

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЯДРА УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДЕФЕКТΟΣКОПА СК26 НА БАЗЕ МНОГОПРОЦЕССОРНОЙ СИСТЕМЫ

**С.В. Михайлов**

*Обнинский институт атомной энергетики*



В работе представлена методика проектирования ядра ультразвукового дефектоскопа СК26 в виде многопроцессорной системы на базе цифровых сигнальных процессоров ADSP-21XX. Предложена классификация локальной магистрали многопроцессорной системы.

В настоящее время контроль состояния технологических каналов (верхних и нижних переходников, а также циркониевых частей) реакторов РБМК выполняется при помощи ультразвуковых (УЗ) дефектоскопов, например, "Tomoscan", "Krautkramer" и СК26. Выигрыш тендера шведскими специалистами позволил им внедрить на Игналинской АЭС УЗ-дефектоскоп канадской фирмы "Tomoscan". Этот высокоскоростной дефектоскоп выполнен на базе микропроцессора 68040 (33 МГц, 64 Мб ОЗУ) фирмы "Motorola" и по сравнению с выше перечисленными имеет следующие достоинства: УЗ-данные полностью записываются в течение всего такта зондирования; благодаря высокой производительности допускается вторичное вхождение в канал при обнаружении дефекта, тогда как у СК26 для этой цели используется режим автоматического слежения дефектов (АСД), т.е. после срабатывания АСД оператор сам решает, нужно ли снизить скорость зондирования для более качественного съема УЗ-данных. Стационарная универсальная (использующая ультразвуковой и токовихревой методы) УЗ-дефектоскопическая система западногерманской фирмы "Krautkramer" была внедрена японскими специалистами в 1999 г. на Ленинградской АЭС. В настоящее время она почти не используется из-за ее громоздкости и необходимости нахождения обслуживающего персонала в грязной зоне (на "пятак"). Четырехплатный аналоговый 16-канальный УЗ-дефектоскоп СК26 впервые был внедрен в производственный процесс на Ленинградской АЭС в 1996 г. Немного позднее различные модификации СК26 (уже двухплатные, цифровые, на базе микропроцессора ADSP-21061) были внедрены на Курской и Смоленской АЭС, например, в 1998 г. на Курской АЭС при помощи СК26 было проконтролировано около 1600 технологических каналов, а в 2001 г. там же – около 2000.

СК26 имеет ряд существенных недостатков: ущербная обработка УЗ-данных (например, отсутствует их фильтрация); УЗ-данные снимаются не в течение всего такта зондирования, а лишь в течение некоторого действительного интервала времени (это снижает качество УЗ-зондирования); нецелесообразное использование аппаратных ресурсов, например, часть времени микропроцессор СК26 тратит на увеличение пропускной способности канала связи с персональным компьютером (формирование дельта-кода передаваемых данных), а не на их обработку. Основной причиной этих недостатков

© С.В. Михайлов, 2001

является низкая производительность ядра СК26. Ядром называется модуль управления (модуль запускает такт зондирования и формирует его контрольные параметры, т.е. длительность, частоту оцифровки, усиление, частоту следования зондирующих импульсов и др.) и сбора информации. Существуют несколько способов увеличения производительности ядра: увеличение числа микропроцессоров общего назначения; использование микропроцессора со сверхвысокой тактовой частотой; использование микропроцессора специального назначения. Наиболее приемлемым из них является первый способ [1]. Настоящая работа посвящена решению проблем, связанных с проектированием ядра УЗ-дефектоскопа СК26 в виде многопроцессорной системы (МПС) на базе цифровых сигнальных процессоров (ЦСП) семейства ADSP-21XX.

