

УДК 004.31

**ДЕГРАДАЦИЯ ЦЕНТРАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОРОВ  
В ПЕРСОНАЛЬНЫХ КОМПЬЮТЕРАХ**

Федорович Д.С.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Сизиков С.В.

Центральное обрабатывающее устройство центральный процессор, или же центральный процессор (ЦП) представляет собой интегральную схему или же электронный блок, выполняющий различные машинные команды. Он является одной из основных частей аппаратного обеспечения компьютера, производительность которого в значительной степени влияет на производительность компьютера в целом. ЦП устанавливается в определенный сокет (разъём) на интерфейсы.

Основными параметрами, характеризующими производительность процессора, являются:

- тактовая частота;
- архитектура;
- количество ядер;
- многопоточность;
- объём кэша.

Важны также тип и частота оперативной памяти, поддерживаемой процессором, а также количество каналов памяти.

Рассмотрим более подробно каждый параметр.

**Тактовая частота** определяет количество циклов, выполняемых процессором за секунду и измеряется в гигагерцах (ГГц). Процессор с тактовой частотой 3 ГГц выполняет 3 млрд. циклов в секунду. С технической точки зрения цикл представляет собой импульс, синхронизируемый внутренним осциллятором, но для наших целей это базовая единица, помогающая понять концепцию тактовой частоты процессора. В течение каждого цикла в процессоре открываются и закрываются миллиарды транзисторов.

Поскольку различные архитектуры процессоров обрабатывают команды по-разному, лучше всего сравнивать тактовую частоту процессоров одной марки и одного поколения. Однако в пределах одного поколения процессор с более высокой тактовой частотой обычно превосходит по производительности процессор с более низкой тактовой частотой

**Архитектура** это внутренняя конструкция процессора, организация процессов внутри устройства. Процессоры с единой архитектурой (одного семейства) обладают одинаковыми свойствами и качествами. Архитектура процессора имеет важное значение, так как новый процессор может легко обойти по производительности процессор пятилетней давности с более высокой тактовой частотой, поскольку новая архитектура обрабатывает команды более эффективно.

**Количество ядер** процессоров для персональных компьютеров варьируется от 2 до 32. Одноядерные процессоры уже являются архаизмом. Ядро – это основная составляющая процессора, именно в нем производятся все операции и

вычисления, если их несколько, то они взаимодействуют друг с другом посредством шины данных. Чем больше количество ядер, тем выше скорость обработки данных.

**Многопоточность** - это способность ядра процессора одновременно выполнять несколько процессов (потоков), что существенным образом ускоряет работу системы. Тут всё аналогично количеству ядер: чем она выше, тем лучше.

**Кэш** процессора – это встроенная в кристалл сверхбыстрая память. Когда процессору нужно обратиться в память для чтения или записи данных, он сначала проверяет, доступна ли их копия в кэше. В случае успеха проверки процессор производит операцию, используя кэш, что значительно быстрее использования более медленной основной памяти.

Несколько слов о самой деградации центрального процессора.

Интегральная схема центрального процессора состоит из множества элементов: транзисторов, резисторов, конденсаторов, ячеек, диэлектрических изолирующих слоёв, металлических межсоединений и прочего. Всё это подвержено деградации от разных стрессовых факторов, в числе которых: ток, напряжение, температура, влажность окружающей среды, время. При повышении температуры чипа более  $85^{\circ}\text{C}$  в многоуровневой металлизации, состоящей из слоёв металла, контактных переходов и межуровневых диэлектриков происходит термическое расширение слоёв. Так как термические коэффициенты диэлектриков и металлов значительно различаются, то имеет место значительный разброс механического давления слоёв друг на друга. Это может приводить к разрывам и образованию металлических пустот в металлических шинах или же контактных переходов (рис.1), из-за этого также может происходить разрушение диэлектрика между металлическими шинами.

