

О применении керамических конденсаторов в цепях питания на системных (материнских) компьютерных платах

(Окончание. Начало см. в «РХ» №5/2007, с.55-59)

Ярослав Малов, г.Малоярославец

2.4. Концепция модели

В первом приближении модель системы питания выглядит, как изображено на **рис. 14**:

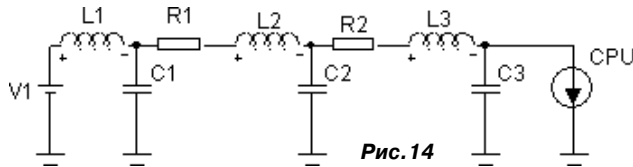


Рис. 14

Здесь:

источник напряжения $V1$ и дроссель $L1$ - имитируют понижающий конвертер,

$C1$ - батарея электролитических блокирующих конденсаторов, установленных в непосредственной близости от выходного дросселя $L1$,

$R1$ и $L2$ - паразитные ESR и ESL шин питания от $C1$ до $C2$ (проводники, пайки),

$C2$ - батарея керамических блокирующих конденсаторов **возле процессорного разъёма**,

$R2$ и $L3$ - суммарные паразитные ESR и ESL цепей питания от $C2$ до $C3$ (проводники, пайки, контакты разъёма, ножки (выводы) процессора, проводники в корпусе процессора от выводов до места расположения $C3$),

$C3$ - батарея керамических блокирующих конденсаторов **возле кристалла процессора**, расположенная непосредственно **на корпусе процессора**.

Программируемый источник тока CPU имитирует потребление тока ядром процессора.

Работу схемы, с учетом сказанного выше, можно объяснить следующим образом:

$C3$ поддерживает напряжение питания ядра процессора в допустимых пределах при скачках потребления, пока ток от $C2$ через $R2L3$ не изменится соответствующим образом. Основная причина замедленного изменения тока здесь - индуктивность $L3$. Дополнительно $C3$ подавляет до безопасного уровня шум и наводки от работающего процессора.

$C2$ выполняет ту же роль по отношению к $C3$, пока ток от $C1$ через $R1L2$ не изменится. Основная причина замедленного изменения тока здесь - индуктивность $L2$ и паразитная внутренняя последовательная индуктивность ЭК $C1$, не показанная на схеме. Также $C2$ разгружает $C1$ от скоростных перепадов тока (тем самым уменьшая выделяющуюся на нём мощность, т.е. снижая нагрев ЭК) и дополнительно ослабляет шум и наводки.

$C1$ поддерживает напряжение питания всех последующих цепей в допустимых пределах, пока конвертер не отреагирует на изменение тока потребления. Основная причина замедленного изменения тока здесь - время реакции конвертера на изменение тока нагрузки. Это хорошо иллюстрирует **рис. 15** из [17], стр.25:

- A capacitor functions as a buffer to supply an instantaneous current at a stable voltage.

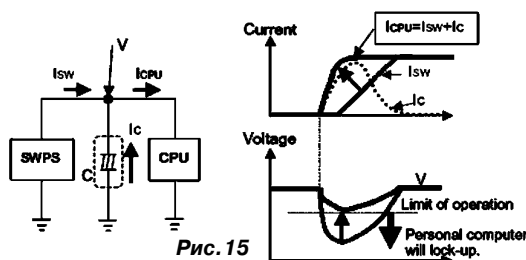


Рис. 15

3. Схемотехническое моделирование в программе Micro-Cap 8

Поставим себе цель выяснить, как зависят размах пульсаций питающего напряжения непосредственно на кристалле процессора V_{cpu} и мощность, рассеиваемая на ЭК от количества и места подключения КК.

