

ЭКСТРЕМАЛЬНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ МОЩНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ АВТОМАТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

© 2007 Ю. А. Шиняков

Томский университет систем управления и радиоэлектроники

Рассмотрены структурно-функциональные схемы систем электроснабжения автоматических космических аппаратов с цифровыми и аналого-цифровыми экстремальными регуляторами мощности солнечных батарей. Предложена методика определения параметров систем автоматической оптимизации шагового типа.

Одной из основных проблем создания перспективных автоматических космических аппаратов (КА) является повышение энергетической эффективности систем электроснабжения (СЭС). При этом наиболее действенным способом является реализация режима непрерывного регулирования мощности солнечной батареи (СБ) в оптимальной рабочей точке, который предполагает введение в состав бортовой аппаратуры экстремального регулятора (ЭР), действие которого должно быть направлено на поиск оптимального напряжения СБ и выдачу на энергопреобразующие устройства (ЭПУ) такого задающего воздействия, при котором напряжение СБ регулируется на уровне, близком к экстремальному значению [1].

В СЭС автоматических КА широко используется шаговый метод поиска экстремума мощности СБ, так как согласование ЭР с зарядным устройством (ЗУ) и последовательным регулятором (РН), осуществляющим передачу энергии от СБ в нагрузку, реализуется достаточно просто путем дискретной перестройки цепи обратной связи в канале стабилизации напряжения СБ [2].

На начальном этапе развития и освоения систем экстремального регулирования мощности (ЭРМ) СБ использовалась наиболее простая схема с реализацией функции регулирования СБ в оптимальном режиме только зарядным устройством. Данная система ЭРМ СБ шагового типа впервые в мировой практике была испытана в 1988 году на КА «Фобос-2» во время перелета к Марсу. Испытания показали увеличение энергетической эффективности СЭС более чем на 20%

(пропорционально увеличению напряжения оптимальной рабочей точки СБ).

В дальнейшем был предложен ряд схемных технических решений, направленных на реализацию режима ЭРМ СБ не только зарядным устройством, но и устройством РН. На рис. 1 представлена усовершенствованная структурно-функциональная схема СЭС с поисковой системой шагового типа, реализующая экстремальное регулирование мощности СБ устройствами ЗУ и РН с использованием принципа смещения поддиапазона регулирования РН до уровня поддиапазона регулирования разрядного устройства РУ [3, 4].

Входящий в состав ЭРМ датчик мощности ДМ, обрабатывая информацию о напряжении и токе СБ в рабочей точке, формирует на выходе напряжение, пропорциональное текущему значению мощности, вырабатываемой СБ. По сигналу от синхронизирующего генератора Г это значение мощности запоминается в устройстве выборки и хранения УВХ, после чего по следующему сигналу генератора рабочая точка на вольтамперной характеристике (ВАХ) СБ смещается вследствие воздействия, осуществляемого корректирующим устройством КУ на усилитель ошибки УСО ШИМ ЗУ. Затем вновь измеренное значение мощности СБ сравнивается с предыдущим значением с помощью устройства сравнения УС.

Выходной сигнал УС воздействует на КУ, определяя направление последующего смещения рабочей точки на ВАХ СБ. При уменьшении мощности, генерируемой СБ, КУ изменяет направление поиска экстремума на противоположное. Одновременно УВХ

