

О ПРИМЕНЕНИИ КЕРАМИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРОВ В ЦЕПЯХ ПИТАНИЯ НА СИСТЕМНЫХ (МАТЕРИНСКИХ) КОМПЬЮТЕРНЫХ ПЛАТАХ

1. Вступление.

Всё началось с того, что автор этой статьи попытался запустить на своей системной плате Abit BE 6-II втрое более скоростной процессор Celeron 1100 МГц вместо нормально работавшего до этого Pentium-II 350 МГц. Несмотря на то, что предварительно были выполнены рекомендации [1] и [2], процессор не стартовал и не выполнил процедуру самопроверки по включению – POST. Пришлось глубже изучать вопрос питания процессора с использованием документации от производителей процессоров, микросхем ШИМ-конвертеров, конденсаторов и программы моделирования. Результаты, по мнению автора, могут заинтересовать владельцев не только устаревших, но и вполне современных компьютерных систем.

ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ:

Внимание! Все написанное ниже не является призывом или руководством к действию.

Все действия вы предпринимаете на свой страх и риск, полностью осознавая их потенциальную опасность. Автор не несет ответственности за вред, причиненный вашему здоровью, имуществу или данным, связанный с данной публикацией.

Если производительность и устойчивость работы компьютера Вас удовлетворяют, а электролитические конденсаторы на выходах и входах ШИМ-конвертеров питания CPU, RAM, AGP при полной загрузке процессора только чуть теплее окружающего воздуха – ничего не предпринимайте и оставьте всё как есть!

Помните, что любое изменение схемы системной платы лишит вас гарантии.

2. Теоретическая часть.

Перевод цитат выделен курсивом. Если и рисунок, и текст взяты из одного первоисточника – дополнительная ссылка для рисунка не указывается. Если текст от автора или цитата проиллюстрирована рисунком из другого источника – в подписи к рисунку приведена ссылка.

Для лучшего понимания дальнейшего текста следует отметить, что в цитируемой документации принята следующая терминология:

Bulk Decoupling – ёмкостный фильтр на выходе понижающего импульсного преобразователя (конвертера), составленный из электролитических конденсаторов с нормируемыми эквивалентным последовательным сопротивлением (ESR), эквивалентной последовательной индуктивностью (ESL), допустимой рассеиваемой мощностью и максимальной рабочей температурой. В дальнейшем будем называть его просто электролитическими конденсаторами (ЭК).

High frequency decoupling (в последних по времени документах – mid frequency decoupling) – высокочастотный (среднечастотный) ёмкостный фильтр непосредственно возле процессорного сокета, составленный из высококачественных низкоиндуктивных SMD (бескорпусных, для поверхностного монтажа) многослойных керамических конденсаторов с диэлектриком X5R (для современных процессоров - X7R). В дальнейшем будем называть его керамическими конденсаторами (КК).

2.1. Основные свойства конденсаторов.

Попытаемся глубже разобраться в свойствах ЭК, КК и их паразитных параметров – ESR и ESL, для этого обратимся к документации именитых производителей конденсаторов.

2.1.1. Электролитические конденсаторы.

«Алюминиевые ЭК содержат внутренний элемент из свёрнутых вместе фольги анода, фольги катода и бумажного сепаратора, пропитанного электролитом (Рис.1.). Внешние выводы присоединены к фольге катода и фольге анода.»

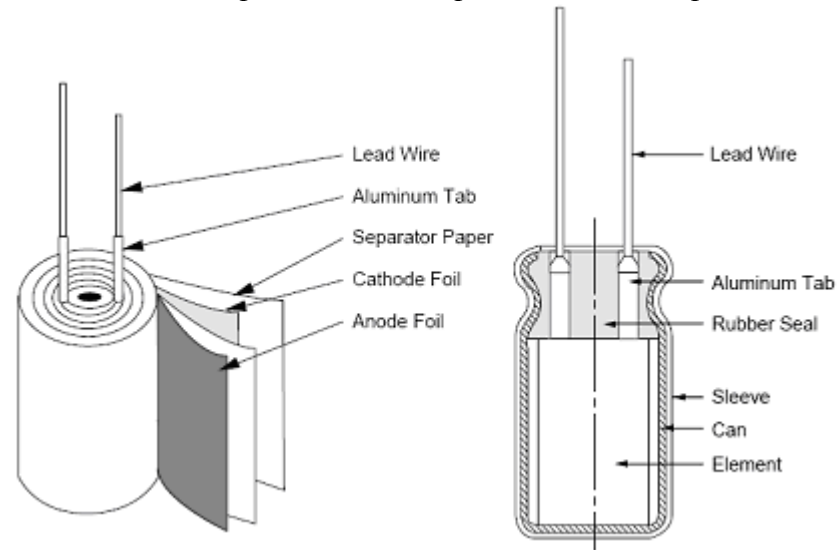


Рис.1. Конструкция алюминиевого ЭК.

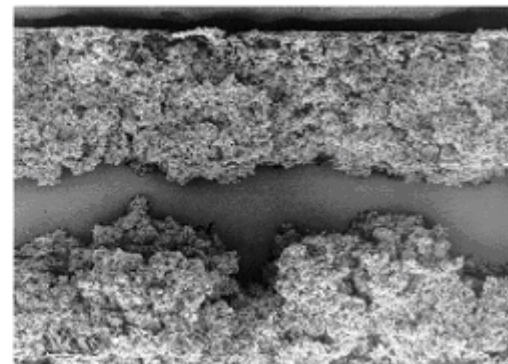
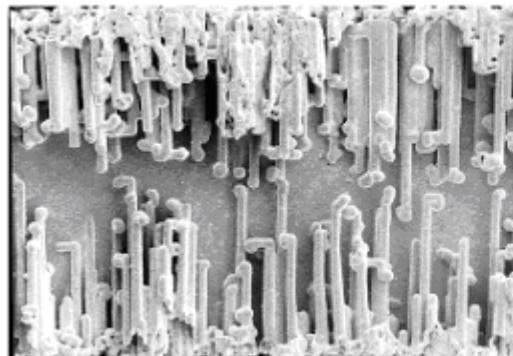


Рис.2а. Увеличение 400х. Слева – анод высоковольтного конденсатора, справа – низковольтного. – фото из [4], стр.3.

Емкость ЭК, как и любого другого конденсатора, растёт с увеличением диэлектрической проницаемости диэлектрика, с увеличением площади обкладок и с уменьшением толщины диэлектрика. Диэлектрическая проницаемость слоя оксида алюминия находится в пределах от 8 до 10, что не так уж много по сравнению с другими типами конденсаторов. Однако, толщина слоя диэлектрика из окиси алюминия является предельно тонкой (около 15 ангстрем на вольт) и площадь поверхности обкладок очень велика. Электрохимическая формовка электродов <...> в 20...100 раз увеличивает площадь обкладок по сравнению с геометрической площадью проекции (см. рис.2а). <...>

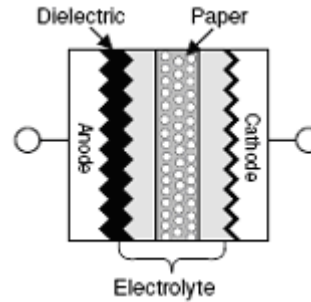


Рис. 2б.– из [5], стр. 18.

Электролит, или проводящая электричество жидкость, контактируя со слоем диэлектрика (окиси алюминия), выполняет функции настоящего катода, тогда как фольга катода служит для электрического контакта между электролитом и выводом (рис.2б). Сепаратор удерживает электролит и предотвращает короткое замыкание между фольгой катода и фольгой анода.

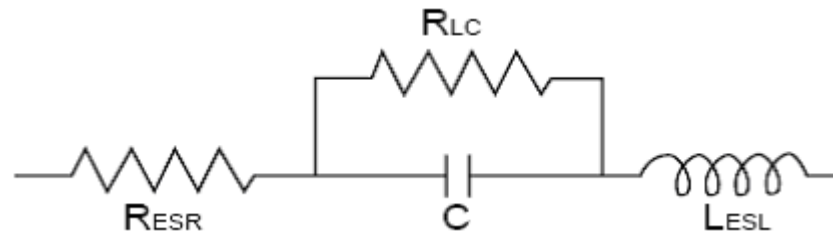


Рис.3.

Упрощенная эквивалентная схема ЭК представлена на рис.3.
Здесь:

Resr – Эквивалентное последовательное сопротивление (**ESR**);

Rlc – Параллельное сопротивление утечки (*Resistance due to leakage current*) [в данной статье в дальнейшем рассмотрении этот элемент не учитывается и на схемах не показывается];

C – Ёмкость (последовательная ёмкость);

Lesl – Эквивалентная последовательная индуктивность (**ESL**).» – [3], стр.25.