3.1. Схемы для моделирования

При выборе схемы для моделирования автор статьи исходил из следующих соображений:

а) в большинстве плат под mPGA478, так же как и под LGA775, применяются многофазные ШИМ-конвертеры (2...4-фазные);

б) паразитные параметры медных печатных проводников не существенно зависят от типа применяемого процессора. А учесть разводку какой-то конкретной платы затруднительно, в т.ч. и по причине наличия внутренних слоёв. По крайней мере, если задаться целью только выяснить степень влияния ёмкости и расположения КК на тепловыделение в ЭК, эту часть схемы можно оставить неизменной;

в) примерные соотношения между паразитными параметрами различных процессорных разъёмов можно определить из **таблиц 4 и 5**, и при проведении моделирования для конкретного разъёма следует изменить номиналы соответствующих элементов схемы;

г) для моделирования поведения схемы с конкретным процессором необходимо задать параметры перепада тока (для источника тока I_{PWL}) в соответствии с быстройдействием и максимальным/минимальным потреблением данного процессора; эти параметры приводятся в справочных данных производителя процессора.

Поэтому за основу была взята схема, предложенная в [15], стр.71-79. Доработанный вариант схемы представлен на **рис. 16**. По сравнению с оригинальной схемой был изменен номинал $R1$ и удалены элементы, моделирующие паразитные параметры лабораторного инструмента

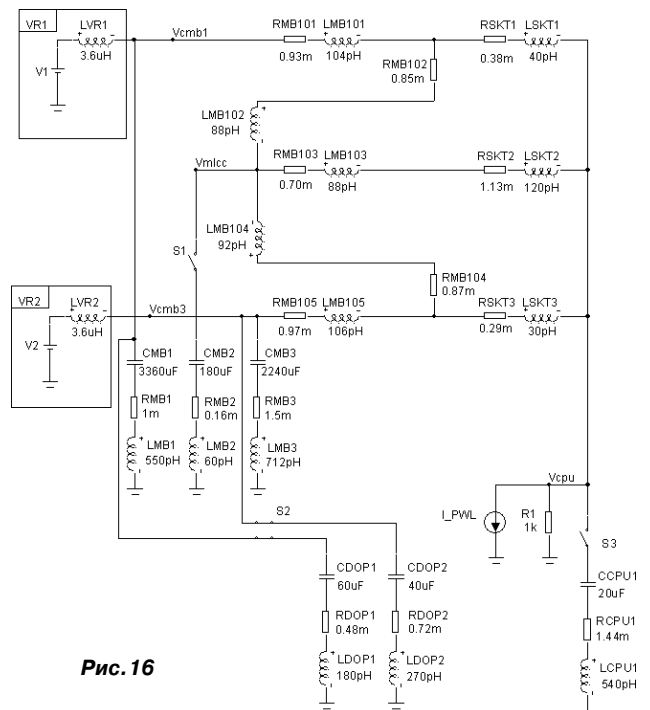


Рис. 16

(внешнего нагрузочного устройства и адаптера-позиционера). Добавлены модели конденсаторов CDOP1, CDOP2, CСPU1, выключатели S1...S3, источники напряжения V1, V2 и их выходные дроссели LVR1, LVR2. Для моделирования платы с однофазным конвертером под PGA-370 можно использовать упрощенный вариант схемы на **рис. 17**.

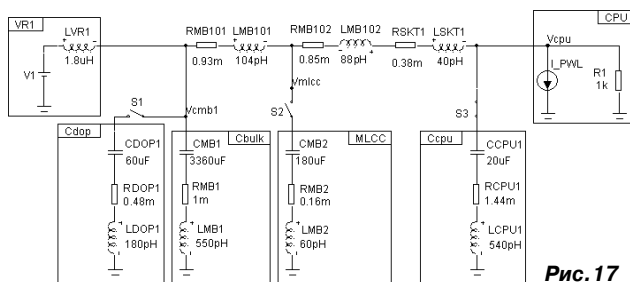


Рис. 17

Необходимо отметить следующие недостатки используемой модели:

- в обеих схемах использованы простейшие 3-элементные схемы замещения ЭК и КК, не учитывающие изменений основных параметров конденсаторов с температурой, напряжением, частотой;
- схемы не учитывают ограниченное быстродействие ШИМ-конвертера, поэтому в реальности выделяемая на ЭК мощность гораздо выше;
- в схемах не учитываются паразитные параметры соединений **между** ЭК в батарее;
- в реальных процессорах возле кристалла расположены специальные КК меньшей ёмкости со значительно пониженной индуктивностью и сопротивлением, поэтому в реальности пульсации подавляются **лучше**, чем показывает моделирование.