В процессе контроля технологического канала работа многопроцессорного ядра разбивается на периодически повторяющиеся циклы (итерации), состоящие из фаз вычисления и обмена. В фазе вычисления ядро зондирует участок технологического канала (в течение нескольких тактов зондирования, число которых равно количеству ультразвуковых датчиков (УЗД) в подвеске - механизме транспортировки зондирующей части торпеды), читает, обрабатывает и передает в персональный компьютер (ПК) данные, снимаемые с УЗД, а в фазе обмена ядро выполняет внутренний обмен данными между ЦСП по локальным магистралям (ЛМ) МПС.

Ядро УЗ-дефектоскопа предлагается разработать в соответствии с методикой проектирования МПС, состоящей из четырех основных этапов:

- расчет исходных параметров;
- отбор из семейства ADSP-21XX наиболее подходящих ЦСП;
- расчет количества ЦСП в МПС в зависимости от типа ЛМ для каждого отобранного ЦСП;
- выбор оптимальной архитектуры МПС.

На первом этапе методики определяются следующие исходные параметры:  $T_{um}$  – длительность итерации;  $D_u$  – количество исходных данных;  $D_p$  – количество результирующих данных;  $V_{noc}$  – объем последовательных вычислений;  $V_{пар}$  – объем параллельных вычислений.

Параметр  $T_{um}$  отражает максимальное время, отводимое МПС для выполнения фаз вычисления и обмена. Значение этого параметра зависит от условий технического задания, предъявляемого к ядру, и рассчитывается по формуле

$$T_{um} = \frac{L}{2\pi R \cdot \omega},$$

где  $L$  – путь продольного прохождения подвески в течение одного цикла, мм;  $R$  – внутренний радиус технологического канала, мм;  $\omega$  – угловая скорость вращения подвески, об/с. Для СК26 ( $R = 80$  мм,  $\omega = 1.2$  об/с)  $T_{um} = 1.66$  мс при  $L = 1$  мм (согласно “Методике ультразвукового контроля РБМК”, разработанной в НИКИМТ).

Параметр  $D_u$  отражает максимальное количество исходных данных (16-разрядных слов), которые МПС должна обработать в фазе вычисления (данных, считываемых с УЗД в течение всего цикла). Параметр  $D_p$  отражает максимальное количество результирующих данных (также 16-разрядных слов), которые получаются в МПС после обработки исходных данных. К ним относятся видеоданные - данные, предназначенные для визуального наблюдения дефектоскопистом результатов оцифровки сигнала УЗД на экране монитора ПК, - количество которых приблизительно равно количеству исходных данных. Значение параметров  $D_u$  и  $D_p$  рассчитывается по формуле

$$D_p \approx D_u = q_d \cdot t_s \cdot f_0,$$

где  $q_d$  – количество УЗД в подвеске;  $t_s$  – максимально возможная длительность стро-

ба (в целях экономии аппаратных ресурсов исходные данные снимают не в течение всего такта зондирования, а лишь в течение некоторого интервала времени, называемого стробом);  $f_0$  – частота оцифровки, т.е. частота съема исходных данных, линейно зависящая от резонансной частоты УЗД. Для СК26 ( $q_d = 16$ )  $D_u = D_p = 3200$  слов при  $t_s = 20$  мкс и  $f_0 = 10$  МГц (согласно “Методике ультразвукового контроля РБМК”).

Параметр  $V_{noc}$  отражает количество машинных циклов, которые должен сделать ЦСП в однопроцессорной системе для выполнения в фазе вычисления действий, не поддающихся распараллеливанию. К таким действиям относятся зондирование участка технологического канала, чтение исходных и передача в ПК результирующих данных. Параметр  $V_{пар}$ , наоборот, отражает количество машинных циклов, которые необходимы для выполнения действий, поддающихся распараллеливанию. Поскольку к этим действиям относится только обработка исходных данных, то в целях упрощения получения параметра  $V_{пар}$  его следует представить в виде

$$V_{пар} = D_u \cdot V'_{пар}, \tag{1}$$

где  $V'_{пар}$  – количество машинных циклов, необходимых ЦСП для обработки одного исходного данного. Для СК26  $V_{noc} = 37425$  циклов,  $V'_{пар} = 40$  циклов. Эти значения получены в результате моделирования на симуляторе “SIM2181.EXE” участка программы, отвечающей за работу ядра в фазе вычисления.

