

УДК 681.3.066

Е.М. Кравцунов (АО «МЦСТ», ПАО «ИНЭУМ им. И.С. Брука»)

E. Kravtsunov

**КРИТЕРИЙ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В АЛГОРИТМАХ ДИНАМИЧЕСКОГО  
УПРАВЛЕНИЯ ЧАСТОТОЙ И НАПРЯЖЕНИЕМ ЯДРА МИКРОПРОЦЕССОРА  
«ЭЛЬБРУС-1С+»**

**DECISION TAKING CRITERIA IN DYNAMIC FREQUENCY AND VOLTAGE  
SCALING ALGORITHMS FOR ELBRUS-1CP MICROPROCESSOR**

*Приведены результаты расчета оптимальных состояний энергопотребления микропроцессора «Эльбрус-1С+», определен критерий принятия операционной системой решения о выборе состояния пониженного энергопотребления микропроцессора в зависимости от его температуры и заданных ограничений по рассеиваемой мощности.*

*The article reports on results of power consumption states calculation for Elbrus-1CP microprocessor core. States calculated using criteria introduced.*

*Ключевые слова: управление энергопотреблением микропроцессора, динамическое и статическое энергопотребление.*

*Keywords: power consumption states, dynamic and static power, linux cpufreq governor.*

**Введение**

Наиболее перспективной и экономически-оправданной областью внедрения микропроцессоров семейства «Эльбрус» в гражданской сфере является построение встраиваемых систем для автоматизации промышленного производства. При обеспечении низкого энергопотребления микропроцессора и устойчивости его работы в условиях повышенной температуры высокая производительность микропроцессоров «Эльбрус», достигаемая за счет внутреннего параллелизма исполнения операций, обеспечивает серьезные конкурентные преимущества по сравнению с зарубежными микропроцессорами, используемыми в сегменте промышленной автоматизации, в

особенности в его высокопроизводительных контурах.

В течение пяти лет с 2011 по 2015 год в АО «МЦСТ» выполнялись проекты по созданию высокопроизводительного одноядерного микропроцессора «Эльбрус-1С+», удовлетворяющего требованиям низкого энергопотребления [1, 2]. В результате этой работы в 2015 году появились реализация такого микропроцессора и опытный образец вычислительного комплекса (стенда) на его основе, включающего контроллер периферийных интерфейсов КПИ-2 [3, 4]. Выполненные на стенде измерения показали, что мощность, рассеиваемая ядром микропроцессора, работающего на тактовой частоте 1 ГГц, не превышает 5 Вт. При этом пиковая производительность на вычислительных задачах вещественной арифметики составляет 23 GLOPs.

«Эльбрус-1С+» – это первый микропроцессор архитектуры «Эльбрус», в котором реализовано динамическое управление из операционной системы (ОС) частотой и напряжением питания микропроцессорного ядра. Опыт внедрения микропроцессоров «Эльбрус» в бортовые системы показал, что существует проблема разработки алгоритма ОС, позволяющего принимать решение о выборе состояния пониженного энергопотребления в зависимости от температуры и требований, ограничивающих величину рассеиваемой мощности. Дополнительным требованием к алгоритму является сохранение операционной системой показателей, свойственных работе в реальном времени (детерминированности времени отклика). Подобные алгоритмы, реализованные в ОС Linux [5] и осуществляющие динамическое управление энергопотреблением в зависимости от загруженности микропроцессора, не соответствуют приведенным требованиям, т.к. не учитывают зависимость от температуры, ограничения по рассеиваемой мощности и не могут быть использованы в операционной системе реального времени (ОС RV). В связи с этим необходима разработка нового алгоритма, основанного на критерии принятия решений, согласно которому ОС динамически переводит ядро микропроцессора в состояние пониженного энергопотребления.

Алгоритм создан в соответствии с теоретическим обоснованием и формулами, приведенными в [2]. Предлагаемый критерий позволяет определить оптимальное соотношение входного напряжения питания и частоты синхроимпульса ядра для заданного ограничения по рассеиваемой мощности и температуре микропроцессора. На основе расчетов построена таблица принятия решений, необходимая для динамического управления энергопотреблением.