3.2. Описание схемы (рис. 16).

V1, V2 - источники постоянного напряжения 1,5 В;
LVR1 - выходная катушка индуктивности (дроссель) первого понижающего преобразователя (VR1);

LVR2 - выходной дроссель второго понижающего преобразователя (VR2);

CMB1, RMB1, LMB1 - соответственно суммарные ёмкость, эффективное последовательное сопротивление (ESR), эквивалентная последовательная индуктивность (ESL) батареи электролитических конденсаторов на выходе VR1;

CMB3, RMB3, LMB3 - то же самое на выходе VR2;

CDOP1, RDOP1, LDOP1 - соответственно суммарные ёмкость, ESR, ESL дополнительных керамических конденсаторов, подпаиваемых к выводам электролитических конденсаторов на выходе VR1 (можно отключить выключателем S2);

CDOP2, RDOP2, LDOP2 - то же для VR2

CMB2, RMB2, LMB2 - соответственно суммарные ёмкость, ESR, ESL батареи керамических многослойных (MLCC) конденсаторов, расположенных в непосредственной близости от процессорного разъёма - сокета (можно отключить выключателем S1);

RMB101 и LMB101 - паразитные сопротивление и индуктивность проводников от выходного дросселя VR1 до точки подключения сокета (с «северной» стороны);

RMB105 и LMB105 - то же для VR2 с «южной» стороны сокета;

RMB102 и LMB102 - паразитные сопротивление и индуктивность проводников от точки подключения сокета с «северной» стороны до середины центрального выреза в соquete;

RMB104 и LMB104 - то же с «южной» стороны;

RMB103 и LMB103 - паразитные сопротивление и индуктивность проводников от середины центрального выреза в соquete до точки подключения с «южной» стороны сокета;

RSKT1, LSKT1 - паразитные сопротивление и индуктивность «северного» сегмента сокета;

RSKT2, LSKT2- то же для центрального сегмента сокета;

RSKT3, LSKT3- то же для «южного» сегмента сокета;
CСPU1, RСPU1, LСPU1 - соответственно суммарные ёмкость, ESR, ESL керамических конденсаторов, расположенных непосредственно на процессоре (можно отключить выключателем S3).

Параметры контактов сокета и выводов процессора

Таблица 4. Индуктивность

Разъём	Индукт. пары контактов (Лпары)	Число контактов Vcc (NVcc)	Число контактов Vss (NVss)	Общая индуктивность (Лобщ.)	Ссылка на первоисточники
PGA370	3,5 нГн	74	74	47 пГн	[18, 12]
mPGA478	3,3 нГн	85	180	29 пГн	[19, 20]
LGA775	3,9 нГн	226	273	15 пГн	[21, 22]

Таблица 5. Сопротивление

Разъём	Сопрот. пары контактов (мх) (Rпары)	Число контактов Vcc (NVcc)	Число контактов Vss (NVss)	Общее сопротивление (Rобщ.)	Ссылка на первоисточники
PGA370	25 мОм	74	74	0,3 мОм	[18, 12]
mPGA478	25 мОм	85	180	0,2 мОм	[19, 20]
LGA775	28 мОм	226	273	0,1 мОм	[21, 22]

Примечания к таблицам 4 и 5 :

1. Число контактов питания (Vcc) и земли (Vss) может варьироваться в небольших пределах в зависимости от модели процессора.