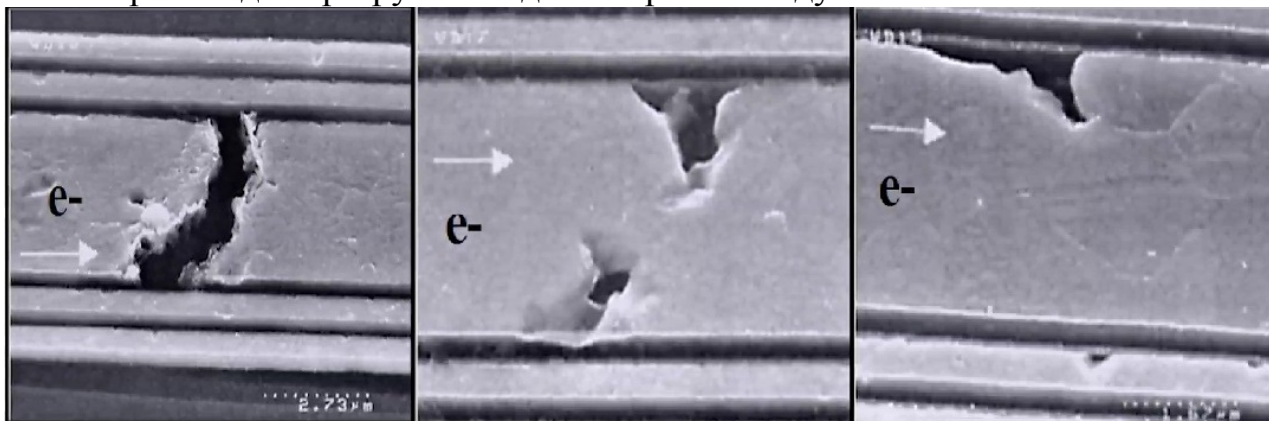


Рисунок 1 – Изображения состояния металлической шины после испытаний в стрессовых условиях, полученные с помощью электронного микроскопа

Ещё одно последствие высоких температур – это деградация поканальных транзисторов, которое происходит вследствие нахождения пустот в области канала транзистора, при повышенных температурах и отрицательном напряжении на затворе транзистора. Это приводит к образованию ‘ловушек’, а затем захвату ими пустот в подзатворном окисле. Деградация происходит без протекания тока через канал транзистора.

Со временем под воздействием токов можно наблюдать такой процесс, как электромиграция (рис. 2, рис. 3). Данный процесс представляет собой физическое перемещение атомов металла под воздействием протекающего через металл тока электронного ветра. Вследствие электромиграции возможно появление утолщений, скоплений атомов металла в одном месте. Из-за высокой плотности металлической разводки (соседние металлические шины расположены на минимально допустимом по технологии расстоянии) утолщение одной из шин может привести к возникновению короткого замыкания с соседней шиной. Это может привести, как к повышению токов утечки, так и к полному отказу какого-то блока схемы или даже всей схемы.