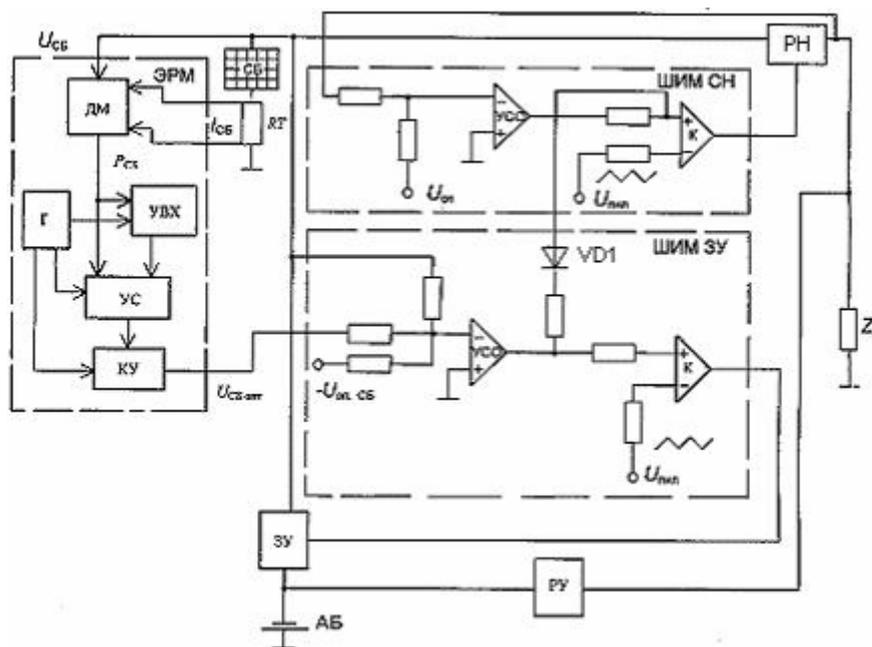


Рис. 1. Структурно-функциональная схема СЭС с ЭРМ шагового типа

запоминает новое текущее значение мощности СБ. В дальнейшем процесс повторяется.

Таким образом обеспечивается работа в режиме максимальной мощности СБ, при этом осуществляются непрерывные пробные (поисковые) колебания напряжения СБ вокруг оптимальной точки.

В режиме заряда АБ смещение рабочей точки на ВАХ СБ происходит из-за изменения длительности открытого состояния силовых ключей ЗУ. При превышении мощностью нагрузки мощности СБ ($P_H > P_{CB}$) ЗУ закрывается. В работу включается РУ, стабилизируя напряжение на выходе СЭС. При этом напряжение на СБ понижается, напряжение на выходе УСО ШИМ ЗУ принимает отрицательное значение и, воздействуя на компаратор К ШИМ РН через диод VD1, смещает поддиапазон регулирования выходного напряжения РН до уровня поддиапазона регулирования разрядного устройства (РУ).

При проектировании СЭС автоматических КА с ЭРМ СБ необходимо знать зависимость точности регулирования экстремума от шагового изменения напряжения стабилизации СБ ($\Delta U_{ст}$) и требуемое значение быстродействия ЭР, гарантирующего устойчивость системы при максимальной скорости дрейфа ВАХ.

В связи с существенной сложностью выражения, описывающего ВАХ реальной СБ, при определении и расчете характеристик системы экстремального регулирования целесообразно воспользоваться достаточно простой математической моделью СБ, где ВАХ задана тремя характерными точками: напряжением холостого хода U_{xx} , током короткого замыкания $I_{кз}$, оптимальными значениями тока $I_{опт}$ и напряжения $U_{онм}$ [5]. Уравнение ВАХ СБ при заданной температуре и освещенности имеет вид:

$$I = I_{кз} \left[1 - \left(1 - \frac{I_o}{I_{кз}} \right)^{\frac{U - U_{xx}}{U_o - U_{xx}}} \right]. \quad (1)$$

Вольтамперная (ВАХ) и вольтваттная (ВВХ) характеристики реальной солнечной батареи низкоорбитального КА с параметрами: $U_{xx}=42,2$ В, $U_{опт}=31$ В, $I_{опт}=50$ А, $I_{кз}=60$ А, построенные по приведенной выше формуле 1, представлены на рис. 2.

В системе автоматической оптимизации шагового типа возможное минимальное количество шагов два или три. Двухшаговый режим поиска экстремума мощности осуществляется, когда рабочая точка на ВАХ при очередном шаговом изменении U_{CB} совпада-

ет с оптимальной ($P_{СБ\text{макс}}$), а трехшаговый – когда занимает симметричное положение относительно $P_{СБ\text{макс}}$. На рис. 3 и в табл. 1 приведены зависимости мощности потерь $P_{\text{п}}$ от значения шагового изменения $U_{СБ}$ ($\Delta U_{\text{ст}}$), из анализа которых следует, что при пошаговом изменении $U_{СБ}$, не превышающем 2 В, гарантируется отбор экстремальной мощности от СБ с точностью не менее 98 % ($P_{\text{п}} < 2\% P_{\text{макс}}$).