«Ёмкость конденсатора может быть определена измерением импеданса по переменному току (полученная подсчётом по амплитуде и фазе) или измерением заряда, сохраненного при подключении в цепь постоянного тока. Эти два метода дают различные результаты. Как правило, измерения на постоянном токе дают примерно в 1,1...1,5 раз более высокое значение ёмкости, чем измерения на переменном токе. Наибольшая разница наблюдается для более низковольтных ЭК. <...>

Для схемы замещения на рис.3 последовательная ёмкость **C** определена измерением на переменном токе амплитудой не выше 0,5 В и частотой от 100 до 120 Герц при температуре 20 град. Цельсия. <...>

Ёмкость ЭК не является постоянной величиной, она зависит от условий работы.

С понижением температуры возрастает вязкость электролита, что приводит к понижению ёмкости, типичный вид этой зависимости приведен на рис.4.

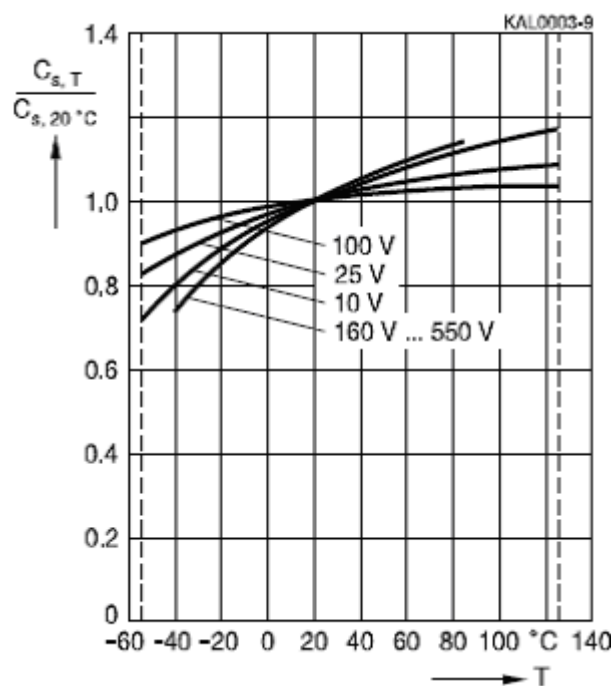


Рис.4. Типовая зависимость ёмкости ЭК от температуры.

Ёмкость ЭК зависит и от частоты, как показано на рис.5. Типовое значение эффективной ёмкости может быть определено по кривой импеданса до тех пор, пока ёмкостная составляющая импеданса доминирует.

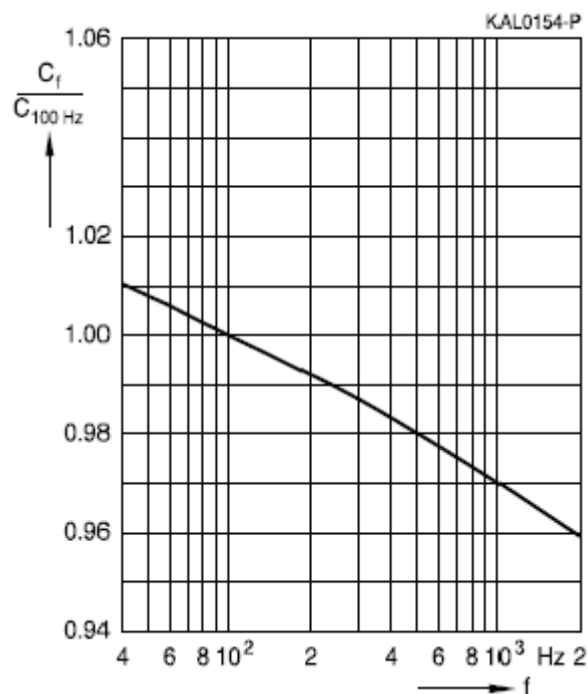


Рис.5. Типовая зависимость ёмкости ЭК от частоты.

Ёмкость ЭК может уменьшиться после многократных циклов заряда-разряда. Предпринятые на этапе разработки специальные меры позволяют ослабить снижение ёмкости по этой причине (после миллиона циклов заряд-разряд уменьшение ёмкости не превышает 10 %).

Фактор потерь **tan b** (тангенс угла потерь $\text{tg } b$) – это отношение эквивалентного последовательного [активного] сопротивления (R_{ESR} на рис.3) к ёмкостной реактивной составляющей [импеданса], или отношение эффективной мощности (рассеиваемой мощности) к реактивной мощности для синусоидального напряжения и определяется по следующей формуле:

$$\text{tg } \delta = \frac{R_{ESR}}{\frac{1}{\omega C}} = R_{ESR} \omega C = \frac{I_C^2 R_{ESR}}{I_C^2 \frac{1}{\omega C}} = \frac{P_a}{S}$$

где P_a – рассеиваемая в конденсаторе мощность, Вт;

S в данной формуле – реактивная мощность конденсатора, ВА.

Фактор потерь, как и ёмкость, зависит от частоты и температуры. Типовые зависимости приведены на рис. 6 и 7.

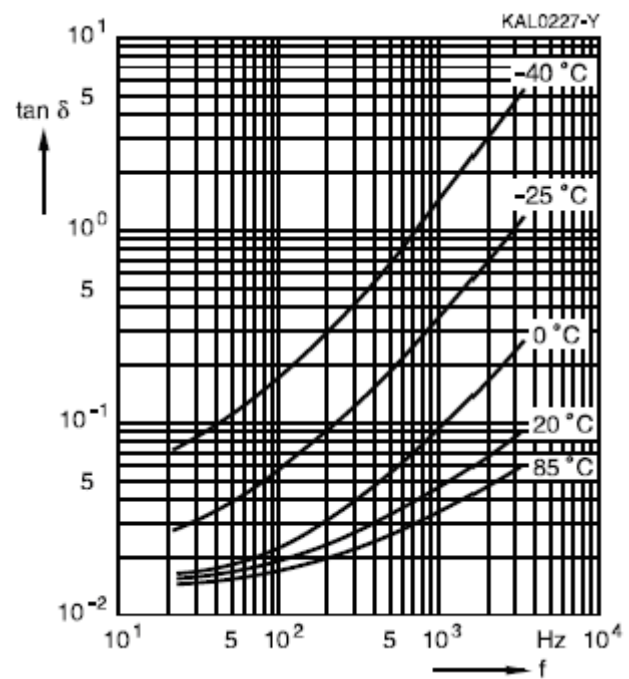


Рис.6. Низковольтный алюминиевый ЭК(100 мкФ/63 В)

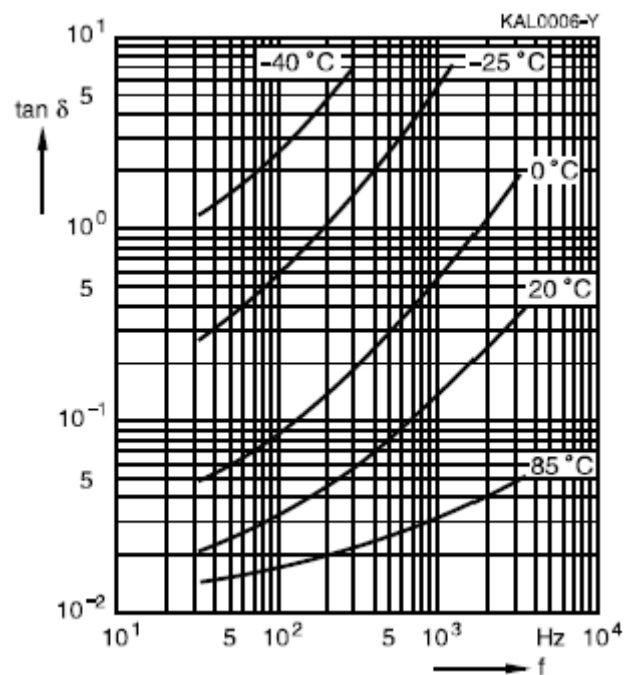


Рис.7. Высоковольтный алюминиевый ЭК (47 мкФ/350 В)

Эквивалентная последовательная индуктивность ESL ($LESL$ на рис.3) зависит от конфигурации выводов и внутренней конструкции ЭК.» – [4], стр. 9-12.

К сожалению, этот параметр производителями ЭК не нормируется. По собственным замерам фирмы Интел, для высококачественного ЭК типовое значение ESL может находиться в пределах от 3,1 наноГенри ([6], стр.20) до 6,4 наноГенри ([7], стр.66).