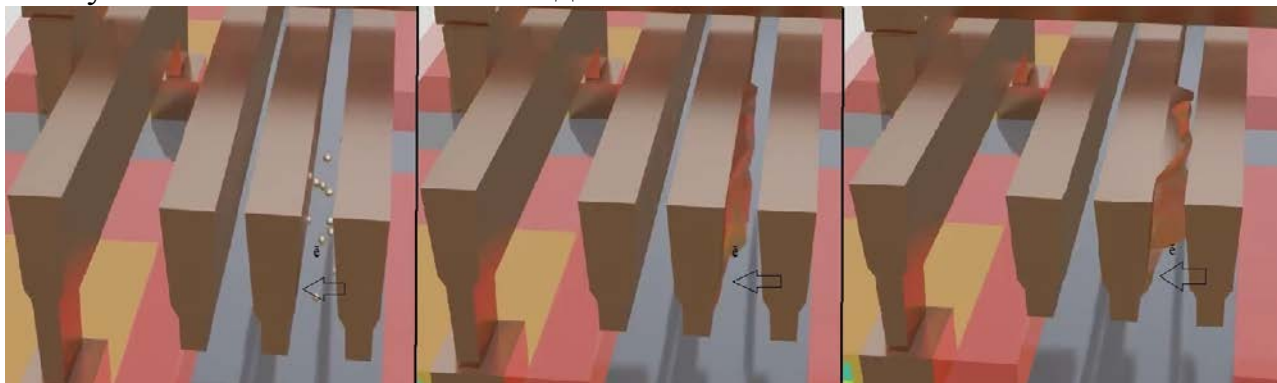


Рисунок 2 – Структурная схема электромиграции

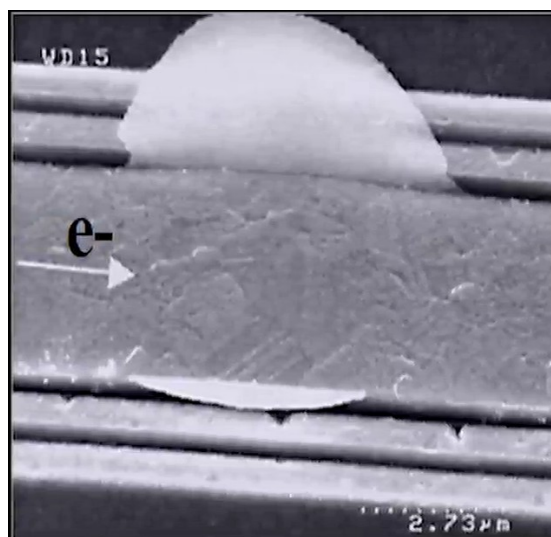


Рисунок 3 – Изображение утолщения в ходе процесса электромиграции, полученное с помощью электронного микроскопа

Кроме этого, в процессе воздействия на структуру электрического поля через диэлектрик протекает так называемый туннельный ток Фаулера-Нордгейма. Из-за наличия в диэлектрике несовершенств (разрывы, ловушки и др.) и воздействия туннельного тока происходит локальная деградация изолирующих свойств диэлектрика и образование дефектов. В дальнейшем увеличение количества дефектов может способствовать пробоем диэлектрика.

Деградация параметров транзисторов под воздействием горячих носителей является результатом физического разрушения поверхности раздела кремния, диоксида кремния, а также подзатворного окисла над областью канала,

локализованной над областью стока МОП-транзистора. Разрушение вызвано инъекцией высокоэнергетических горячих носителей (электронов, дырок) из каналов в подзатворный окисел. Данный феномен приводит к ухудшению основных параметров МОП-транзисторов: тока насыщения, порогового напряжения и максимального значения проводимости канала. В первую очередь, на данный процесс влияют соотношения напряжения на стоке и затворе полевого транзистора. Как правило, одним из показателей генерации горячих носителей является максимальный ток в «карман» полевого транзистора.

Таким образом, получается, что повышенная температура, высокие напряжения и токи ускоряют все перечисленные процессы, что ведет к общему ухудшению всех свойств чипа.

Перечислим несколько факторов, которые приводят к появлению стрессовых факторов:

**Первоначально о возникновении повышенных температур.**

Каждый процессор имеет расчётную тепловую мощность, она же TDP (Thermal Design Power), измеряется в Ваттах. Данная величина отражает максимальное количество тепла, которое может выделять процессор при номинальном режиме работы. Если система охлаждения процессора и система охлаждения компьютера в целом подобрана неправильно, то это повлечёт за собой повышенный нагрев и последствия, описанные выше. Аналогичная ситуация проявляется при отсутствии обслуживания, такого, как: очистка системного блока от пыли и замена термопасты, которая отлично проводит тепло и компенсирует несовершенство соприкасаемых поверхностей крышки процессора и охлаждающей поверхности кулера.

Далее о работе ЦП в режиме максимальной производительности.

Стоит отметить, что в процессе производства процессоры, создаваемые в одних и тех же технологических рамках, производятся на одной технологической линии. Затем некоторые образцы серии выборочно тестируются. Тестирование проходит в экстремальных (по напряжению и температуре) условиях. На основании этих тестов на процессор наносится маркировка о номинальной частоте, на которую рассчитан процессор. Учитывая то, что частота берется с некоторым запасом прочности, и что далеко не все кристаллы были протестированы, можно с большой долей вероятности предсказать, что большинство изделий имеют запас мощности по частоте около 10-15%.