На втором этапе методики производится отбор наиболее подходящих ЦСП для МПС по следующим критериям: объем внутренней памяти программ –  $M_n$  и данных –  $M_d$ , количество внешних источников прерывания, наличие дополнительных возможностей (флагов ввода-вывода, контроллера прямого доступа памяти (ПДП)). Например, отсутствие в ЦСП ПДП делает его не пригодным для использования в МПС с ЛМ параллельного типа. На рис.1 приведена классификация ЛМ для МПС на базе ЦСП семейства ADSP-21XX, полученная из [2-4]. В предложенной классификации способ связи ЦСП в МПС зависит от вида обмена данными между ЦСП, числа шин ЛМ, типа соединений ЦСП и разрядности шин ЛМ. В связи с функциональными особенностями используемого семейства ЦСП в эту классификацию не вошли такие широко известные типы соединений

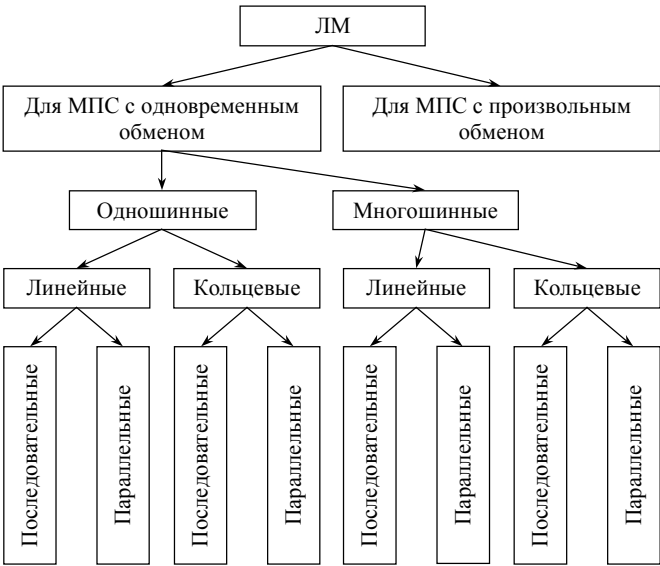


Рис.1. Классификация ЛМ для МПС на базе ЦСП семейства ADSP-21XX

микропроцессоров как звездообразный, древовидный и полносвязный. Приведенная ниже табл. 1 упрощает выбор оптимального типа ЛМ. Анализ этой классификации показывает, что наибольший интерес представляет МПС с одновременным обменом, с одношинной кольцевой ЛМ последовательного или параллельного типа, а также с многошинной линейной ЛМ параллельного типа. Первые два типа ЛМ обладают средней производительностью и лишены микросхем обвязки (это увеличивает надежность и уменьшает их стоимость). Третий тип ЛМ обладает максимальной производительностью, но уступает по надежности, стоимости и площади печатной платы. Результаты исследований (функциональные схемы, алгоритмы работы, формулы для расчета произво-

Таблица 1

### Рекомендации по выбору оптимального типа ЛМ для МПС

Конструктив ЛМ	Рекомендации	Комментарий
Одношинная или многошинная	Одношинная ЛМ выбирается, если длительность фазы вычисления для нее значительно больше (на порядок) длительности фазы обмена, в противном случае выбирается многошинная ЛМ	Не имеет смысла уменьшать длительность фазы обмена, когда она и так мала по сравнению с длительностью итерации, тем более, что введение многошинной ЛМ многократно усложнит аппаратную часть МПС
Линейная или кольцевая	Кольцевая ЛМ выбирается, если магистраль с ней содержит не более двух шин. В противном случае выбирается линейная ЛМ	В МПС с одношинной или двухшинной кольцевой ЛМ отсутствуют коммутационные микросхемы обвязки в отличие от МПС с линейной ЛМ
Последовательная или параллельная	Последовательная ЛМ выбирается, если количество данных, передаваемых по ЛМ, значительно меньше длительности фазы вычисления, рассчитанной в машинных циклах ЦСП. В противном случае выбирается параллельная ЛМ	Чем меньше количество передаваемых данных, тем меньше сказывается низкая пропускная способность последовательной ЛМ (по сравнению с параллельной ЛМ) на производительность МПС в целом