Эквивалентное последовательное сопротивление ($Resr$ на рис.3) складывается из потерь в слое окиси алюминия, в комбинации электролит/сепаратор и других относящихся к сопротивлению факторов, длины фольги, площади поверхности фольги и пр.» – [3], стр.25,26. «Величина ESR зависит от частоты и температуры и связана с фактором потерь следующей формулой:

$$R_{ESR} = \frac{tg\delta}{\omega C},$$

где:

$Resr$ – эквивалентное последовательное сопротивление в Омах,

$tg b$ – фактор потерь (тангенс угла потерь),

C – ёмкость в фарадах,

$\omega = 2\pi f$ – круговая частота.» – [4], стр.13.

С понижением температуры $Resr$ растёт.

Зависимость $Resr$ от частоты имеет более сложный характер, графический пример такой зависимости приведен на рис. 8.

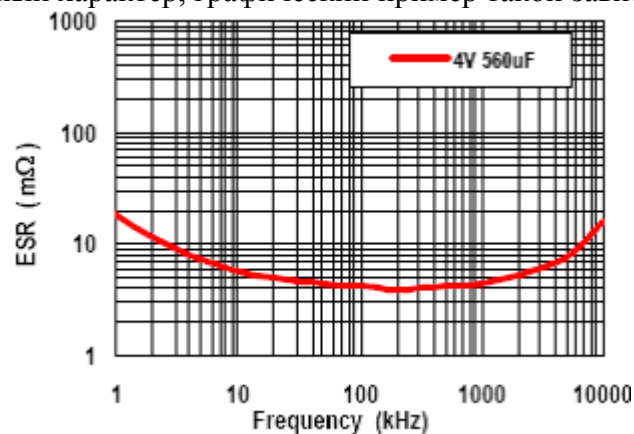


Рис.8 – из [8], стр.2.

Долговечность ЭК.

«Долговечность (иными словами срок службы или срок эксплуатации) определена как срок службы без превышения определенного уровня отказов. Полный отказ или отказ из-за [недопустимого] изменения параметров означает окончание срока службы. ...

Срок службы конденсаторов с жидким электролитом зависит в основном от следующих параметров:

- номинального напряжения;
- номинального тока пульсаций (суммарное пиковое значение переменного и постоянного напряжения не должно превышать номинального напряжения);
- номинальной температуры. <...>

Срок службы может быть продлен эксплуатацией конденсатора в режимах ниже номинальных значений (т.е. при меньшем напряжении, токе или окружающей температуре) и принятием мер по охлаждению. <...>

Принудительный обдув конденсаторов позволяет повысить допустимые токи пульсаций без сокращения срока службы.» – [4], стр.20-23.

Снижение температуры ЭК может быть достигнуто и уменьшением выделяемой в нем мощности. Этот аспект продления срока службы ЭК будет рассмотрен в разделе статьи, посвященном результатам схемотехнического моделирования.

2.1.2. Керамические многослойные конденсаторы.

«Термин «керамический» означает, что неорганический поликристаллический слой [диэлектрика] формируется спеканием под высокой

температурой.

Многослойные КК содержат монокристаллический керамический блок с впрессованными в него гребнеобразными электродами (обкладками). Эти электроды выходят на противоположные торцы керамического блока, где электрически соединяются впрессованным металлическим слоем. Схематично конструкция многослойного КК приведена на рис.9.

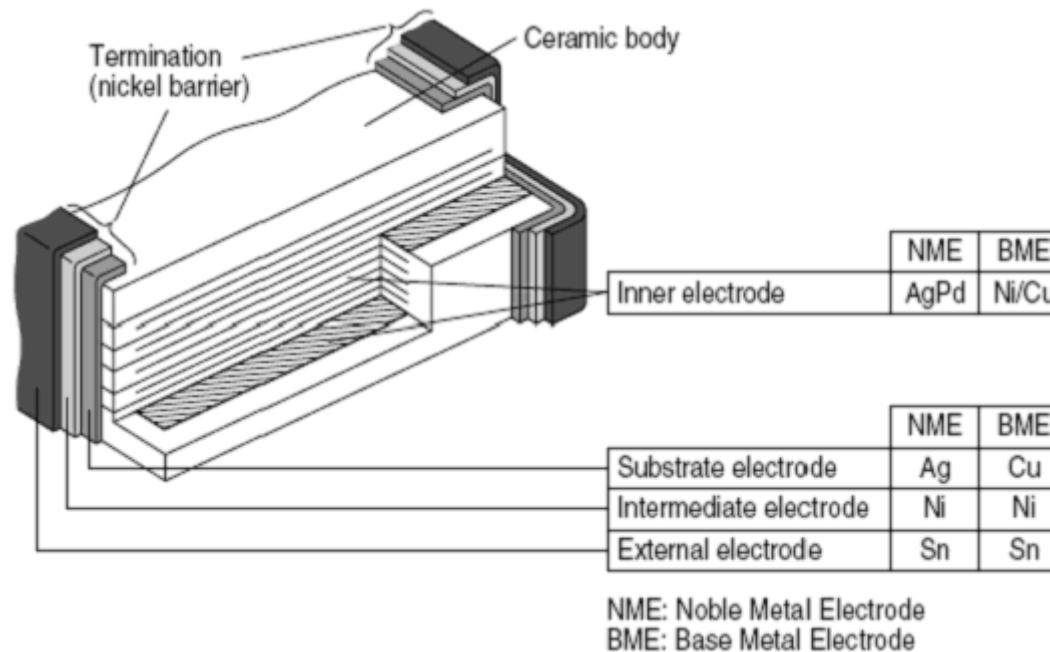


Рис. 9.

В зависимости от химического состава керамического диэлектрика, определяющего основные свойства, КК классифицируются следующим образом:

Свойства КК 1 класса:

- Диэлектрик (с проницаемостью не выше 200) преимущественно состоит из смеси окисей металлов и титанатов.
- Определенный и линейный температурный коэффициент емкости (ТКЕ) с возможностью выбора знака (положительного или отрицательного).
- Ёмкость не меняется от приложенного напряжения.
- Малые потери в диапазоне ОВЧ.
- Высокое сопротивление изоляции.

Применение: резонансные схемы, фильтры, времязадающие элементы.

Свойства КК 2 класса:

- Диэлектрик (с проницаемостью от 200 до 10000) преимущественно состоит из титанатов (бария, кальция, стронция) и цирконатов.
 - Нелинейная зависимость ёмкости от температуры и напряжения.
 - Несколько бОльшие потери и меньшее сопротивление изоляции по сравнению с КК 1 класса.
 - Ёмкость уменьшается [со временем] по логарифмическому закону (старение).
 - Высокое значение ёмкости возможно даже для КК малых размеров.
- Применение: развязка, блокировка, фильтрация.» – [9], стр.2-6.

Расшифровка типов диэлектриков для обоих классов КК приведена в таб.1,2 (фотокопия таблиц из [9]):

Таблица 1.