Зачастую пользователь бывает, недоволен номинальной производительностью процессора и в данном случае иногда применяется оверклокинг (разгон), повышение тактовой частоты через BIOS (Базовую Систему Ввода-Вывода) материнской платы или же через стороннее программное обеспечение. В настоящее время большинство материнских плат и процессоров позволяют это делать. Однако простое повышение тактовой частоты результатов не даст, т.к. процессору не будет хватать ресурсов. Для более высокой тактовой частоты требуется больше мощности и, соответственно, напряжение требуется увеличить. Изменение напряжения обеспечит для процессора необходимую мощность для работы с более высоким

коэффициентом частоты. Чрезмерное повышение напряжения будет вести к повышенному износу и процессам, описанным выше.

Наглядными примерами вышеописанных явлений являются:

1. Весьма показательным является пример пользователя портала: [iguides.ru](http://iguides.ru), который проверил деградацию кристалла на практике. Приобретя абсолютно новый процессор Intel Core i7-8700K он добился тактовой частоты в 4.8 ГГц при напряжении в 1.28 В, провёл ряд тестов, которые не вызвали ошибок. Однако, через полгода, проведя аналогичные тесты, в ряде из них он получил системный сбой, ему пришлось повысить напряжение до 1.30 В и в тестах система вновь стала работать стабильно. Данную он проводил периодически, доведя напряжение до 1.36 В, он столкнулся с тем, что тепловыделение процессора сильно возросло и во избежание перегрева пришлось снизить тактовую частоту на 100 МГц. Вероятно, что в дальнейшем ему придётся снижать тактовую частоту для работы системы без сбоев и ошибок. На рис.4 представлена зависимость частоты от напряжения с течением времени.