2. Общие индуктивность и сопротивление вычислялись с последующим округлением по формулам:

$$\text{Лобщ.} = \text{Лпары} / \text{NVcc} / 2 + \text{Лпары} / \text{NVss} / 2, \\ \text{Rобщ.} = \text{Rпары} / \text{NVcc} / 2 + \text{Rпары} / \text{NVss} / 2.$$

3.3. Результаты моделирования

Проведём моделирование для конфигурации, состоящей из 2-фазного ШИМ-конвертера и процессора Пентиум-4 3000 МГц (см. рис. 16).

Параметры фильтра оставим прежними (принятые для более мощных процессоров в LGA775-корпусе, они с запасом должны удовлетворять потребности выбранного процессора).

Для возможности пошагового варьирования параметров отметим, что батареи ЭК (CMB1 и CMB3) составлены соответственно из шести и четырёх ЭК ёмкостью по 560 мкФ, ESR=6 мОм, ESL=3,3 нГн. Параметр одного КК: C=10 мкФ, ESR=2,88 мОм, ESL=1080 пГн. Для удобства параметры батарей таких конденсаторов сведены в **таблицу 6**:

C, мкФ	10	20	40	60	100
ESR, мОм	2,88	1,44	0,72	0,48	0,288
ESL, пГн	1080	540	270	180	108

Паразитные параметры контактов сокета RSKT1...RSKT3 и LSKT1...LSKT3, в соответствии с таблицами 4 и 5 увеличим в 2 раза по сравнению с исходными, соответствующими разъёму LGA775.

Осталось решить вопрос с величиной и длительностью испытательного перепада тока.

В руководствах по разработке конвертеров питания ядра процессоров Пентиум-3 ([6], стр.14) и Пентиум-4 ([23], стр.11 и [17], стр.7) приведены параметры перепада

дов тока в некоторых наихудших степенях обстоятельств - см. **рис. 18** (из [17], стр.7.) и примечания к нему.

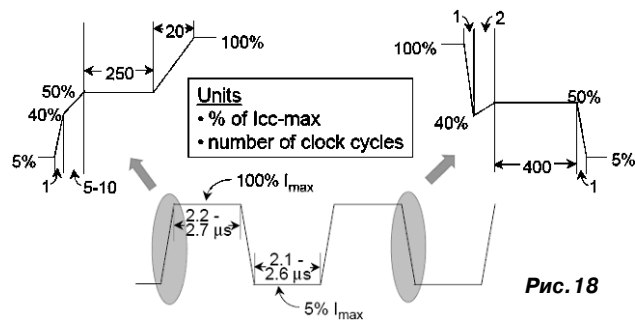


Рис. 18

Примечания к рис. 18:

- Продолжительность периодов максимальной и минимальной нагрузки зависят от быстродействия процессора: более быстрый процессор имеет меньшую продолжительность.
- Другие управляемые операционной системой события могут иметь время нарастания от 700 тактов.
- Наихудшее стечение обстоятельств может заставить ток потребления процессора совершить цикл переходов 100% -> 40% -> 100% за 30-50 тактов.

Запрограммируем источник тока I_PWL для имитирования одного периода перепада, показанного в верхней части рис. 18.

Из документации на процессор выясним, что максимальный ток потребления выбранного процессора составляет 64,8 А. Время одного такта - 0,333 нс.

3.3.1. Влияние места подключения и ёмкости КК

Разомкнём все выключатели (рис. 16). Составим «тестовую» батарею КК 20 мкФ с параметрами согласно табл.6 и будем подключать её поочередно к точкам Vcpu (опыт 1), Vmlcc (опыт 2). Подключение к ЭК (СМВ1 и СМВ3) проведем в 3 вариантах - сначала по 10 мкФ (опыт 3), затем по 20 мкФ (опыт 4), потом смоделируем ситуацию, когда на выводы каждого отдельного ЭК напаян КК 10 мкФ (опыт 5).