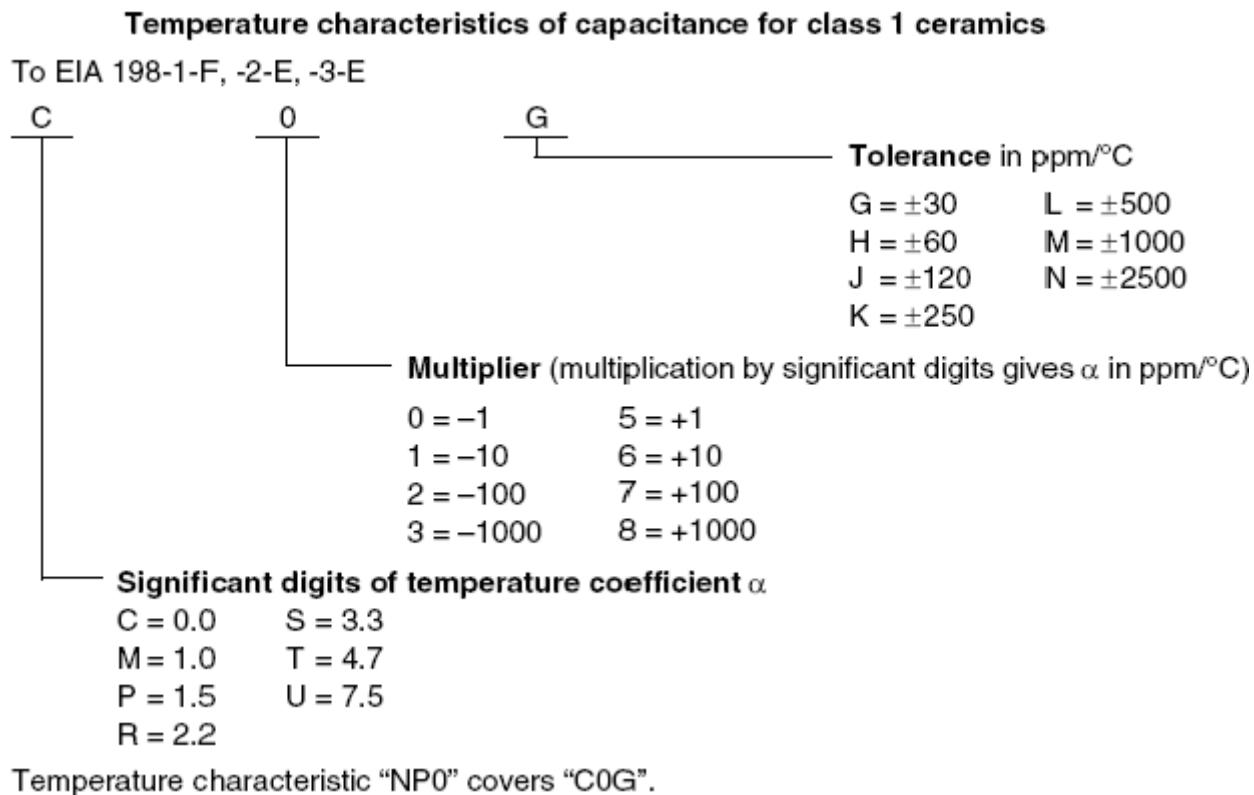
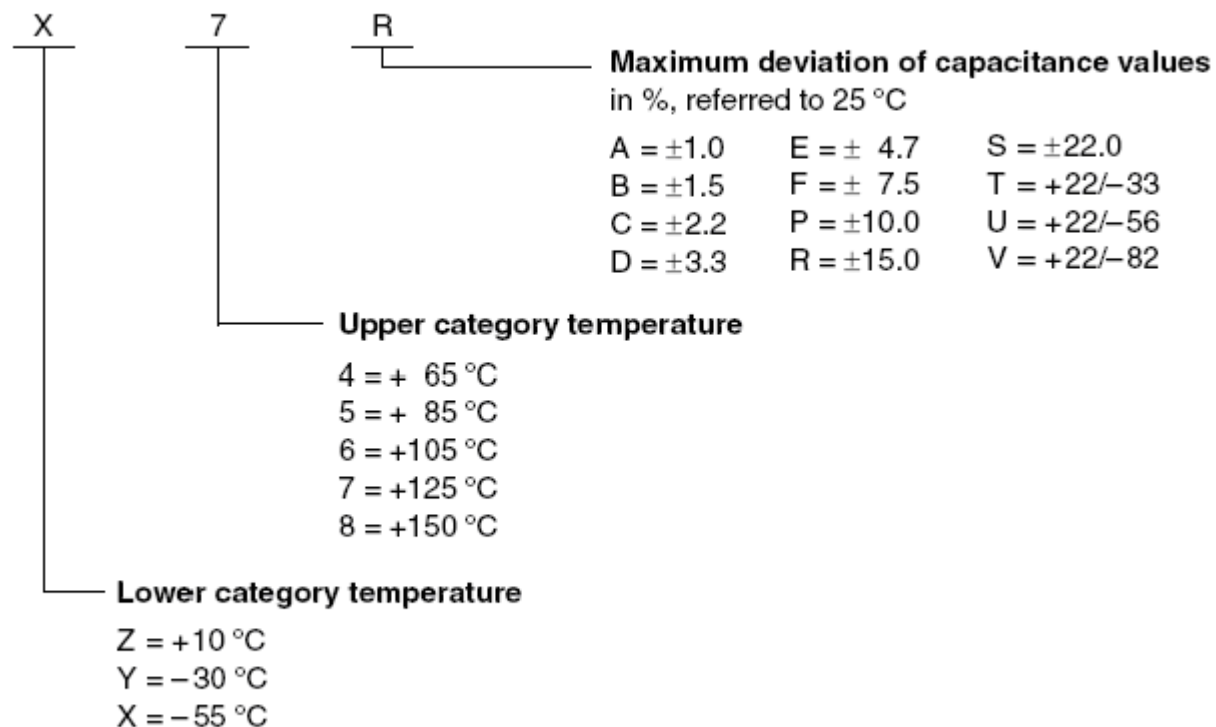


Таблица 2.

Temperature characteristics of capacitance for class 2 ceramics

To EIA 198-1-F, -2-E, -3-E



Temperature characteristic "B" (JIS) covers "X7R" (EIA).

Temperature characteristic "F" (JIS) covers "Y5U" and "Z5U" (EIA).

Схема замещения (рис.3), понятия и формулы ёмкости, тангенса угла потерь, ESL, ESR одинаково применимы как для ЭК, так и для КК. Но абсолютные величины этих параметров, вид их зависимости от температуры, частоты, постоянной составляющей напряжения различаются.

«Влияние приложенного к [керамическому] конденсатору напряжения на его свойства практически незаметно для диэлектриков класса 1, но воздействует на ёмкость и тангенс угла потерь конденсатора диэлектриков класса 2.

Приложенное к конденсатору напряжение постоянного тока снижает как ёмкость, так и тангенс угла потерь конденсатора; в то же время приложение переменного напряжения ведет к возрастанию как ёмкости, так и tg b. <...>» – [10], стр.143-145. Для конденсаторов

большой емкости с диэлектриком X7R вид типовой зависимости емкости от напряжения приведен на рис. 10, из которого видно, что емкость уменьшается на 50-60% (более, чем вдвое!) при приложении постоянного напряжения, близкого к номинальному.

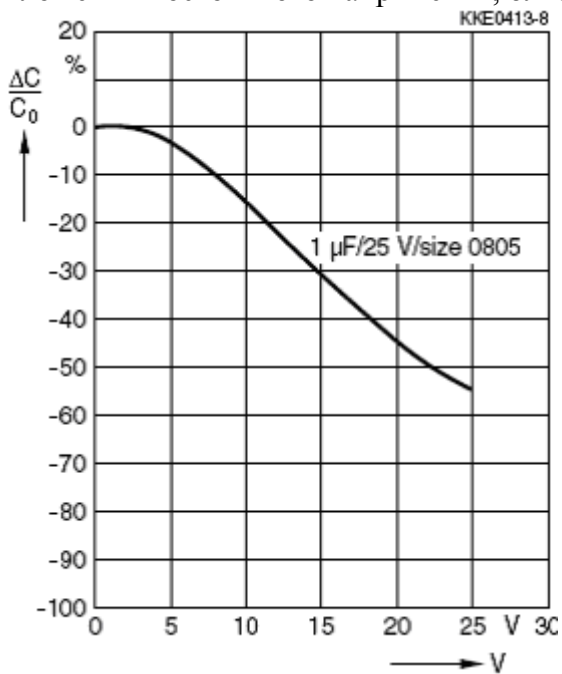


Рис.10 – из [11], стр. 23.

Характер изменения емкости КК с повышением температуры в общем зависит от вида диэлектрика, знака и величины ТКЕ. Конкретно для конденсаторов большой емкости с диэлектриком X7R вид типовой зависимости емкости от температуры приведен на рис. 11.

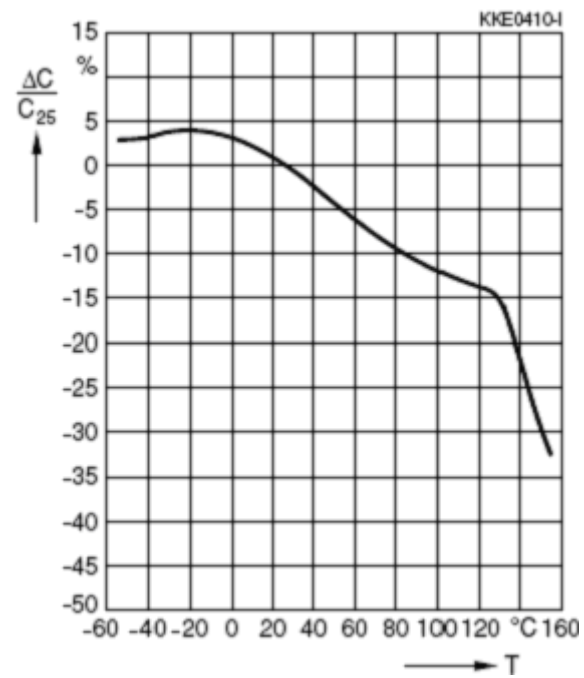


Рис. 11. – из [11], стр.22

Снижение тангенса угла потерь с увеличением температуры для КК с диэлектриком X7R иллюстрирует рис.12.