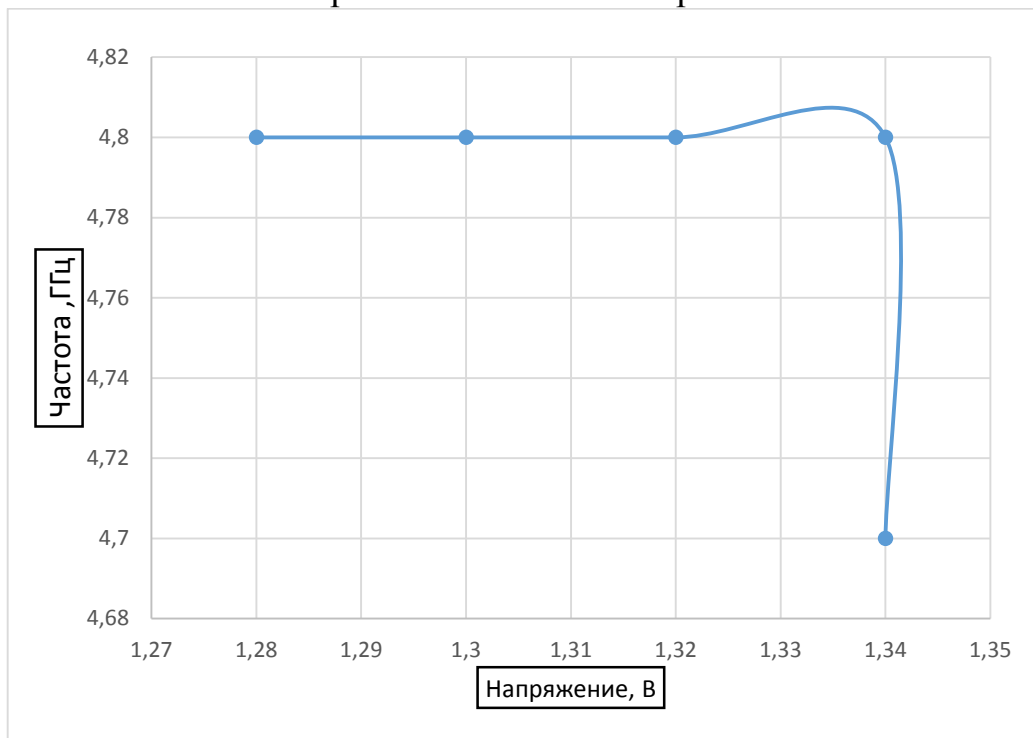


Рисунок 4 – Зависимость тактовой частоты от напряжения с течением времени

2. Ещё одним примером является процессор AMD Ryzen 9 3900X одного из авторов канала “PRO Hi-Tech” на [youtube.com](https://www.youtube.com). В данном случае понижения тактовой частоты не наблюдалось, тем не менее, автор заметил понижение производительности в различных задачах и решил провести тесты в сравнении с идентичным новым процессором. Автор произвёл измерения программами-бенчмарками (программы, служащие эталонным тестом производительности, выдающие количественную характеристику производительности), результаты которых можно увидеть на рис. 5 и рис. 6.



