%}{\sqrt{K}} \sqrt{\left\{ \frac{1}{2} \left[ 1 + \Phi \left( \frac{x_i - m_r}{\sigma_r} \right) \right] - \left\{ \frac{1}{2} \left[ 1 + \Phi \left( \frac{x_i - m_r}{\sigma_r} \right) \right] \right\}^2 \right\}}. \quad (8)$$

Анализ (8) показывает, что погрешность вероятностного преобразования в значительной степени зависит от количества статистических испытаний и при прочих равных условиях является максимальной, когда значение преобразуемой нормированной величины  $x_i$  лежит в середине динамического диапазона (при  $x_i = 0,5$ ). Однако и в этом, наихудшем с точки зрения точности измерения, случае при  $K = 144\gamma_{\text{ВП}} \leq 8\%$  от величины единичного динамического диапазона.

Особый интерес представляет случай, когда вспомогательный случайный сигнал  $R(t)$  подчиняется равномерному закону распределения. Для него выражение для абсолютной погрешности переписывается в виде

$$\Delta_{\text{ВП}} = \frac{\sqrt{2}\Phi^{-1}(P)}{\sqrt{K}} \sqrt{x_i(1-x_i)}. \quad (9)$$

Оценкой сверху для последнего выражения при  $x_i = 0,5$  будет

$$\Delta_{\text{ВП}_{\text{max}}} \leq 0,7\Phi^{-1}(P)/\sqrt{K}. \quad (10)$$

При доверительной вероятности  $P=0,9973$  имеем  $0,7\Phi^{-1}(P) = 1,645$ :

$$\Delta_{\text{ВП}_{\text{max}}} \leq \frac{1,645}{\sqrt{K}} \text{ и } \gamma_{\text{ВП}_{\text{max}}} \leq 164,5\sqrt{K}\%. \quad (11)$$

Сравнивая погрешность представления символов в коде ASC II (КОИ-7) и последнее выражение, нетрудно подсчитать, что для достижения соизмеримой погрешности в 0,39% в последнем случае величину  $K$  следует выбирать равной  $K = 177913$ , что значительно сужает область применения информации, представленной в дискретной вероятностной форме при ее обработке в реальном масштабе времени.

Наиболее эффективно использование вероятностной формы представления данных при выполнении множества групповых операций умножения и сложения, а именно при выполнении корреляционного, дисперсионного и спектрального видов анализа.

Погрешность вероятностного умножения рассчитаем, используя метод последовательного определения дисперсии и среднеквадратического отклонения оценки:

$$D\left(\frac{1}{K}\sum_{j=1}^K\prod_{q=1}^Q y_{qj}\right) = \frac{1}{K}\sum_{j=1}^K D\left(\prod_{q=1}^Q y_{qj}\right) =$$

$$= \frac{1}{K}\sum_{l=1}^2 \left[ \prod_{q=1}^Q y_{qil} - M\left(\prod_{q=1}^Q y_{qil}\right) \right]^2 P_l = \frac{1}{K}\prod_{q=1}^Q F_{x_q}(R) \left[ 1 - \prod_{q=1}^Q F_{x_q}(R) \right], \quad (12)$$

и выражение для абсолютной погрешности умножения вероятностно преобразованных сигналов примет вид [6]

$$\Delta_{\text{ВУ}} = \frac{1,41\Phi^{-1}(P)}{\sqrt{K}} \sqrt{\prod_{q=1}^Q F_{x_q}(R_q) \left[ 1 - \prod_{q=1}^Q F_{x_q}(R_q) \right]}, \quad (13)$$

откуда видно, что при фиксированном числе испытаний погрешность вероятностного умножения имеет максимальное значение при  $x_1 x_2 = 0,5$ .

Для определения погрешности выполнения операции суммирования воспользуемся прежним методом. И абсолютную погрешность определения оценки суммы получим в виде [7]

$$\Delta_{\text{ВС}} = \sqrt{2}\Phi^{-1}(P)\sigma\left(\sum_{q=1}^Q x_q\right)^* = \frac{1,41\Phi^{-1}(P)}{\sqrt{K}} \sqrt{\sum_{q=1}^Q F_{x_q}(R_q) \left[ 1 - F_{x_q}(R_q) \right]}. \quad (14)$$

## ВЫВОД

Выполненные расчеты для различных законов распределения вспомогательных случайных сигналов показывают, что полученные результаты в соответствии с (13) и (14) близки к (9), откуда можно сделать выводы, что при существующих технологиях изготовления ПЛИС фирмы «Альтера» в реальном масштабе времени могут обрабатываться сигналы  $f_{\text{В}} = 20\text{МГц}$ , что полностью соответствует требованиям ядерной энергетики и промышленности. Также использование вероятностной формы представления информации в измерительных контроллерах позволило получить наилучшее соответствие и сочетание точности, быстродействия и аппаратного объема.