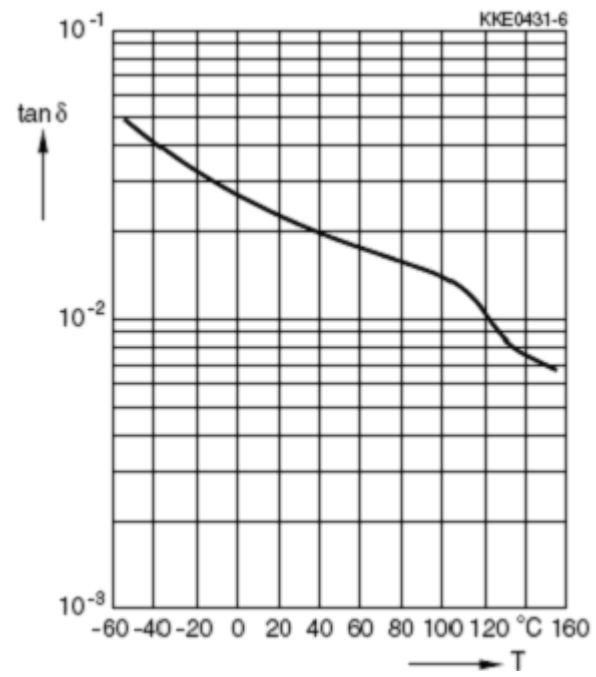


Рис.12. – из [11], стр.25.

Типовой вид зависимости импеданса Z (полного сопротивления) и ESR от частоты приведен на рис. 13.

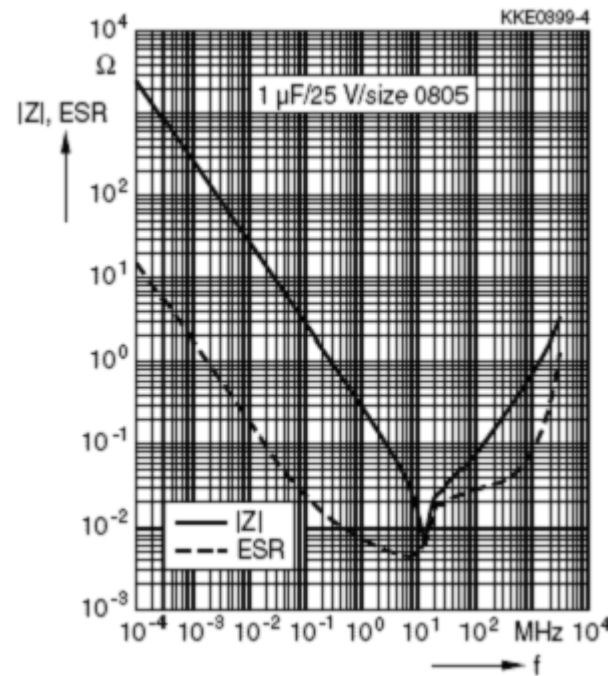


Рис.13. – из [11], стр.24.

«Для других типов керамики, например Y5U или Y5V, значение Z, соответствующее резонансу, получается на значительно меньших частотах, что свидетельствует о худших свойствах конденсаторов с такими диэлектриками.» – [10], стр.145.

Величина ESL от времени, температуры, и частоты не зависит (или эта зависимость пренебрежимо мала).

2.1.3. Сравнение ЭК и КК.

Как уже отмечалось выше, не все важные для разработки современных матплат параметры указываются в документации производителей конденсаторов. Поэтому воспользуемся данными корпорации «Интел», которая применяла при моделировании базового (референсного) дизайна MB для чипсета I845G следующие параметры:

Таблица 3.

Конденсатор, емкость	ESR	ESL	Примечание
OSCON, 560 мкФ	9.28 мОм, max	6.4 нГн, max	1
Алюминиевый ЭК 3300 мкФ	12 мОм	5 нГн	1
MLCC, корпус 1206, 10 мкФ	3.5 мОм, тип.	1.15 нГн, тип.	1

Примечание 1 к таб. 3 – значения ESR и ESL основаны на значениях, используемых Интелом для моделирования распределения питания и не являются данными производителей. – [7], стр.66.

Из таб. 3 видно, что КК большой ёмкости обладают в несколько раз меньшими паразитными ESR и ESL, чем у ЭК. Кроме того, гораздо меньшие габаритные размеры КК позволяют использовать параллельное включение нескольких десятков КК, что приводит к соответствующему уменьшению ESR и ESL. Однако, значительно меньшая емкость КК не позволяет обойтись совсем без ЭК.

2.2. Условия работы конденсаторов в цепях питания ядра процессора.

Основное допущение, сделанное автором при дальнейшем изложении, состоит в том, что физическая суть эффектов в цепях питания от выходного дросселя конвертера до кристалла микропроцессора одинакова для любого из относительно нестарых процессоров от Intel Pentium-III до Intel Core Duo. Отличия только в количественных характеристиках и степени влияния этих эффектов на работоспособность и долговечность электролитических конденсаторов и процессора. Эти отличия связаны с тем, что для более новых процессоров:

- а) выше средний и максимальный потребляемый ток, из-за чего возрастают омические потери на паразитных сопротивлениях компонентов источника питания, токопроводящих дорожек системной платы, контактов процессорного разъема;
- б) выше скорость переходных процессов на шинах питания, из-за чего растут выбросы и просадки напряжения на паразитных индуктивностях компонентов источника питания, токопроводящих дорожек системной платы, контактов процессорного разъема;
- в) ниже номинальное напряжения питания ядра процессора, из-за чего понижается запас помехоустойчивости – это вынуждает ужесточать требования к стабильности напряжения питания и устойчивости к дестабилизирующим факторам, перечисленным выше.

С учётом сказанного, попытаемся проанализировать документацию на процессоры в указанном «диапазоне».

2.3. Требования к цепям питания.

Попытаемся выяснить, почему и какие требования предъявляются производителем процессоров к цепям питания и ШИМ-конверторам. Будем опираться на документацию фирмы INTEL, как производителя наиболее высокочастотных процессоров, для которых изучаемые эффекты могут иметь наибольшее значение.

«Из-за очень большого числа транзисторов и высокой внутренней частоты тактирования процессор способен производить большие

колебания среднего тока между состояниями низкой и полной загрузки» - [12], стр.19.

«Неизбежная индуктивность проводов и шин питания снижает возможность источника питания быстро реагировать на переходные процессы по току. Блокировка (Decoupling) шин питания может быть охарактеризована несколькими особенностями [в оригинале – «зонами интересов»]. Чем ближе к нагрузке расположены конденсаторы, тем большая индуктивность будет обойдена. Для обхода индуктивностей паек, шин питания и т.п. требуется меньшая ёмкость. Таким образом, близость [конденсаторов] к нагрузке [требует] меньше места для их размещения. <...> Время реакции конвертера по цепи обратной связи намного дольше, чем время, за которое изменение нагрузки процессора вызывает [переходной] эффект. Это особенно верно, если изменение нагрузки произошло с высокой скоростью. Батарея (bulk) [электролитических] конденсаторов снабжает энергией истощенные высокочастотные блокирующие [керамические] конденсаторы до времени, когда источник питания сможет отреагировать. Вернее, батарея [электролитических] конденсаторов снижает требования к источнику питания по переходным процессам до значений, которые он в состоянии обеспечить. <...> Высокочастотные [керамические] блокирующие конденсаторы должны располагаться настолько близко к питающим выводам процессора, насколько это физически возможно. Это жизненно необходимое требование, т.к. индуктивность шин питания на плате может свести на нет пользу от применения этих низкоиндуктивных компонентов.» - [13], стр.33,34.

«К примеру, <...> 250 пикоГенри [паразитной] индуктивности обычно игнорируются в системах распределения питания, пока не появятся перепады тока со скоростью изменения в 1 А/нс, которые имеются при использовании процессора Pentium-III. Падение напряжения на индуктивности в этом случае может составить 250 мВ.» - [14], стр. 9.

«Зона <...> регулирования ШИМ <...> определена как полоса частот регулятора с замкнутой цепью обратной связи. Типичное значение - 30-40 кГц для 300-килогерцового регулятора.» - [15], стр. 26.

«Обычный конвертер имеет время реакции в пределах от 1 до 100 мкс, в то время как перепады тока потребления процессора занимают от 1 до 20 нс» - [14], стр.19. (Обратите внимание, какие высокие скорости изменения тока были у слотовых 500-мегагерцовых (!) процессоров в 1999 году! По всей видимости имелось в виду, что для данных процессоров такое значение скорости было бы в отсутствие блокирующих керамических конденсаторов возле кристалла процессора.) Читаем там же: «Для Pentium-III перепады тока, вызванные изменением нагрузки, могут быть 15,3 А или выше. Это не только быстрые изменения потребляемого тока, но и длительные периоды среднего потребляемого тока. Заметьте, даже при выполнении обычных операций потребности в токе могут изменяться на 7 А или более из-за смены активных уровней внутрипроцессорных логических элементов (компонентов).» - [14], стр.19.

Скачок тока потребления на семь или более ампер за одну или несколько наносекунд невозможно обеспечить без блокирующих керамических конденсаторов непосредственно возле кристалла процессора, т.к. ток через шины питания просто не успеет вырасти из-за существенной на таких скоростях паразитной индуктивности проводников.