## 1. Теоретическое обоснование

Введем следующие обозначения:

$Fstates = \{F[i]\}$ , где  $0 \leq i < N$  – набор частот синхроимпульса микропроцессора, между которыми возможно динамическое переключение;  $N$  – количество частот. Значения частот  $F[i]$  расположены в наборе по порядку возрастания;

$Ustates = \{U[j]\}$ , где  $0 \leq j < N$  – набор напряжений питания ядра микропроцессора, между которыми возможно динамическое переключение;  $N$  – количество напряжений. Значения напряжений  $U[j]$  расположены в наборе по порядку возрастания;

$pstates = \{U[j], F[i]\}$ , где  $0 \leq j < N$ ,  $0 \leq i \leq j$  – набор состояний энергосбережения, между которыми возможно динамическое переключение, каждый элемент представляет собой пару {напряжение, частота};  $N$  – количество напряжений. Состояния в наборе расположены по порядку возрастания значений напряжения.

Значения в наборах  $Fstates$  и  $Ustates$  определяются экспериментальным путем.  $U[j]$  – минимальное напряжение, обеспечивающее стабильную работу микропроцессора на частоте  $F[i]$  при 100-процентной вычислительной нагрузке.

Предлагаемый критерий основан на расчете максимально допустимого значения напряжения питания  $Uedge$  микропроцессорного ядра в зависимости от частоты синхроимпульса  $F[i]$  и заданных параметров  $P$  (ограничения сверху на рассеиваемую мощность) и  $T$  (температуры микропроцессора).

Полученное из расчета значение  $Uedge$  сравнивается со значением  $Ucrit = U[i]$ . Если

$U_{edge} < U_{crit}$ , в формуле расчета  $U_{edge}$  производится уменьшение частоты на один шаг в соответствии с набором  $Fstates(F = F[i - -])$  и расчет  $U_{edge}$  повторяется. Расчет и выполнение сравнения повторяются до момента выполнения неравенства  $U_{edge} > U_{crit}$ . Если неравенство не выполняется при минимальном значении частоты из набора  $Fstates(i = 0)$ , то производится уменьшение  $U_{crit}$  на один шаг в соответствии с набором  $Ustates(U_{crit} = U[j - -])$  и вычисления продолжаются. При достижении условия  $U_{edge} > U_{crit}$  полученные значения  $i$  и  $j$  определяют состояние энергосбережения  $pstats = \{U[j], F[i]\}$ , удовлетворяющее требованиям по мощности  $P$  и температуре  $T$ . Если неравенство не выполняется ни при каких значениях  $i, j$ , то требования по мощности и температуре, заданные параметрами  $P$  и  $T$ , не могут быть реализованы. В этом случае должно быть произведено аварийное отключение микропроцессора.

Для получения формулы расчета  $U_{edge}$  проведем теоретические выкладки, основанные на результатах исследования [2].

Согласно [2], общая рассеиваемая мощность имеет статическую и динамическую составляющие:

$$P_{tot} = P_{dyn} + P_{stat} . \quad (1)$$

Статическая мощность не зависит от частоты синхроимпульса, динамическая зависит линейно:

$$P_{tot}(F_{clock}) = K \cdot F_{clock} + P_{stat} . \quad (2)$$

Измерение зависимости общей мощности от частоты позволяет путем линейной интерполяции определить значение статической мощности для значения температуры, при которой производились измерения.

Динамическая мощность связана квадратичной зависимостью с напряжением питания:

$$P_{dyn} = (aU^2 F_{clock}) + (bUF_{clock}) . \quad (3)$$

Зависимость динамической мощности от напряжения может быть получена из измеренной зависимости общей мощности от напряжения. Для этого из значения общей мощности, измеренной для каждого значения напряжения, необходимо вычесть рассчитанное по формуле (2) значение статической мощности. Имея результаты измерений зависимости динамической мощности от напряжения, с помощью квадратичной интерполяции можно рассчитать коэффициенты  $a$  и  $b$  из формулы (3).