Характеристики СБ (ВАХ, ВВХ) большинства объектов с течением времени изменяются со значительными скоростями. Поэтому для обеспечения работоспособности экстремального регулятора необходимо выполнение условия: $\Delta U_{\text{ст}}/\Delta t > \Delta U_{СБ\text{опт}}/\Delta t$, т. е. скорость изменения напряжения СБ экстремальным регулятором должна быть выше

скорости дрейфа напряжения оптимальной точки СБ. Опыт эксплуатации КА показывает, что наивысшая скорость дрейфа ВАХ наблюдается при выходе панелей СБ из тени. Причем скорость дрейфа, ввиду линейности изменения температуры панелей, в начальное время прогрева практически постоянная. Требуемое быстродействие экстремального регулятора в зависимости от значения шага $\Delta U_{\text{ст}}$ находится из выражения: $\Delta t = 1/f_{\text{эгр}} \leq \Delta U_{\text{ст}}/V_{СБ}$, где $V_{СБ}$ – скорость изменения напряжения СБ.

Однако это условие является достаточным лишь для случаев горизонтального дрейфа ВВХ СБ, т. е. при $P_{СБ\text{макс}}(t) = \text{const}$. Так как дрейф ВВХ сопровождается уменьшением экстремального значения мощности при прогреве панелей СБ, то возможен реверс систе-

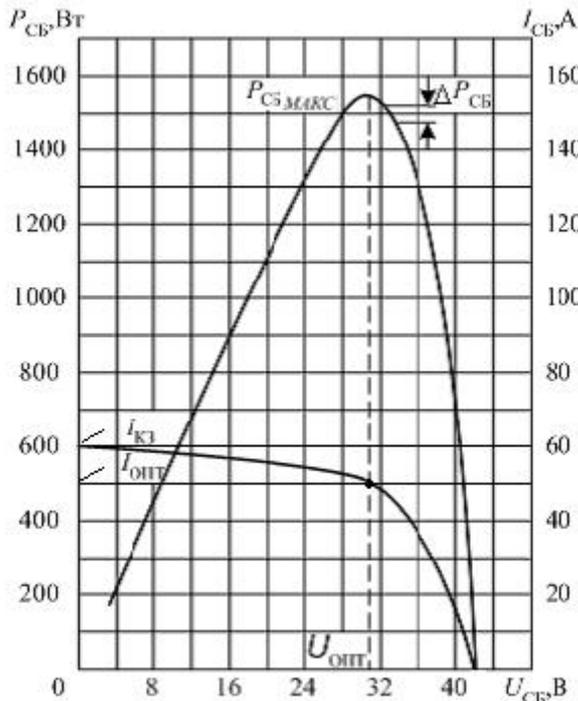


Рис. 2. Вольтамперная и вольтваттная характеристики СБ

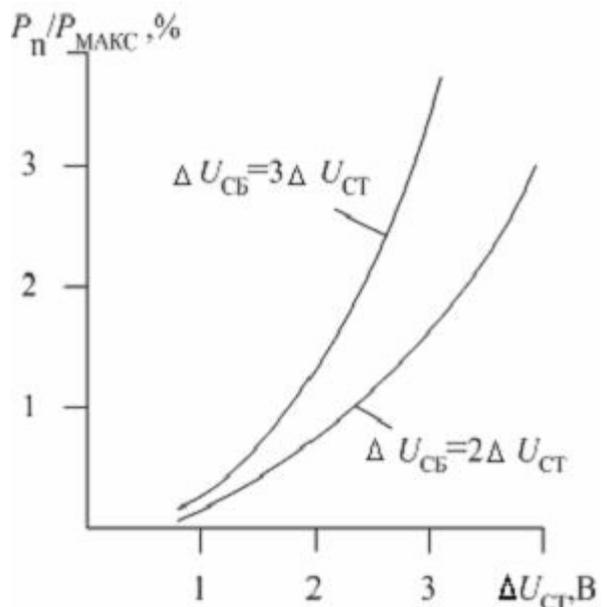


Рис. 3. Зависимость потерь энергии СБ на поиск от величины шага

Таблица 1

Параметр	Двухшаговый режим $\Delta U_{СБ} = 2\Delta U_{\text{ст}}$				Трехшаговый режим $\Delta U_{СБ} = 3\Delta U_{\text{ст}}$		
	1	2	3	4	1	2	3
$\Delta U_{\text{ст}}, \text{В}$	1	2	3	4	1	2	3
$P_{\text{п}}, \text{Вт}$ ($P_{\text{макс}} = 1553 \text{ Вт}$)	3	12	25,5	43	4	22	48
$P_{\text{п}}/P_{\text{макс}}, \%$	0,2	0,77	1,6	2,8	0,26	1,4	3,1

мы вследствие уменьшения мощности СБ даже при движении рабочей точки в сторону экстремума мощности (рис. 4). Поэтому для обеспечения устойчивости необходимо выполнение дополнительного условия: $\Delta P_{СБ} \geq 0$, т. е. увеличение мощности, вызванное шаговым изменением $U_{СБ}$, должно компенсировать ее уменьшение, обусловленное дрейфом характеристики.