Таким образом, у автора сложилось мнение, что керамические конденсаторы возле сокета и непосредственно на процессоре выполняют роль накопителей энергии, которой они обеспечивают ядро процессора до тех пор, пока ток через паразитные индуктивности не возрастет до нужного значения. К сожалению, полной определенности в этом вопросе нет, частично и из-за позиции фирмы «Интел». Вот как были определены понятия «пульсации» и «шумы»: «Выходные пульсации и шумы определены как периодический или случайный сигнал в диапазоне частот до 20 МГц на выходе [источника питания] под постоянной нагрузкой. (Выделено и подчеркнуто мною – Я.М.)» - [6], стр. 14. Т.е. перепады тока от **изменения** загрузки процессора под данное определение не подпадают. В последующем терминология Интел изменилась, фактически противореча процитированному определению: «Выходной фильтр содержит высокочастотные блокирующие [керамические] конденсаторы для гарантированного подавления пульсаций и шумов корпуса до определённых уровней.» – [16], стр. 35. Скорее всего, по

мнению автора, это связано с тем, что в рекомендациях последних лет для разработчиков вместо формул и примеров расчетов приведены конкретные числовые значения (количество, номинал, максимально допустимые ESR и ESL, место размещения для электролитических и керамических конденсаторов), соответственно, отпала надобность в подробном рассмотрении физических процессов на шинах питания. «В связи с тем, что электролитические блокирующие конденсаторы обладают не только ESR, но и довольно высокой индуктивностью, эти конденсаторы нуждаются в помощи других конденсаторов, имеющих меньшую индуктивность (но и, обычно, меньшую ёмкость). Эти высокочастотные [керамические] конденсаторы контролируют переключательные перепады и поддерживают шины питания при изменениях нагрузки, пока [электролитические] конденсаторы с большей индуктивностью не смогут отреагировать.» - [14], стр. 22 – такое объяснение 1999 года более содержательно раскрывает назначение КК, чем просто «гарантированное подавление шума».

2.4. Концепция модели.

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

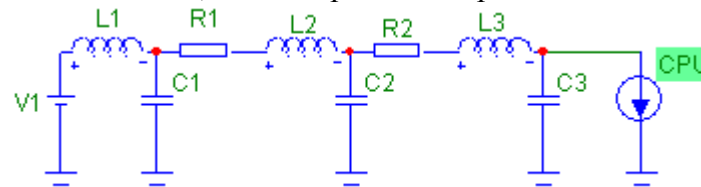


Рис. 14.

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 шумы 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:

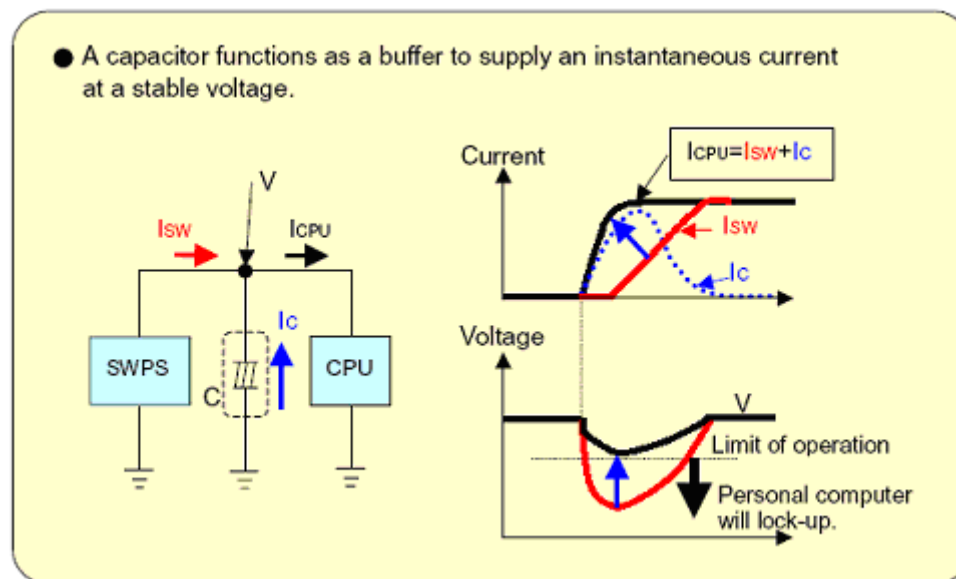


Рис.15 – из [17], стр.25.

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 емкости 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 быстродействием 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 (внешнего нагрузочного устройства и адаптера-позиционера). Добавлены модели конденсаторов CDOP1, CDOP2, ССРU1, 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.

Следует 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.

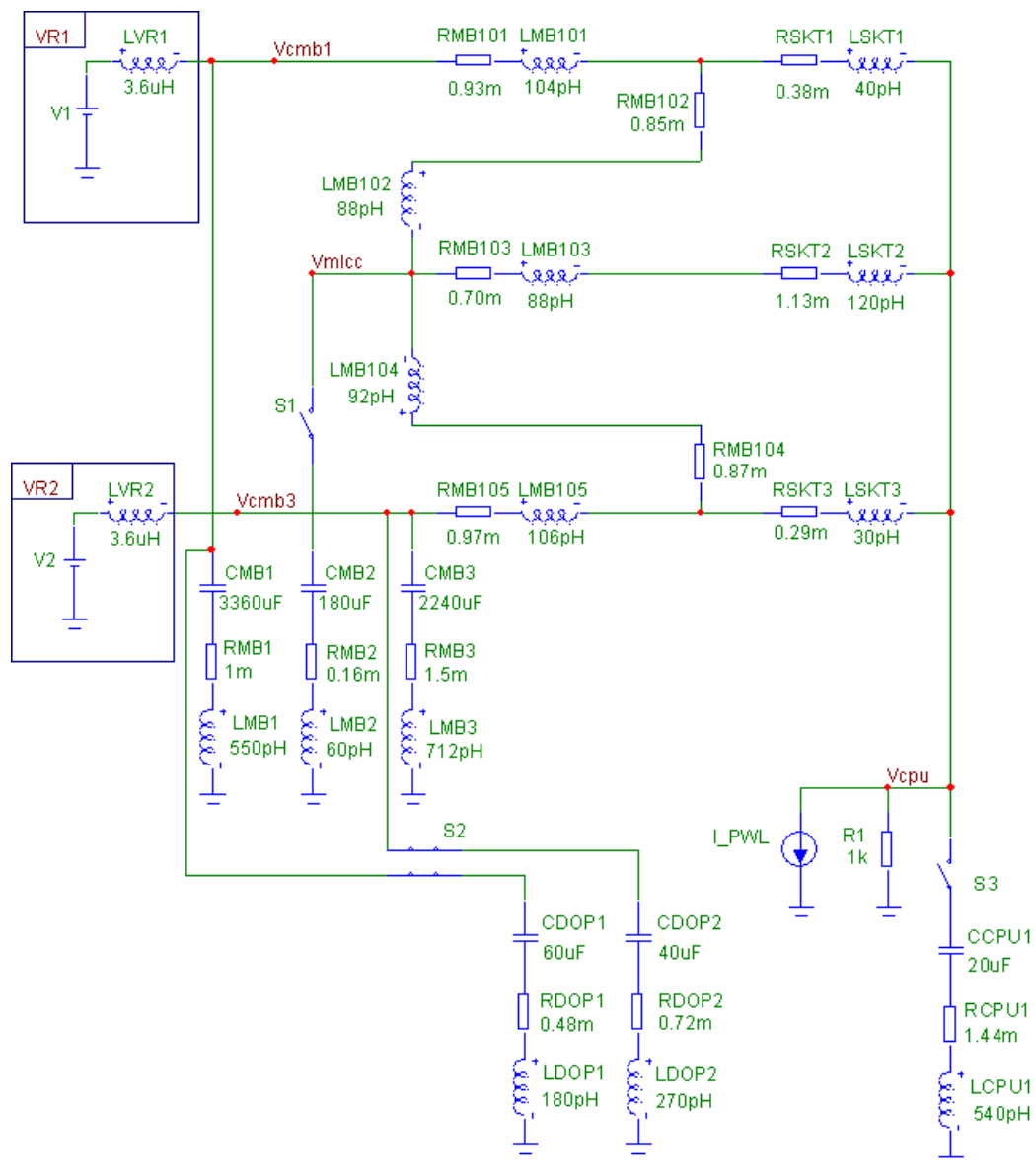


Рис.16.