Согласно [2] статическая мощность зависит от частоты, при нагревании полупроводников возрастает ток утечки, определяющий статическую мощность. Зависимость тока утечки задается формулой:

$$I_{leak} = A \cdot T^2 e^{\frac{-B}{T}}, \quad (4)$$

где коэффициенты  $A$  и  $B$  могут быть получены с помощью численного моделирования на основе измерений зависимости тока от температуры. Таким образом, статическая мощность выражается формулой:

$$P_{stat} = AU \cdot T^2 e^{\frac{-B}{T}}. \quad (5)$$

Подставив выражения для динамической мощности (3) и статической мощности (5) в (1), получаем зависимость полной мощности от напряжения и температуры:

$$P_{tot} = (aU^2 F_{clock}) + (bUF_{clock}) + AUT^2 e^{\frac{-B}{T}}. \quad (6)$$

Положительный корень квадратного уравнения по  $U$  является искомым значением  $U_{edge}$ :

$$U_{edge} = \frac{1}{2a} \left[ \left( \left( \frac{f(T) + b}{F_{clock}} \right)^2 - \frac{4aP_{tot}}{F_{clock}} \right)^{\frac{1}{2}} - \left( \frac{f(T) + b}{F_{clock}} \right) \right], \quad \text{где } f(T) = A \cdot T^2 e^{\frac{-B}{T}}. \quad (7)$$

Коэффициенты  $a$ ,  $b$ ,  $A$ ,  $B$  для формулы (7) были вычислены с использованием методов интерполяции и численного моделирования зависимостей, экспериментально полученных для микропроцессора «Эльбрус-1С+».

## 2. Измерения и расчеты коэффициентов

Измерения выполнялись на стенде, включающем опытный образец вычислительного комплекса, построенного на микропроцессоре «Эльбрус-1С+», и контроллер периферийных интерфейсов КПИ-2. При измерениях использовалось ядро ОС РВ «Эльбрус» с доработками, обеспечивающими программный доступ к управляемому источнику питания, встроенному в микропроцессорное ядро датчику температуры, регистрам управления частотой. С помощью программно-доступного источника питания в процессе эксперимента измерялись значения тока утечки, входного напряжения и осуществлялось управление входным напряжением.

### *Устойчивые состояния*

На первом этапе эксперимента был определен набор из 10 состояний *pstates*, на которых ОС устойчиво работала при условии 100-процентной загрузки ядра микропроцессора вычислительной задачей, в качестве которой использовался тест измерения пиковой производительности. Результаты измерений напряжений и частот, описывающие эти состояния, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Устойчивые состояния *pstates* для микропроцессора «Эльбрус-1С+»

№	$F$ , МГц	$U$ , мВ
0	145	788
1	200	802
2	304	828
3	400	852
4	512	880
5	609	905
6	711	930
7	800	953
8	914	981
9	984	999

Полученные значения определили наборы  $Ustates$ ,  $Fstates$ , используемые в расчетах для формирования наборов оптимальных состояний и таблицы принятия решения.

### *Определение статической мощности*

Для определения значения статической мощности измерялась зависимость общей мощности от частоты синхроимпульса, регулируемой программно из операционной системы. Результаты измерений приведены в таблице 2. Измерения выполнялись при напряжении питания ядра микропроцессора 1115 мВ. Приведенная зависимость является линейной. В результате линейной интерполяции зависимости общей мощности от частоты, прослеженной до нулевого значения частоты, была получена величина статической мощности  $P_{stat} = 1,1$  Вт.

Таблица 2. Зависимость общей мощности от частоты синхроимпульса

$F_{clock}$ , МГц	145	200	304	400	512	609	711	800	914	984
$P_{tot}$ , Вт	1,32	1,67	1,74	2,02	2,11	2,29	2,43	2,64	2,89	3,06

### ***Определение коэффициентов зависимости динамической мощности от напряжения***

С целью определения коэффициентов квадратичной зависимости динамической мощности от напряжения (формула (3) для устойчивого состояния  $pstates$  (№6 в таблице 1) было выполнено измерение зависимости общей мощности от напряжения питания микропроцессорного ядра. Результаты измерений приведены в таблице 3. Значения динамической мощности получены путем вычитания рассчитанного значения статической мощности из измеренного значения общей мощности.

Таблица 3. Зависимость динамической мощности от напряжения питания

$U$ , В	0,930	1,053	1,115
$P_{tot}$ , Вт	1,45	2,10	2,43
$P_{dyn}$ , Вт	0,35	1,0	1,33

С использованием метода квадратичной интерполяции для коэффициентов формулы (3) были получены следующие значения:  $a = 2,8 \cdot 10^{-10}$ ,  $b = 6,86 \cdot 10^{-9}$ .