дительности ЛМ, их анализ) ЛМ таких МПС представлены в [2 - 4].

Очевидно, что объем внутренней памяти выбираемого ЦСП должен удовлетворять выражениям

$$M_n > C_{выч} + C_{обм} \quad (2)$$

$$M_d > D_u + D_p + D_{выч} + D_{обм} \quad (3)$$

где  $C_{выч}$ ,  $C_{обм}$  – объемы участков программы (количества машинных команд ЦСП), отвечающих за поддержку фаз вычисления и обмена соответственно;  $D_{выч}$ ,  $D_{обм}$  – количества вспомогательных данных, предназначенных для временного хранения промежуточных значений в фазах вычисления и обмена соответственно. Значения  $C_{выч}$  и  $D_{выч}$  можно получить из анализа программы, написанной на первом этапе. Для СК26 значения  $C_{обм}$  и  $D_{обм}$ , полученные в результате анализа рекомендованных ЛМ [2-4], сведены в табл. 2.

Таблица 2

### Значения $C_{обм}$ и $D_{обм}$ в зависимости от типа ЛМ

Тип ЛМ	$C_{обм}$	$D_{обм}$
Одношинная кольцевая последовательная	64	$2 + D_n \cdot (1 - 1/N)$
Одношинная кольцевая параллельная	48	$2 + D_n \cdot (1 - 1/N)$
Многошинная линейная параллельная	51	5

Для наглядного представления данных и их дальнейшего анализа удобно воспользоваться табл. 3. Так, для СК26 все ЦСП из семейства ADSP-21XX, удовлетворяющие выше перечисленным критериям, занесены в столбец «Процессор» табл. 3. Остальные столбцы этой таблицы будут заполнены в ходе выполнения следующие-

Таблица 3  
**Количество ЦСП в МПС в зависимости от типа ЛМ и ЦСП**

Процессор	Тип ЛМ		
	Одношинная кольцевая последовательная	Одношинная кольцевая параллельная	Многошинная линейная параллельная
ADSP-2191M	6	1	1
ADSP-2189N	-	2	2
ADSP-2186M	-	2	2
ADSP-2183	-	5	4
ADSP-2181	-	607	8

го этапа методики.  
На третьем этапе методики значение  $N$  – количество ЦСП в МПС с одношинной кольцевой ЛМ последовательного и параллельного типов определяется в соответствии с алгоритмом диспетчеризации передачи данных, подробно описанном в [5]; исходные данные для задачи диспетчеризации пересылок (табл.1 в [5]) этого ал-

Таблица 4  
**Исходные данные для задачи диспетчеризации пересылок**

$y_1$	$x_1, x_2, \dots, x_{\frac{D_u}{N}}$	$V'_{пар}$
$y_2$	$x_1, x_2, \dots, x_{\frac{D_u}{N}}$	$V'_{пар}$
...	...	...
$y_{\frac{D_p}{N}}$	$x_1, x_2, \dots, x_{\frac{D_u}{N}}$	$V'_{пар}$
$y_{\frac{D_p}{N}+1}$	$x_{\frac{D_u}{N}+1}, x_{\frac{D_u}{N}+2}, \dots, x_{2 \cdot \frac{D_u}{N}}$	$V'_{пар}$
...	...	...
$y_{D_p}$	$x_{(N-1) \cdot \frac{D_u}{N}+1}, x_{(N-1) \cdot \frac{D_u}{N}+2}, \dots, x_{D_u}$	$V'_{пар}$