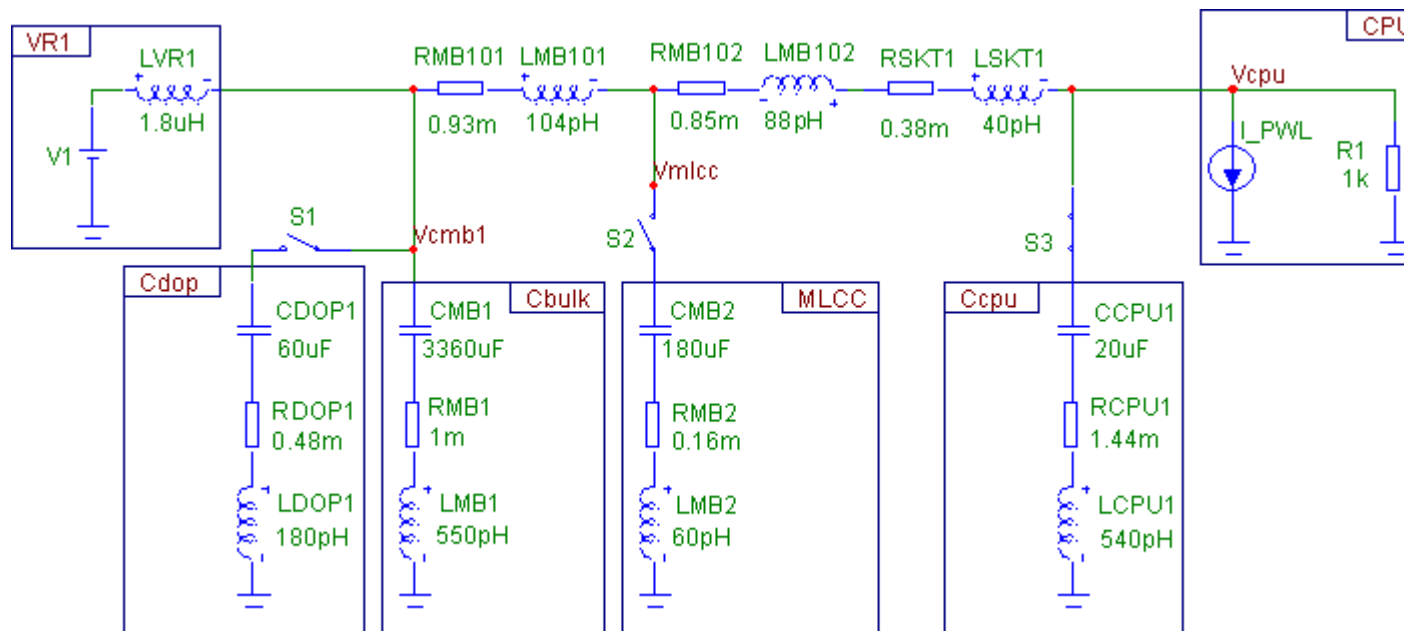


Рис.17.

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;
CCPU1, RCPUI, LCPUI – 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	Индуктивность одной пары контактов (Lпары)	Число контактов Vcc (NVcc)	Число контактов Vss (NVss)	Общая индуктивность (Lобщ.)	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	Сопротивление одной пары контактов (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 таб. 4 и 5 :

1. Число контактов питания (V_{cc}) и земли (V_{ss}) может варьироваться в небольших пределах в зависимости от модели процессора.
2. Общие индуктивность и сопротивление вычислялись с последующим округлением по формулам:

$$L_{общ.} = L_{пары} / NV_{cc} / 2 + L_{пары} / NV_{ss} / 2,$$

$$R_{общ.} = R_{пары} / NV_{cc} / 2 + R_{пары} / NV_{ss} / 2.$$

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 (СМВ1 и СМВ3) составлены соответственно из шести и четырёх ЭК ёмкостью по 560 мкФ, ESR=6 мОм, ESL=3,3 нГн. Параметры одного КК: C=10 мкФ, ESR=2,88 мОм, ESL=1080 пГн. Для удобства параметры батарей таких конденсаторов сведены в таблицу 6:

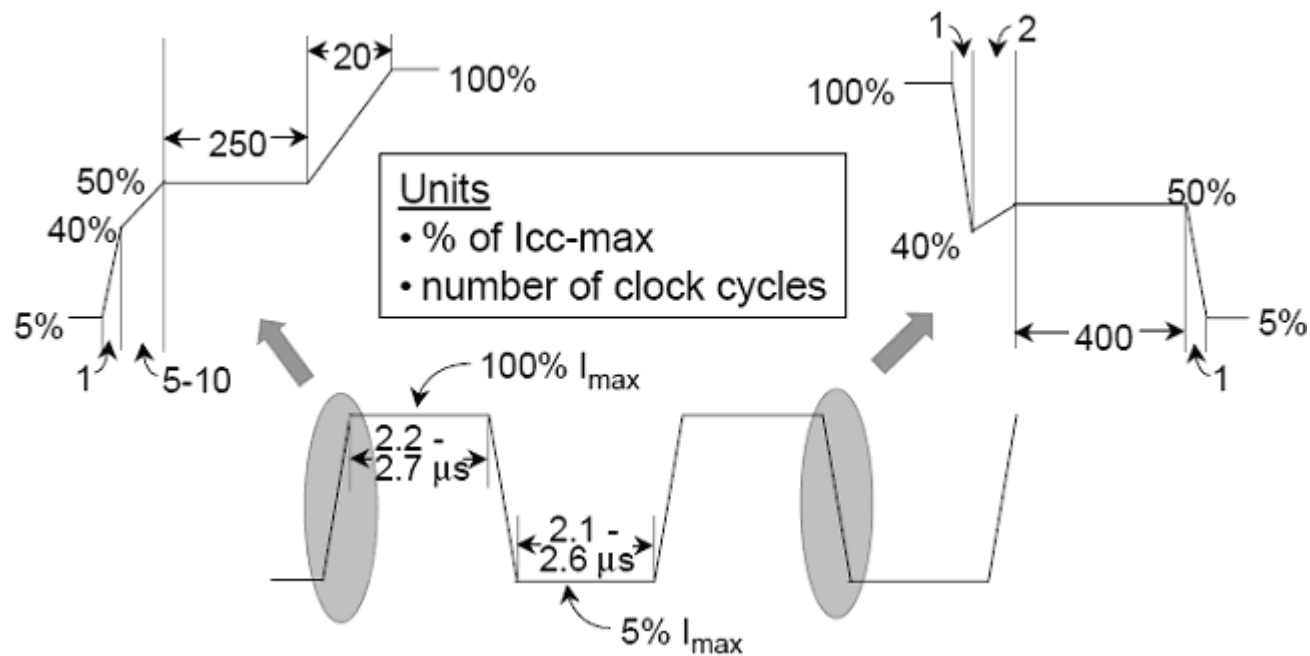
Таблица 6.

С, 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 перепадов тока в некоторых наихудших стечениях обстоятельств – см. рис.18 и примечания к нему.



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.

Рис. 18- из [17], стр.7.

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

Выражение будет иметь вид (в одну строку):

```
rw1 0,0 0.3u,3.24 0.300333u,25.92 0.301998u,32.4 0.385248u,32.4 0.391908u,64.8 2.591908u,64.8 2.592241u,25.92 2.592907u,32.4 2.726107u,32.4 2.72644u,3.24 4.82644u,3.24 1.3,0
```

Здесь:

rw1 - тип генератора, - программируемый источник постоянного тока (Constant current source);

0,0 - нулевые начальные значения (число слева от запятой - момент времени, а справа - соответствующая этому моменту величина тока), применены для того, чтобы избежать "звона" модели, вызванного скачком тока с бесконечной скоростью при ненулевом токе в нулевой момент времени;

0.3u,3.24 - относительно плавное (на протяжении почти 1000 тактов) линейное нарастание тока процессора до минимального значения (согласно рис.18 - 5% от максимального тока, для выбранного процессора $I_{max}=64,8$ А);
0.300333u,25.92 - скачок от 5% до 40% за один такт ($1 \text{ такт}=0,333 \text{ нс}=333 \text{ пс}$);
0.301998u,32.4 - скачок от 40% до 50% за 5 тактов (мы же рассматриваем наихудший вариант, поэтому выбираем наименьшее значение из вилки "5-10 тактов");
0.385248u,32.4 - удержание тока на протяжении 250 тактов;
0.391908u,64.8 - скачок от 50% до 100% за 20 тактов;
2.591908u,64.8 - удержание тока на протяжении 2,2 мкс;
2.592241u,25.92 - спад тока от 100% до 40% за 1 такт;
2.592907u,32.4 - нарастание тока от 40% до 50% за 2 такта;
2.726107u,32.4 - удержание тока на протяжении 400 тактов;
2.72644u,3.24 - спад тока от 50% до 5% за 1 такт;
4.82644u,3.24 - удержание тока на протяжении 2,1 мкс;
1.3,0 - плавный спад тока до нуля за гигантское, в масштабе исследуемого процесса, время 1,3 с.

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 таб.6 и будем подключать её поочередно к точкам V_{cpu} (опыт 1), V_{mlcc} (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 таб.7:

Таблица 7.