Результаты моделирования для каждого случая в порядке перечисления сведены в **табл. 7**:

Таблица 7

№ опыта	Точка подключения	Суммарная ёмкость КК, мкФ	Суммарная рассеиваемая на ЭК мощность, мВт	Размах пульсаций от пика до пика, В
1	Vcpu	20	4,905	0,385
2	Vmlcc	20	4,519	2,7
3	СМВ1 и СМВ3	20	8,817	2,9
4	СМВ1 и СМВ3	40	5,485	0,068
5	СМВ1 и СМВ3	100	3,010	1,597

Таблица 8

№ опыта	Точка подключения	Суммарная ёмкость КК, мкФ	Суммарная рассеиваемая на ЭК мощность, мВт	Размах пульсаций от пика до пика, В
Стандартный	--	--	1,009	0,12
1	Vcpu	20	0,943	0,15
2	Vmlcc	20	1,196	0,1
3	СМВ1 и СМВ3	20	0,745	0,12
4	СМВ1 и СМВ3	40	0,475	0,1
5	СМВ1 и СМВ3	100	0,357	0,1
Проверочный	Vmlcc	100	5,02	0,08

Примечания к таблицам 7 и 8:

- рассеиваемая на ЭК мощность вычислялась как интеграл по времени анализа (3,5 мкс);
- размах пульсаций замерялся по построенному программой графику, причем пики и провалы шириной менее 100 нс игнорировались - такая возможность предоставлена корпорацией Интел в [15] на стр. 25;
- в таблице 7 в строках 2, 3 и 5 размах пульсаций превышает напряжение питания - опечатки здесь нет, именно так и показывает Micro-Cap. Вызвано это тем, что, в отличие от реальной платы, мы отключили в модели все конденсаторы с целью определить наивыгоднейшую точку подключения КК.

С учетом результатов опытов 1...3 можно отметить, что в данном случае (т.е. в отсутствие других КК) при прочих равных условиях наибольшее снижение тепловыделения в ЭК дает подключение тестового конденсатора возле сокета процессора. Производители плат именно там и размещают все КК. Но из результата опыта 5 видно, что есть возможность к улучшению ситуации. (Резкое снижение пульсаций в опыте 4 (табл.7) связано, по видимому, с непреднамеренным резонансным эффектом в модели - не подлежит сомнению, что без конденсаторов на корпусе процессор работать не сможет.)

Теперь определим, как поведет себя плата с уже смонтированными компонентами фильтров. Для выяснения этого замкнем в нашей модели выключатели S1 и S3 - тем самым мы приводим нашу модель к, казалось бы, «идеальному» (т.е. стандартному, рекомендованному изготовителем процессора) состоянию, и снова проведем моделирование. Вначале - совсем без «тестового» конденсатора («стандартный» отсчёт), а затем с поочередным подключением в уже перечисленном выше порядке. Результаты - в **таблице 8**:

Занятая ситуация! В этот раз наибольшее снижение выделяемой мощности происходит при подключении тестового конденсатора непосредственно к ЭК, а при подключении возле сокета наблюдается даже некоторое увеличение этого параметра!

Но самое интересное - в результатах опытов 4 и 5 (табл.8). Из них следует, что даже если компьютерная системная плата была разработана в **полном** соответствии с рекомендациями Интел, и производитель установил на плату все КК (что бывает очень и очень редко),

можно снизить тепловыделение на ЭК не менее чем в 2,8 раза!

И всех затрат при этом - цена КК в количестве, равном числу ЭК (или цена неисправной платы, с которой их можно выпаять).

Но давайте проверим себя - быть может, эффект вызван простым увеличением (на 100 мкФ) общей ёмкости КК в цепи питания? Для этого отключим от ЭК наши тестовые конденсаторы и подключим к точке Vmlcc дополнительный КК ёмкостью 100 мкФ (остальные параметры - в табл.6). Результат - в нижней строке табл.8 - позволяет сделать следующие выводы.

3.3.2. Выводы

Во-первых, напайка КК на выводы ЭК необходима, т.к. реально позволяет **в разы** снизить выделяемую на них мощность (и соответственно повысить их долговечность).