горитма для СК26 представлены в табл. 4.  
Первый столбец табл. 4 содержит результирующие данные в символьном виде ( $y_1, y_2, \dots, y_{D_p}$ ), а второй – исходные данные ( $x_1, x_2, \dots, x_{D_u}$ ).  
Значение  $N$  в МПС с многошинной линейной ЛМ параллельного типа рассчитывается по формуле

$$N = \text{int} \left( \frac{D_u \cdot V'_{пар} + (D_p - D_u) \cdot (a + q)}{\tau_{ум} \cdot f_{CLK} - V_{noc} - D_u \cdot (a + q) - b} \right), \tag{4}$$

где  $\text{int}$  – операция округления до целого в сторону большего;  $f_{CLK}$  – тактовая частота синхронизации ЦСП;  $a = 2, b = 6, q = 2$  – параметры рассматриваемой ЛМ (см.

[4]). Формула (4) получена из (1) настоящей работы, (1), (2) в [4] и (3) в [5] с учетом длительности фазы вычисления ( $T_{выч}$ ), выраженной через исходные параметры методики:

$$T_{выч} = \left( V_{noc} + \frac{V_{nap}}{N} \right) \cdot \frac{1}{f_{CLK}}. \quad (5)$$

Значение  $N$  рассчитывается путем подстановки в (4) значения  $f_{CLK}$  от каждого ЦСП табл. 3. Для СК26 полученные согласно алгоритму диспетчеризации в [5] и рассчитанные по формуле (4) значения  $N$  занесены в соответствующие подстолбцы столбца «Тип ЛМ» табл. 3.

На четвертом этапе методики выбор оптимальной архитектуры МПС выполняется посредством анализа данных табл. 3 (поиск МПС с минимальным количеством ЦСП) с учетом рекомендаций табл. 1. Следует отметить, что на выбор оптимальной архитектуры МПС в значительной степени влияют экономические аспекты разработки; предельные размеры конечного устройства (ядра); надежность (вероятность электрического отказа); мощность рассеивания и др. Свой оптимум будет достигаться в каждом индивидуальном случае в зависимости от расстановки приоритетов в вышеперечисленных аспектах. Ядро СК26 с учетом экономических аспектов и минимальных размеров печатной платы (согласно данным табл. 3) наиболее рационально выполнить в виде МПС с двумя ЦСП ADSP-2186M и одношинной кольцевой ЛМ параллельного типа (использование ADSP-2191M или ADSP-2189N не выгодно из-за высокой их стоимости и наличия дополнительных микросхем обвязки). Остановив свой выбор на конкретной архитектуре МПС, разработчик имеет возможность приступить к созданию физического устройства (ядра), используя соответствующие функциональные схемы МПС и их алгоритмы работы [2 - 5].

В настоящий момент, ядро УЗ-дефектоскопа СК26, выполненное в виде однопроцессорной системы работает в режиме разделения времени, т.е. во время зондирования технологического канала осуществляется сбор УЗ-данных, а их основная обработка выполняется по окончании зондирования. Представленная методика, классификация ЛМ, формулы (1) – (4) и алгоритм диспетчеризации [5] позволят разработчику проектировать ядро УЗ-дефектоскопа СК26 в виде МПС на базе ЦСП семейства ADSP-21XX, работающего в режиме реального времени, и выполнять сбор и обработку УЗ-данных одновременно. Это существенно повысит качество и скорость выполнения контроля технологических каналов реакторов РБМК. Также предложенный в данной работе подход позволит систематизировать процесс проектирования МПС.