## ЛИТЕРАТУРА

1. П е р е т в о р ю в а ч напруга-вірогідність корисна модель: пат. на винахід № 56111 / М. Е. Сапожников, О. В. Скрябіна, Д. В. Моїсєєв; зареєстровано в ДРПУ 30.07.2010; опубл. 27.12.2010 // Бюл. № 24.
2. П е р е т в о р ю в а ч фаза-вірогідність корисна модель: пат. на винахід № 56112 / М. Е. Сапожников, О. В. Скрябіна, Д. В. Моїсєєв; зареєстровано в ДРПУ 20.07.2010; опубл. 27.12.2010 // Бюл. № 24.
3. П е р е т в о р ю в а ч частота-вірогідність корисна модель: пат. на винахід № 56113 / М. Е. Сапожников, О. В. Скрябіна, Д. В. Моїсєєв; зареєстровано в ДРПУ 20.07.2010; опубл. 27.12.2010 // Бюл. № 24.
4. Г л а д к и й, В. С. Вероятностные вычислительные модели / В. С. Гладкий. – М.: Наука, 1973. – 300 с.
5. С а п о ж н и к о в, Н. Е. К вопросу о точности преобразователей «вероятность – число» / Н. Е. Сапожников // Передача, обработка и отображение информации. – Теберда, 1993.

6. Сапожников, Н. Е. К вопросу о точности вероятностного умножения / Н. Е. Сапожников // Подходы в улучшении профессионального становления выпускников высшей школы. – Севастополь: СВВМИУ, 1992.

7. Сапожников, Н. Е. О погрешности вероятностного сложения / Н. Е. Сапожников // Передача, обработка и отображение информации. – Теберда; Харьков, 1991.

Представлена кафедрой  
компьютерных систем

Поступила 04.04.2013

УДК 621(41988.8)

## **ИЗУЧЕНИЕ КПД МАШИНЫ СТИРЛИНГА В УСЛОВИЯХ, БЛИЗКИХ К РЕАЛЬНЫМ**

**АБРАМЯН Р. М.**

*Государственный инженерный университет Армении*

Интерес к машинам Стирлинга обусловлен их большими возможностями и экологическими требованиями времени [1–3]. В [4] изучен КПД идеального двигателя Стирлинга в установившемся режиме работы в зависимости от характеристики регенерации. В более реальных условиях необходимо учесть неидеальность рабочего тела (газа), а также теплотери. Для анализа работы технологических систем термодинамическими методами часто применяют эксергетический подход [5]. При таком подходе можно указать, в каких элементах системы происходят наибольшие потери эксергии. Если также учесть связь диссипации энергии с кинетикой процесса и коэффициентами тепло- и массообмена, то можно получить представление о предельных возможностях тепловой машины. Такой подход принято называть термодинамикой конечной скорости или конечного времени. Основная особенность реальных процессов – это их необратимость. Важную роль в макросистемах играют специального типа подсистемы – посредники, которые могут уменьшить необратимость процессов. Таким посредником в машинах Стирлинга является регенератор. Поскольку в идеальной тепловой машине нет потерь на трение и продолжительность процесса (цикла) не ограничена, идеальная тепловая машина будет работать обратимо. Если же продолжительность процессов теплообмена между рабочим телом и регенератором ограничена, то процесс будет сопровождаться потерей эксергии. В [6] рассмотрен термический КПД цикла Карно, когда рабочим телом является Ван-дер-Ваальсовый газ, где также отмечается, что согласно теореме Карно, КПД не должен зависеть от рода рабочего вещества. В [7] рассмотрен вопрос получения КПД цикла Карно для любого вида уравнения состояния рабочего вещества.

Цель настоящей работы – исследовать двигатель Стирлинга в условиях, приближенных к реальным, и попытаться учесть теплотери при регенерации теплоты, связанные с конечным значением времени теплообмена.

Рассмотрим работу двигателя Стирлинга в случае, когда рабочее тело – Ван-дер-Ваальсовый газ. Отклонение поведения реального газа от идеаль-