### ***Определение коэффициентов зависимости статической мощности от температуры***

Для определения коэффициентов  $A$ ,  $B$  зависимости статической мощности от температуры (формула (5) определялась зависимость тока утечки от температуры микропроцессора. Измерения выполнялись в термокамере, показания тока и температуры измерялись программно. Результаты измерений приведены в таблице 4. На их основе с помощью численного моделирования были определены коэффициенты  $A$  и  $B$  зависимости от температуры:  $A = 1,09 \cdot 10^{-4}$ ,  $B = 466,37$ .

Таблица 4. Зависимость тока утечки от температуры

$T$ , °К	273,16	293,16	313,16	331,16	355,16	379,16	401,16
$T$ , °С	0	20	40	58	82	106	128
$I_{leak}$ , А	1,87	2,0	2,37	2,69	3,38	4,38	5,8

Полученные значения коэффициентов  $a$ ,  $b$ ,  $A$ ,  $B$  позволяют рассчитывать значение  $U_{edge}$  для любых значений параметров  $P_{tot}$  и  $T$  по формуле (7): параметр  $P_{tot}$  задает ограничение сверху по рассеиваемой мощности в ваттах, параметр  $T$  – значение температуры микропроцессора в шкале Кельвина, частота  $F_{clock}$  задается в герцах.

### 3. Формула расчета оптимального состояния

Расчет оптимальных состояний энергопотребления для различных комбинаций  $P_{tot}$  и  $T$  выполняется путем решения неравенства:

$$U_{edge} > U[i], 0 \leq i < N, \quad (8)$$

где  $U_{edge}$  вычисляется по формуле (7) с коэффициентами  $a = 2,8 \cdot 10^{-10}$ ,  $b = 6,86 \cdot 10^{-9}$ ,  $A = 1,09 \cdot 10^{-4}$ ,  $B = 466,37$ ; величины  $U[i]$  заданы в таблице 1 для каждого значения частоты синхроимпульса;  $N=10$ .

При решении неравенства (8) поиск значений  $U[i]$  и  $F[j]$ , определяющих оптимальное состояние, начинается с индекса  $i = (N - 1)$ , соответствующего в таблице 1 устойчивому состоянию с максимальным энергопотреблением. Пара  $\{U[i], F[j]\}$ , определяющая оптимальное состояние, подбирается путем уменьшения частоты. Если для заданного напряжения  $U[i]$  уменьшение частоты в соответствии со значениями из таблицы

1 не позволило удовлетворить неравенство (8), производится снижение напряжения (уменьшается коэффициент  $i$  и берется следующее значение  $U[i]$  из таблицы 1).

#### 4. Таблица принятия решения

Решение неравенства (8) для различных значений  $P_{tot}$  и  $T$  позволило сформировать два набора состояний энергопотребления исследуемого микропроцессора: набор из 7 состояний, требующий модификации частоты синхроимпульса при неизменном напряжении, и набор из 18 состояний, требующий последовательного изменения частоты и напряжения. Состояния первого набора не нарушают требований реального времени. В случае переходов между состояниями первого набора характерное время отклика операционной системы может быть рассчитано исходя из минимального значения частоты. В то же время переходы во второй группе нарушают детерминированность времени отклика. Состояния второй группы могут быть использованы при высоких температурах во избежание выхода аппаратуры из строя из-за перегрева или для выполнения корректного завершения работы в случае переключения устройства на питание от батареи.

В таблице 5, полученной в результате решения неравенства (8) для микропроцессора «Эльбрус-1С+», приведено соответствие номера оптимального состояния энергопотребления значениям параметров  $P_{tot}$  и  $T$ . Таблицы 6 и 7 определяют оптимальные состояния из первой и второй групп соответственно. В таблице 5 состояния энергосбережения первой группы отмечены белым фоном, второй группы – светло-серым фоном; темно-серым фоном отмечены пересечения столбцов и строк, соответствующие критическим значениям параметров  $T$  и  $P_{tot}$ , при которых должно производиться аварийное отключение питания микропроцессора.