## Литература

1. Коган Б.М. Электронные вычислительные машины и системы. - М.: Энергоатомиздат, 1991. - С. 489 - 493.
2. Комаров А.В., Михайлов С.В. Производительность локальной магистрали последовательного типа в многопроцессорной системе // Известия вузов. Электроника. - 2000. - №1. - С. 97 - 100.
3. Комаров А.В., Михайлов С.В. Производительность локальной магистрали параллельного типа в многопроцессорной системе // Известия вузов. Электроника. - 2000. - №3. - С. 73 - 75.
4. Комаров А.В., Михайлов С.В. Производительность локальной многошинной магистрали параллельного типа в многопроцессорной системе // Известия вузов. Электроника. - 2001. - №2. - С. 90 - 93.
5. Комаров А.В. Алгоритм диспетчеризации передачи данных по локальной магистрали многопроцессорной системы кольцевого типа // Известия вузов. Электроника. - 2001. - №1. - С. 80 - 86.

Поступила в редакцию 11.05.2001

## ABSTRACTS OF THE PAPERS

### УДК 681.5:621.165

*Electronic System of Erosion Forecasting of Turbine Rotor Blade of Nuclear Power Plants \ K.V. Dergachev; Editorial board of journal "Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2001. - 10 pages, 4 illustrations, 1 table. - References - 9 titles.*

The structure, functional scheme and characteristics of calculating complex intended for prediction of erosion of NPP turbine rotor blade are considered in this paper.

### УДК 681.332

*Designing of Ultrasonic Defectoscop SK26 Core on the basis of Multiprocessor System \ S.V. Michailov; Editorial board of journal "Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2001. - 6 pages, 1 illustration, 4 tables. - References - 5 titles*

Method of the ultrasonic defectoscop SK26 core designing by way of multiprocessor system on the basis of digital signal processors ADSP-21XX has been presented. Local bus classification of multiprocessor system has been proposed.

### УДК 621.039.586 : 536.42

*Calculation Model of Pin Meltdown subject to Molten Cladding Relocation in BN Reactor Core under beyond Design Accident / G.N. Vlasichev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2001. - 11 pages, 6 illustrations, 1 table. - References, 10 titles.*

The technique of account of emergency process of pin heating and melting is developed in view of molten cladding relocation at the termination of coolant flow in fuel assembly of the fast reactor with sodium coolant. Meltdown times of pin cladding and fuel on height of separate fuel pin, complete or partial blocking of the channel by a freezing material, and also repeated meltdown of the solidified layer are determined as a result of calculations. Testing of the developed programs of account of fuel pin melting and molten cladding moving TRAMS-TWEL and MOTE according to numerical results of techniques similar used in given programs is executed. The accounts of fuel pin cladding melting, cladding melt moving and freezing in not heated sections, taking place above and below active part of FFTF pin, and also in the most active part are executed. As a whole, received as a result of accounts a configuration, the lengths of layers from the solidified steel are higher and below heated site satisfactorily correspond to the data of R-5 experiment on TREAT reactor.

### УДК 621.311:621.039

*Temporary Closing-down of Condensate-feed Channel and Steam Generators of Power Units with the using of Octadecylamine \ E.B. Gromov; Editorial board of journal "Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2001. - 6 pages, 1 illustration, 3 tables. - References - 4 titles.*

Results of development, improvement and assay of technology of the temporary closing-down of heat-and-power engineering equipment with using of film-forming amines and, in particular, octadecylamine

### УДК 621.039.519

*Measurement of radionuclide yields produced in 2.6 GeV proton irradiated nat-W \ Yu.E. Titarenko, E.I. Karpikhin, V.F. Batyaev, A.B. Koldobsky, B.M. Zhivun, R.D. Mulambetov, C.V. Kvasova, D.V. Fischenko; Editorial board of journal "Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2001. - 13 pages, 2 illustrations, 2 table. - References - 23 titles.*

Radionuclide yields are measured in natural tungsten thin target irradiated with 2.6 GeV protons. The measurements were carried out using direct gamma-spectrometry of samples irradiated via U10 ITEP synchrotron. In total, 129 yields were defined, including 10 independent, 9 independent