Во вторых, безоглядное увеличение сверх рекомендованной корпорацией Интел ёмкости КК

возле сокетa процессора может привести к противоположному результату - принцип «кашу маслом не испортишь» здесь неприемлем.

В третьих, если на плате вокруг сокетa процессора слишком много пустых посадочных мест под КК в корпусе 1206, стоит задуматься об их допайке на некоторые из этих мест. Но окончательное решение можно принимать только после того, как вы ознакомились с документацией на свой процессор, выяснили рекомендуемые фирмой Интел количество, размер и емкость КК и убедились, что на вашей плате их явно недостаточно.

4. Практические рекомендации по допайке КК на выводы ЭК

На выводы каждого ЭК, стоящего перед и после каждого дросселя ШИМ-конвертера, надо напаять один или несколько КК общей ёмкостью около 10 мкФ на один ЭК.

4.1. Подготовка

Для удобства и безопасности (в плане сохранности системной платы) следует использовать маленькие вспомогательные платы 9 на 4 мм из односторонне фольгированного стеклотекстолита с отверстиями в соответствии с расстоянием между выводами конкретного ЭК. Автор использовал двухсторонний фольгированный стеклотекстолит и острым ножом расщепил его на два односторонних листа. Допустимая толщина заготовок определяется длиной выступающей части выводов ЭК над поверхностью системной платы, во многих случаях будет достаточно толщины 0,5 мм.

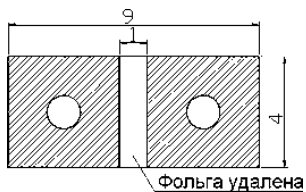


Рис. 19

Фольга между отверстиями на плате должна быть удалена (но не вся! только узкая полоса поперек линии, соединяющей отверстия), ширина разреза фольги 1 мм, эскиз приведен на рис. 19.

На эти платы сначала напаяем КК, затем надеваем платы на выводы ЭК и аккуратно пропаиваем.

4.2. Проведение работ

ВАЖНО!!! Перед работой все комплектующие (процессор, память, платы расширения, кабели, батарейка и т.п.) с платы должны быть сняты.

Внимание! Если ЭК стоят в ряд и выводы у всех на одной линии, убедитесь, что вы не ошиблись и не надели плату на выводы разных соседних конденсаторов.

Ещё раз **Внимание!** Платы следует устанавливать деталями и фольгой **НАРУЖУ** от системной платы!

Пять хорошо прогретым низковольтным паяльником с жалом, гальванически соединённым с общим проводом системной платы.

Каждый напаяемый КК должен быть проверен на отсутствие короткого замыкания (КЗ).

Каждая подсобранная вспомогательная плата должна быть проверена на отсутствие КЗ.

После завершения напайки на выводы ЭК **до подачи питания** должна быть опять проведена проверка на отсутствие КЗ.

4.3. Включение и проверка

Процедура известная, но всё же кратко о ключевых моментах.

Только убедившись, что нигде нет короткого замыкания, можно подключить системную плату (без процессора и комплектующих!) к БП и попытаться её включить (**берегите глаза!** Всякое случается...). Если фейерверка не последовало, проверяем номиналы всех напряжений. Если всё в порядке - **отключаем питание**, устанавливаем только процессор и динамик и снова включаем питание.

Если процессор стартовал и программа POST стала подавать характерные звуковые сигналы из-за отсутствия

оперативной памяти - отключаем питание и устанавливаем остальные комплектующие.

Задать вопрос можно в конференции http://www.rom.by/forum/Электролитические_конденсаторы

Автор данной статьи присутствует там под ником Ter_Abit.

Схемный файл для программы Micro-Cap 8 (совместим и с седьмой версией этой программы) доступен для скачивания

Автор выражает благодарность модераторам и участникам указанной конференции за конструктивное обсуждение и А.Сорокину за содержащийся в его статье [1] толчок к размышлениям в правильном направлении.

Литература.