Рассмотрим влияние дрейфа характеристик СБ (ВАХ, ВВХ) на поиск экстремума. Уравнение дрейфующей ВВХ, аппроксимированной квадратичной параболой, имеет вид:

$$P_{СБ}(U_{СБ}; t) = a(t)[U_{СБ} - U_{СБ\text{опт}}(t)]^2 + P_{СБ\text{макс}}(t), \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} P_{СБ\text{макс}}(t) &= P_{СБ\text{макс}}(t - \Delta t) + \Delta P_{СБ\text{макс}}(\Delta t); \\ U_{СБ\text{опт}}(t) &= U_{СБ\text{опт}}(t - \Delta t) + \Delta U_{СБ\text{опт}}(\Delta t); \\ a(t) &= a(t - \Delta t) + \Delta a(\Delta t). \end{aligned}$$

На основании приведенного уравнения параболы определяется выражение дляращения выходного сигнала при допущении, что характеристика дрейфует с малым искажением формы, т.е. $a(t) \gg \Delta a(t)$:

$$\Delta P_{СБ} = P_{СБ}(U_{СБ}; t) - P_{СБ}(U_{СБ} - \Delta U_{СБ}; t - \Delta t),$$

или

$$\begin{aligned} \Delta P_{СБ} &= 2a(t)\Delta U_{СБ}[U_{СБ} - U_{СБ\text{опт}}(t)] - \\ &- 2a(t)\Delta U_{СБ\text{опт}}(\Delta t)[U_{СБ} - U_{СБ\text{опт}}(t)] - \\ &- a(t)[\Delta U_{СБ} - \Delta U_{СБ\text{опт}}(\Delta t)]^2 + \Delta P_{СБ\text{макс}}(\Delta t). \end{aligned} \quad (3)$$

При заданных условиях дрейфа ($\Delta U_{СБ\text{опт}}(\Delta t)$; $\Delta P_{СБ\text{макс}}(\Delta t)$) можно определить соотношение длительностей шагов и значений единичного изменения $\Delta U_{СБ}$, обеспечивающее устойчивую работу шаговой экстремальной системы. Диапазон возможных значений параметра $a(t)$ находится при условии: $P_{СБ}(U_{СБ}, t) = 0$ и изменении $U_{СБ}$ от $U_{ХХ}$ до $2U_{СБ\text{опт}}$:

$$a(t) = \frac{P_{СБ\text{макс}}(t)}{[U_{СБ} - U_{СБ\text{опт}}(t)]^2}. \quad (4)$$

Требуемое значение шага $\Delta U_{СБ}$, обеспечивающее устойчивую работу системы, зависит от положения рабочей точки на исходной характеристике (рис. 4). Так, например, из-за нелинейности ВВХ вблизи экстремума при шаге $\Delta U'_{СБ}$ изменение мощности равно нулю, если рабочая точка находилась в точке А, и принимает отрицательное значение, если рабочая точка находилась в точке Б. Следовательно, для выполнения условия: $\Delta P_{СБ} \geq 0$ независимо от положения рабочей точки на исходной ВВХ должно быть: $\Delta U_{СБ} \geq U_{Б''}$.

Если рабочая точка при очередном шаговом изменении попадает в точку экстремума, то

$$\Delta P_{СБ} = \Delta P_{СБ\text{макс}}(\Delta t) - a(t)[\Delta U_{СБ} - \Delta U_{СБ\text{опт}}(t)]^2. \quad (5)$$

Принимая $\Delta P_{СБ} = 0$, получаем уравнение, определяющее зависимость $\Delta U_{СБ}$ от длительности шага системы Δt и параметра $a(t)$, характеризующего форму ВВХ:

$$\begin{aligned} a(t)\Delta U_{СБ}^2 - 2a(t)V_{U_{СБ}}\Delta t\Delta U_{СБ} + \\ + a(t)V_{U_{СБ}}^2\Delta t^2 - V_{P_{СБ}}\Delta t = 0, \end{aligned} \quad (6)$$

где $V_{U_{СБ}}$ и $V_{P_{СБ}}$ – соответственно скорости изменения оптимального напряжения и максимальной мощности СБ при дрейфе ВАХ, ВВХ.