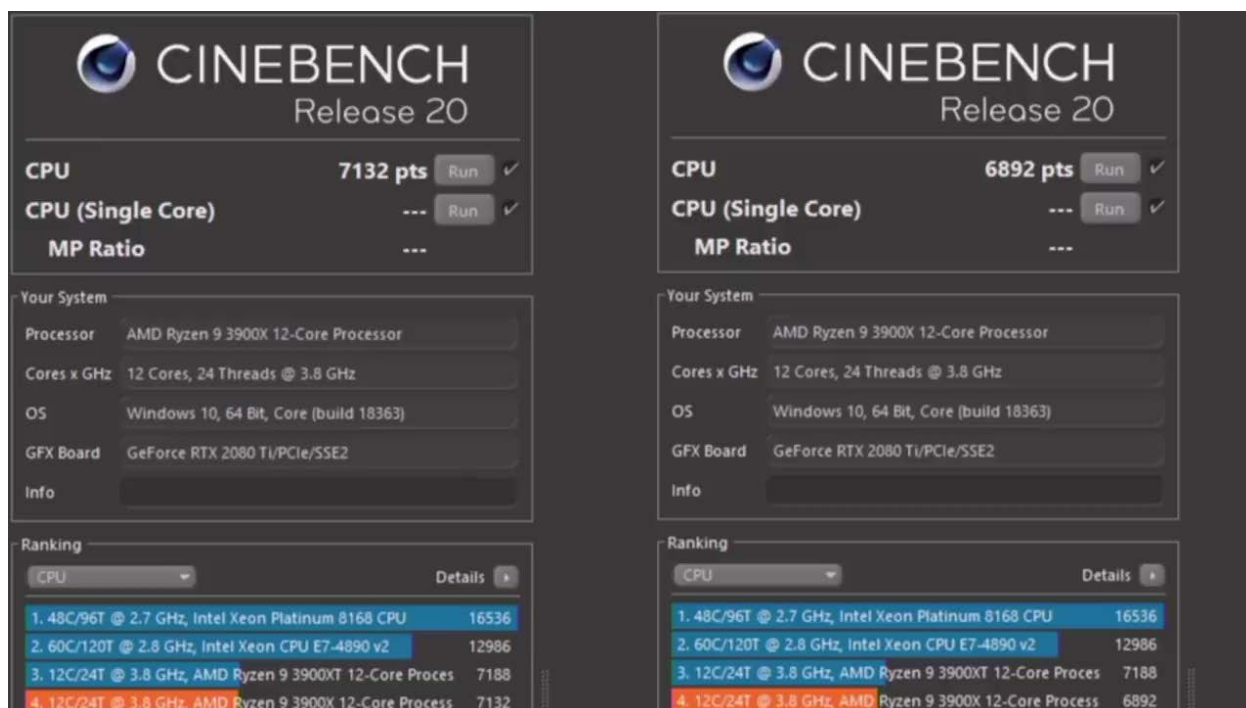


Рисунок 5 – Результаты тестов в программе Cinebench R20

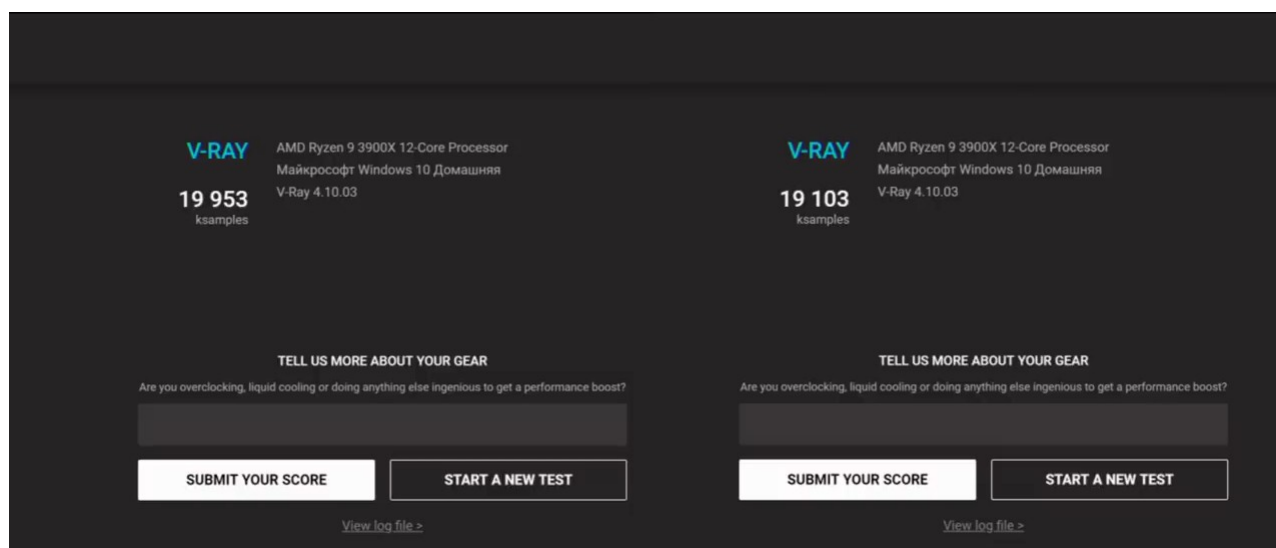


Рисунок 6 – Результаты тестов в программе V-Ray

Из результатов тестов видно, что старый процессор уступает идентичному новому в производительности на 4-5%, это можно было бы посчитать погрешностью, но результаты повторялись спустя множество попыток.

**В итоге** хотелось бы отметить, что центральный процессор является одним из наиболее надёжных компонентов компьютерных комплектующих, но повышенные нагрузки и стрессовые условия работы могут привести к ухудшению его характеристик и процессам, описанным в данном докладе.

### Литература

1. Морозов, Е., Купили современный топовый процессор? Через пару лет он может перестать работать / Е.Морозов // [Электронный ресурс] Режим доступа:

[https://www.iguides.ru/main/other/berete\\_sovremennyu\\_topovyyu\\_protssessor\\_cherez\\_paru\\_let\\_on\\_mozhet\\_perestat\\_rabotat/](https://www.iguides.ru/main/other/berete_sovremennyu_topovyyu_protssessor_cherez_paru_let_on_mozhet_perestat_rabotat/) – Дата доступа: 10.10.2020

2. Разгон процессора // [Электронный ресурс] / ixbt.com Режим доступа: <https://www.ixbt.com/cpu/cpuoverclock.html> -Дата доступа: 10.10.2020

3. Разгон процессора через BIOS , Корпорация Intel, // [Электронный ресурс]

4. Режим доступа: <https://www.intel.ru/content/www/ru/ru/gaming/resources/bios-overclocking.html> – Дата доступа: 10.10.2020

5. Сафонов, С Поговорим про деградацию и БУ товары, которые выдают за новые. / С. Сафонов, И. Корнейчук // [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.youtube.com/watch?v=ExwP2j3mqCY> –Дата доступа:10.10.2020

6. Что такое тактовая частота?, Корпорация Intel // [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.intel.ru/content/www/ru/ru/gaming/resources/cpu-clock-speed.html> – Дата доступа: 10.10.2020