1. Сорокин А. Особенности применения оксидных конденсаторов в цепях питания микропроцессоров. - Радио, 2003, №1, с. 20
2. www.rom.by
3. ALUMINUM ELECTROLYTIC CAPACITORS CAT. No. E1001G (Ver.2). Nippon Chemi-Con. (al-productionguide-e-070315.pdf с сайта Nippon Chemi-Con).
4. Aluminum Electrolytic Capacitors General technical information. EPCOS.(PDF_GeneralTechnicalInformation.pdf с сайта EPCOS).
5. Aluminum Electrolytic Capacitors 10.2006. SANYO. (EC_E.pdf с сайта SANYO).
6. VRM 8.5 DC-DC Converter Design Guidelines (24965902.pdf, www.intel.com).
7. Intel(r) Pentium(r) 4 Processor in 478-pin Package and Intel(r) 845G/845GL/845GV Chipset Platform Design Guide (29865402.pdf, www.intel.com).
8. Solid Electrolytic Capacitors with Functional Polymer RE Series R5 Type. FUJITSU. (re-r5e.pdf с сайта FUJITSU).
9. Multilayer ceramic capacitors. General technical information. October 2006. EPCOS. (PDF_General.pdf с сайта EPCOS).
10. Мелешин В. Транзисторная преобразовательная техника. Издательство «Техносфера», 2005г.
11. Multilayer ceramic capacitors. Chip capacitors, Advanced series, C0G and X7R. October 2006 (AS_C0G_X7R_CC.pdf с сайта EPCOS).
12. Intel(r) Pentium(r) III Processor with 512KB L2 Cache at 1.13GHz to 1.40GHz (24965704.pdf, www.intel.com).
13. Low Voltage Intel(r) Pentium(r) III Processor 512K Dual Processor Platform Design Guide (27367401.pdf, www.intel.com).
14. Pentium(r) III Processor Power Distribution Guidelines Application Note. April 1999. (24508501.pdf, www.intel.com).
15. Voltage Regulator-Down (VRD) 11.0 Processor Power Delivery Design Guidelines For Desktop LGA775 Socket (31321402.pdf, www.intel.com).
16. Voltage Regulator-Down (VRD) 10.1 Design Guide For Desktop LGA775 Socket (30235604.pdf, www.intel.com).
17. Specialty Polymer Aluminum Electrolytic Capacitors. TECHNICAL GUIDE. Panasonic Industrial Company (SP-Cap_2004-technical-guide.pdf, www.panasonic.com).
18. 370-Pin Socket (PGA370) Design Guidelines (24441002.pdf, www.intel.com).
19. Intel(r) Pentium(r) 4 Processor 478-Pin Socket (mPGA478) Design Guidelines (24989002.pdf, www.intel.com).
20. Intel(r) Pentium(r) 4 Processor with 512-KB L2 Cache on 0.13 Micron Process Datasheet (29864310.pdf, www.intel.com).
21. LGA775 Socket Mechanical Design Guide (30266603.pdf, www.intel.com).
22. Intel(r) Pentium(r) 4 Processor 6xx Sequence and Intel(r) Pentium(r) 4 Processor Extreme Edition Datasheet (30638203.pdf, www.intel.com).
23. Intel Pentium 4 Processor VR-Down Design Guidelines (24989104.pdf, www.intel.com).

Курсы дистанционного обучения программированию:

Микроконтроллеров AVR, PIC, x51 (ассемблер и C); ПЛИС, USB, GSM, ZigBee, компьютеров (VB, VC++) и др. Разработка электронных устройств и программ на заказ.

e-mail: b_teach@mail.ru, micro51@mail.ru



Редакция «Радиолюбби» с глубоким прискорбием извещает о скоростной кончине одного из соучредителей нашего журнала - Суховой Елены Владимировны, последовавшей 19 ноября с.г. на 48-м году жизни. Имея высшее радиотехническое образование, она внесла неоценимый вклад в дело организации и развития хозяйственного и бухгалтерского секторов, а также в свое время предложила и собственное название журнала.

Светлая память о Елене Владимировне навсегда останется в наших сердцах.