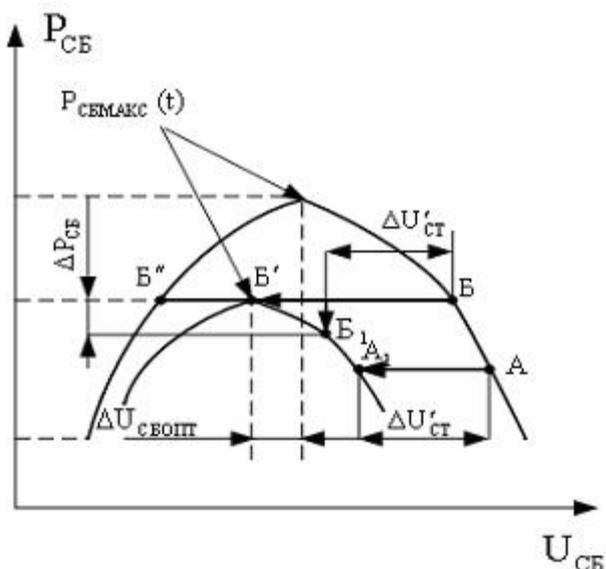


Рис. 4. Диаграммы дрейфа ВВХ СБ

Данное уравнение имеет два решения, которые соответствуют положительному и отрицательному шаговому изменению U_{CB} (отрезки Б", Б' и Б', Б на рис. 4). На рис. 5 приведены зависимости $\Delta U_{CT} = f(a)$ для различных значений Δt . При анализе использовались максимальные параметры дрейфа реальных СБ низкоорбитальных КА ($V_{U_{CB}} \approx 0,12$ В/с; $V_{P_{CB}} \approx 6$ Вт/с). Из анализа зависимости $\Delta U_{CT} = f(a)$ при различных Δt следует, что частота ЭШР реальной СЭС с шагом $\Delta U_{CT} = 2$ В, имеющей малые потери энергии на поиск экстремума ($P_{II} < 2\% \Delta P_{CB \text{ макс}}$), должна быть не менее 1 Гц.

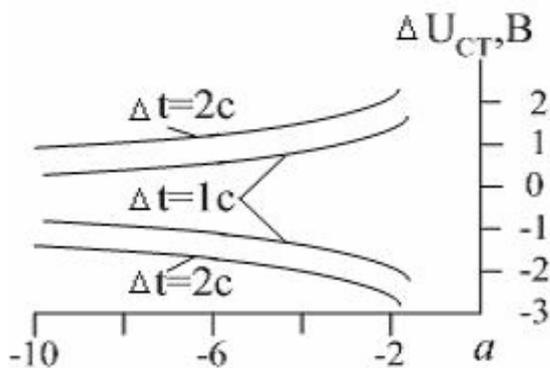


Рис. 5. Зависимости изменения ΔU_{CT} от параметра a для различной длительности шага системы

Таким образом, предлагается следующая методика определения характеристик систем автоматической оптимизации мощности СБ шагового типа:

а) определение значения шагового изменения напряжения СБ ΔU_{CT} , обеспечиваю-

щего требуемую точность при статической ВВХ;

б) вычисление требуемого быстродействия (времени шагового изменения U_{CB}), гарантирующего устойчивость системы при реальных параметрах дрейфующей ВВХ;

в) определение минимального изменения $P_{CB \text{ мин}}$ при статической ВВХ и расчет параметров шагового экстремального регулятора, обеспечивающего устойчивый поиск максимума мощности СБ.

Известны и нашли широкое применение в СЭС российских автоматических КА цифровые и аналого-цифровые экстремальные шаговые регуляторы.

На рис. 6 приведена структурно-функциональная схема ЭРМ в аналого-цифровом исполнении, впервые примененная и испытанная в СЭС КА «Фобос-2» [4].