Таблица 5. Таблица принятия решений

$P_{tot}/T^{\circ}C$	50	60	70	80	90	100	110	120	130
5,1 Вт	p0	p0	p0	p0	p0	p0	p0	p8	p15
4,85 Вт	p0	p0	p0	p0	p0	p0	p5	p13	p18
4,6 Вт	p0	p0	p0	p0	p0	p1	p10	p17	p23

4,35 Вт	p0	p0	p0	p0	p0	p7	p15	p21	halt
4,1 Вт	p0	p0	p0	p0	p4	p13	p19	p24	halt
3,85 Вт	p0	p0	p0	p2	p11	p18	p23	halt	halt
3,6 Вт	p0	p0	p0	p9	p16	p23	halt	halt	halt
3,35 Вт	p0	p0	p6	p15	p22	halt	halt	halt	halt
3,10 Вт	p0	p4	p14	p21	halt	halt	halt	halt	halt
2,85 Вт	p3	p13	p20	halt	halt	halt	halt	halt	halt
2,6 Вт	p12	p19	halt						
2,35 Вт	p19	halt							
2,1 Вт	halt								

Таблица 6. Первая группа оптимальных состояний энергопотребления

Состояние	$F$ , МГц	$U$ , мВ
p0	984	999
p1	800	999
p2	711	999
p3	512	999
p4	400	999
p5	304	999
p6	145	999

Таблица 7. Вторая группа оптимальных состояний энергопотребления

Состояние	$F$ , МГц	$U$ , мВ
p7	200	981
p8	145	981
p9	512	953
p10	304	953
p11	145	953
p12	304	930
p13	200	930
p14	400	905
p15	200	905
p16	400	880
p17	304	880
p18	400	852
p19	200	852
p20	145	852
p21	304	828
p22	200	828
p23	200	802
p24	145	788

Таблицы 5, 6, 7 являются основным результатом исследования. Они могут использоваться при реализации алгоритма принятия решений в ядре ОС РВ «Эльбрус». Такой алгоритм позволит применить динамическое управление энергопотреблением во

встраиваемых системах с поддержкой реального времени.

## **Заключение**

В статье обосновывается критерий, позволяющий реализовать быстрый алгоритм принятия решений о выборе операционной системой состояния пониженного энергопотребления. Такой алгоритм можно использовать для адаптивного управления частотой в ОС реального времени. Результат является важным для внедрения микропроцессора «Эльбрус-1С+» в промышленные встраиваемые системы.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Волин В.С., Кравцунов Е.М., Семенихин С.В., Фельдман В.М., Черепанов С.А. *Управление энергопотреблением процессорных ядер из операционной системы для прототипа вычислительного комплекса на базе микропроцессоров семейства «Эльбрус» // Вопросы радиоэлектроники. – 2014. – Сер. ЭВТ. – Вып. 4.*
2. Волин В.С., Щербина Н.А. *Анализ потребляемой мощности для опытных образцов СНК «МЦСТ-R1000» // Вопросы радиоэлектроники. – 2013. – Сер. ЭВТ. – Вып. 4.*
4. Кравцунов Е.М., Михайлов М.С., Семенихин С.В. *Использование прерываний системного контроля SCI для управления энергопотреблением микропроцессоров семейства «Эльбрус» // Вопросы радиоэлектроники. – 2015. – Сер. ЭВТ. – Вып. 1.*
5. Михайлов М.С., Беянин И.В., Воронцов М.В., Иванов А.А., Петраков П.Ю., Кравцунов Е.М., Ананьев Л.И., Пташко А.Б. *Патент на полезную модель № 158939 «Контроллер периферийных интерфейсов (КПИ-2)». Заявка № 2015144734/08. Опубликовано 20.01.2016. Бюл. № 2.*
6. *The Ondemand Governor: Past, Present, and Future, Venkatesh Pallipadi, Alexey Starikovskiy, Proceedings of the Linux Symposium 2006, p. 657.*

## **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ**

**Кравцунов Евгений Михайлович**, начальник отдела, АО «МЦСТ», ПАО «Институт

*электронных управляющих машин им. И.С. Брука»), 119334, Москва, ул. Вавилова, д. 24,  
(499)135-33-21, emkravts@mail.ru.*