№ опыта	Точка подключения	Суммарная емкость КК, мкФ	Суммарная рассеиваемая на ЭК мощность, мВт	Размах пульсаций, от пика до пика, В
1	V_{cpu}	20	4,905	0,385
2	V_{mlcc}	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

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 (таб.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:

Таблица 8.

№ опыта	Точка подключения	Суммарная емкость КК, мкФ	Суммарная рассеиваемая на ЭК мощность, мкВт	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

Занятная 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 (таб. 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 емкости КК в цепи питания? Для этого отключим от ЭК наши тестовые конденсаторы и подключим к точке V_{mlcc} дополнительный КК ёмкостью 100 мкФ (остальные параметры – в таб.6). Более подробно смотрите в дополнении к статье. Результат – в нижней строке таб. 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 емкости КК возле сокета процессора может привести к противоположному результату – принцип «кашу маслом не испортишь» здесь неприемлем.

В третьих, если на плате вокруг сокета 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.

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.

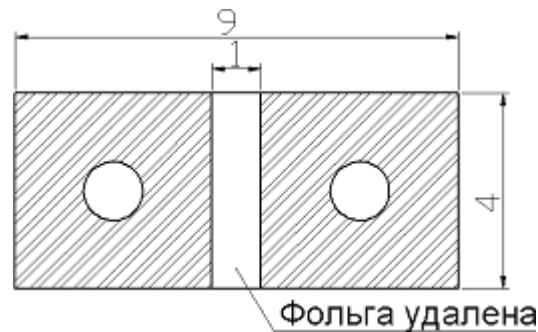


Рис. 19.

На эти платы сначала напаиваем 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!

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

Каждый напаиваемый 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 -

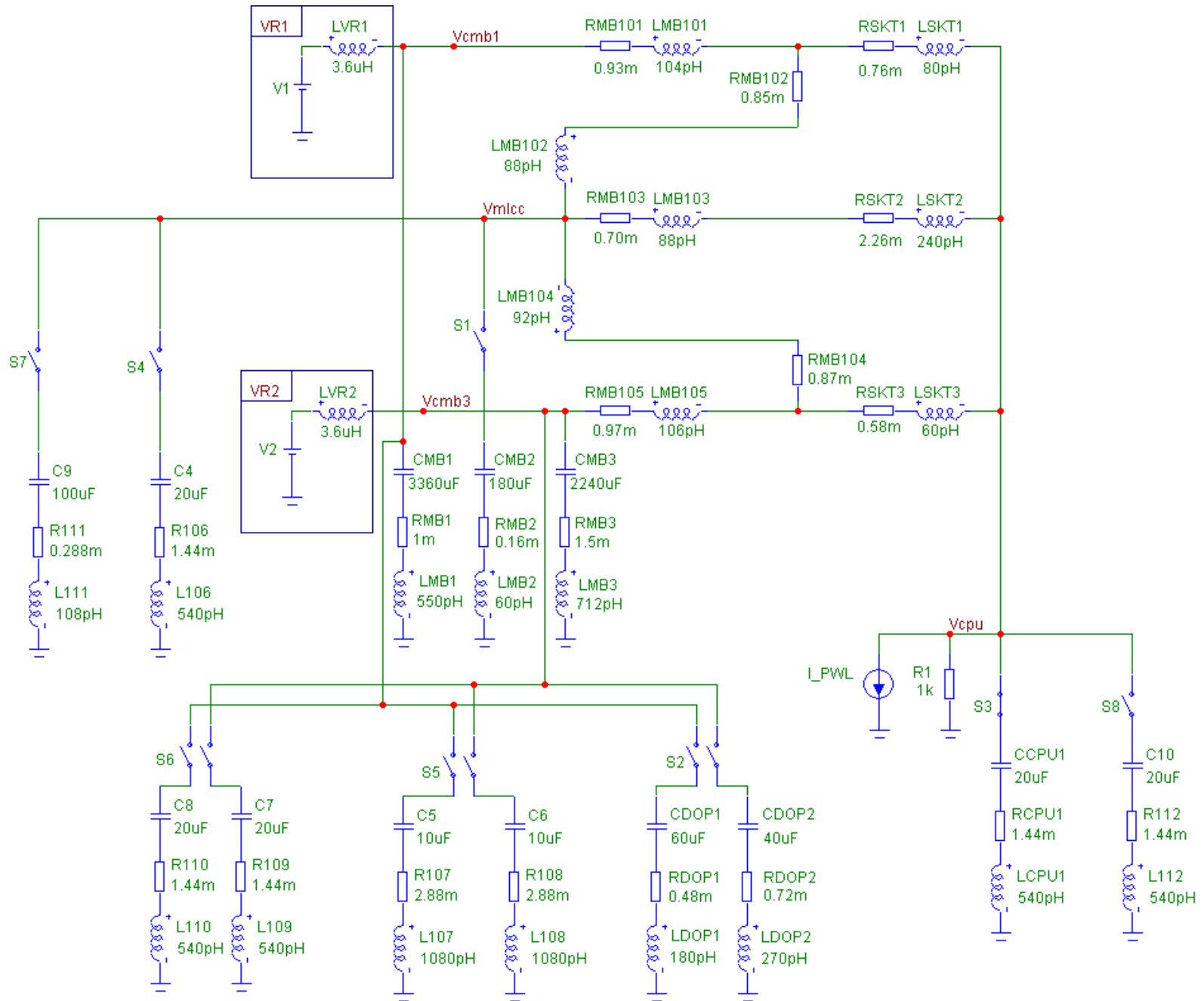
отключаем питание и устанавливаем остальные комплектующие.

5. Дополнения к статье.

Для удобства виртуального "экспериментирования" с моделью схема была дополнена. Чтобы не вносить каждый раз изменения в схему, лучше сразу предусмотреть все необходимые варианты, которые можно подключать, используя анимированные переключатели. Такой вариант схемы представлен на рис.20, а соответствующий схемный файл можно скачать по ссылке:

http://cp.people.overclockers.ru/cgi-bin/dl.pl?id=26791&filename=mPGA478_4_5.zip

Рис.20.



Цепочка C10 R112 L112 подключается переключателем S8 для выполнения опыта 1 по таб. 8.
Цепочка C4 R106 L106 подключается переключателем S4 для выполнения опыта 2 по таб. 8.
Цепочки C5 R107 L107 и C6 R108 L108 подключаются переключателем S5 для выполнения опыта 3 по таб. 8.
Цепочки C7 R109 L109 и C8 R110 L110 подключаются переключателем S6 для выполнения опыта 4 по таб. 8.
Цепочка C9 R111 L111 подключается переключателем S7 для выполнения опыта "Проверочный" по таб. 8.

Задать вопрос можно в конференции (адрес именно такой, с кириллицей)
http://www.rom.by/forum/Электролитические_конденсаторы

Автор данной статьи присутствует там под ником Ter_Abit.

Схемные файлы для программы Micro-Cap 8 (совместимы и с седьмой версией этой программы) доступны для скачивания в zip-архиве по ссылке:

http://cp.people.overclockers.ru/cgi-bin/dl.pl?id=26654&filename=Ceramic_sch.zip

Журнальный вариант статьи доступен для скачивания по следующим ссылкам:

Часть 1 (djvu, 207 kB) -

http://cp.people.overclockers.ru/cgi-bin/dl.pl?id=26655&filename=Ceramic_1.djvu;

Часть 2 (pdf, 169 kB) -

http://cp.people.overclockers.ru/cgi-bin/dl.pl?id=26653&filename=rh607_4750.pdf.

Автор выражает благодарность:

- модераторам и участникам указанной конференции за конструктивное обсуждение,
- А.Сорокину за содержащийся в его статье [1] толчок к размышлениям в правильном направлении,
- С.А.Амелину (г. Смоленск) за консультации и помощь в освоении Micro-Cap.

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® Pentium® 4 Processor in 478-pin Package and Intel® 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® Pentium® III Processor with 512KB L2 Cache at 1.13GHz to 1.40GHz (24965704.pdf, www.intel.com).
13. Low Voltage Intel® Pentium® III Processor 512K Dual Processor Platform Design Guide (27367401.pdf, www.intel.com).
14. Pentium® 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® Pentium® 4 Processor 478-Pin Socket (mPGA478) Design Guidelines (24989002.pdf, www.intel.com).
20. Intel® Pentium® 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® Pentium® 4 Processor 6xx Sequence and Intel® Pentium® 4 Processor Extreme Edition Datasheet (30638203.pdf, www.intel.com).
23. Intel Pentium 4 Processor VR-Down Design Guidelines (24989104.pdf, www.intel.com).

24.06.2006. (с) Ярослав Малов, иначе известный как Ter_Abit.

<http://people.overclockers.ru/TerAbit/record5>