Датчик мощности выполнен на операционных усилителях. Масштабные значения напряжения и тока СБ логарифмируются, складываются, после чего проводится операция антилогарифмирования. Полученное значение напряжения, пропорциональное мощности СБ, поступает на компаратор К и через ключ КТ1, управляемый сигналом с выхода 1 счетчика-распределителя СТ1, - на емкостный накопитель С. После появления сигнала на выходе 3 счетчика СТ1 изменяется код на выходе реверсивного счетчика СТ2. Выходной код счетчика СТ2 управляет ключами КТ2-КТ5, которые при коммутации изменяют коэффициент передачи делителя на

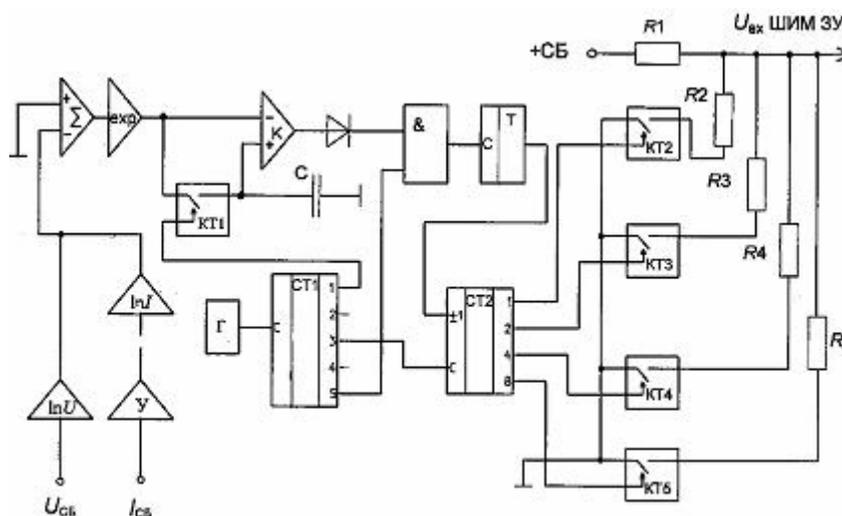


Рис. 6. Структурно-функциональная схема аналого-цифрового ЭРМ

резисторах R1-R5, а следовательно, и выходное напряжение ШИМ ЗУ, определяющее положение рабочей точки на ВАХ СБ. В случае, если после смещения рабочей точки значение мощности СБ уменьшается, на выходе компаратора К появляется положительное напряжение, и импульс с выхода 5 счетчика СТ1, поступающий на тактовый вход триггера Т, изменяет полярность напряжения на его выходе. При этом изменяется направление счета счетчика СТ2. В дальнейшем процесс повторяется.

Данная схема, обладая невысокой точностью определения $U_{\text{СБопт}}$ из-за наличия аналоговых устройств, параметры которых в значительной степени зависят от условий эксплуатации, позволяет обеспечить высокую надежность работы ЭРМ ввиду простоты и малого количества элементов, подверженных сбою при возможных электромагнитных помехах и просадках напряжения.

Дальнейшее развитие и совершенствование систем экстремального регулирования мощности СБ было связано с разработкой различных вариантов построения цифровых экстремальных шаговых регуляторов (ЭШР) [4, 6].

На рис. 7 приведена структурно-функциональная схема цифрового ЭРМ. В нем датчик мощности выполнен на базе цифроаналогового перемножителя. Напряжение, пропорциональное току СБ, с измерительно-

го шунта поступает на масштабирующий усилитель У, после чего преобразуется в восьмиразрядный двоичный код аналого-цифровым преобразователем АЦП. Код с АЦП и текущее значение напряжения СБ являются входными сигналами цифрового перемножителя, на выходе которого формируется цифровой код, соответствующий значению мощности, потребляемой от СБ в данный момент.

По тактовому импульсу со счетчика-распределителя этот код «запоминается» в регистрах РГ1 и РГ2. После изменения положения рабочей точки цифровой код, соответствующий новому значению мощности СБ, записывается в регистр РГ1 и сравнивается с предыдущим, хранящимся в регистре РГ2, с помощью цифрового компаратора ЦК. Появление на выходе А<В цифрового компаратора ЦК логической «1» означает снижение мощности СБ в результате шагового смещения положения рабочей точки. В этом случае направление поиска изменяется так же, как и в предыдущей схеме (рис. 6).

Из рассмотренных выше основных вариантов схемотехнической реализации принципа шагового регулирования мощности СБ очевидно, что незначительные аппаратные затраты, необходимые для коррекции диапазонов регулирования ЗУ и РН, позволяют обеспечить максимальную эффективность использования первичного источника энергии КА – солнечной батареи.

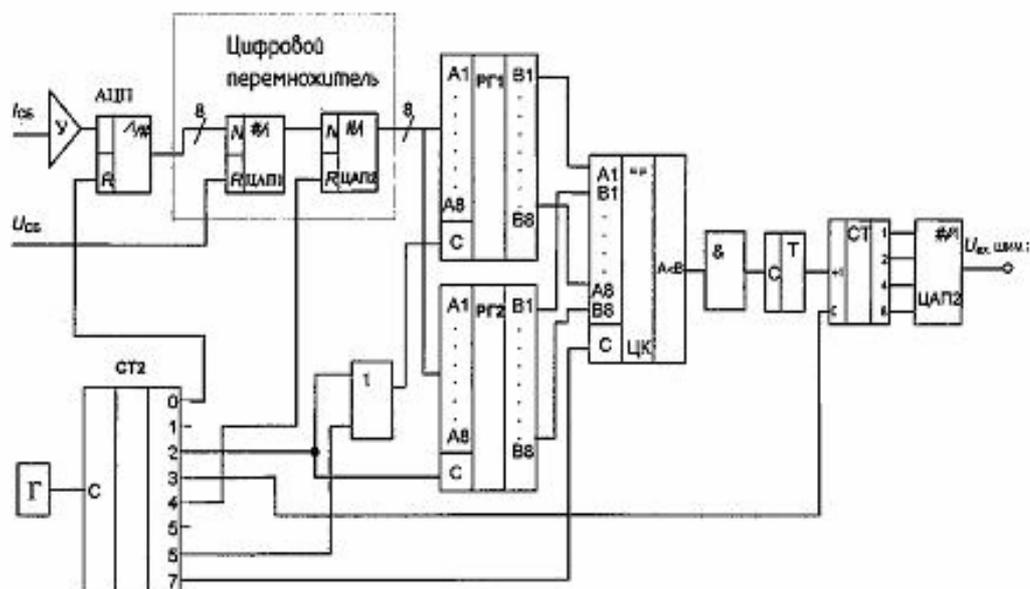


Рис. 7. Структурно-функциональная схема цифрового ЭРМ

Список литературы

1. Шиняков Ю. А. Эффективность использования солнечных батарей в автономных системах электроснабжения // Проблемы комплексного проектирования и испытаний энергетических устройств космических аппаратов. - Куйбышев, 1986. Вып. 3. - С. 58-59.
2. Чернышев А. И. Шиняков Ю. А., Гордеев К. Г. Экстремальный регулятор мощности для автономных систем электроснабжения / Материалы VIII Всесоюзн. конф. по космической технике. - Куйбышев, 1983. - С.45-52.
3. Пат. РФ № 2101831, МКИ⁶ Н 02 J 7/35. Система электропитания с экстремальным регулированием мощности фотоэлектрической батареи/ К. Г. Гордеев, С. П. Черданцев, Ю. А. Шиняков // Изобретения. 1998. №1.
4. Варианты построения экстремальных шаговых регуляторов мощности солнечных батарей / Шиняков Ю. А., Гордеев К. Г., Черданцев С. П., Обрусник П. В. // Труды ВНИИЭМ. Электромеханические устройства космических аппаратов. - М., 1997. Т.97. - С.83-92.
5. Привалов В. Д., Никифоров В. Е. Оценка эффективности применения экстремального регулятора в автономных СЭП. – Куйбышев: КПИ, 1981.
6. Экстремальный регулятор мощности солнечных батарей с двойным цифровым интегрированием / Гордеев К. Г., Поляков С. А., Обрусник П. В., Шпаковская Г. К. // Электронные и электромеханические системы и устройства: Сб. науч. трудов НППЦ «Полюс». - Томск, 2001. - С. 74-77.

**EXTREMAL REGULATION OF AUTOMATIC SPACE VEHICLE
SOLAR BATTERY POWER**

© 2007 Yu. A. Shinyakov

Tomsk University of Control Systems and Radioelectronics

The paper presents structural functional schemes of electric supplies for automatic space vehicles with digital and analogue-digital extremal regulators of solar battery power. A procedure for defining parameters of step automatic optimization systems is proposed.