

ЛАБОРАТОРНО УПРАЖНЕНИЕ № 1

ТЕМА: СЕБЕСТОЙНОСТ НА КОМПЮТЪРНИТЕ АРХИТЕКТУРИ

Цел: Да запознае студентите с основните фактори, формиращи себестойността на компютърните архитектури и как те се променят. Да представи значението на въпроса за себестойността при вземане на решения за включване на едни или други характеристики в процеса на проектиране на компютърната архитектура.

I. Теоретична част:

Въпреки, че себестойността не е от съществено значение за някои компютърни проекти – например суперкомпютрите – делът на ценово-ефективните проекти значително е нараснал. Факт е, че през последните 35 години технологичните подобрения се използват, едновременно и за намаляване на себестойността и за увеличаване на производителността на компютърните системи.

1. Основни фактори, оказващи влияние на себестойността

Разходите за производството на компютърни компоненти намалява с времето, дори без да има значителни подобрения на базовата технология за имплементация. Това се отнася като цяло за всякакъв вид производство – себестойността за производството намалява с времето – и е свързано с подобряване на уменията за производство и намаляване на бракуваните, негодни изделия. Най-добрият показател за това е т.нар. *рандеман* – процентът на годни изделия, преминали тестовете за качество. Дали са интегрални схеми (ИС), печатни платки или цели системи, ако рандеманът се увеличи два пъти, себестойността ще намалее наполовина.

За прогнозиране на разходите през целия жизнен цикъл на продукта, важно значение има познаването на промените на рандемана с времето. Например, цената за мегабайт DRAM памет намалява в дългосрочен план, тъй като се определя изключително от себестойността за производство – с изключение на периоди, когато има недостиг или свръхпредлагане – цената и себестойността на DRAM паметите са тясно свързани.

Цената на микропроцесорите също намалява с времето, но тъй като те не са стандартизирани както DRAM, то взаимовръзката между цената и себестойността е по-сложна. В периоди на по-голяма конкуренция връзката е по-тясна, като цената вероятно не спада под себестойността.

Обемът на продукцията е вторият важен фактор при определяне на себестойността. Увеличаването на броя на произведените ИС или компютърни системи (КС), води до пропорционално нарастване на рандемана, а от там и до намаляване на себестойността. Практическото правило е: двукратното увеличение на обема на продукцията води до намаляване на себестойността с 10%. Освен това, разходите за разработка се разпределят между повече произведени компютри, което позволява цената им да се намали близо до тяхната себестойност.

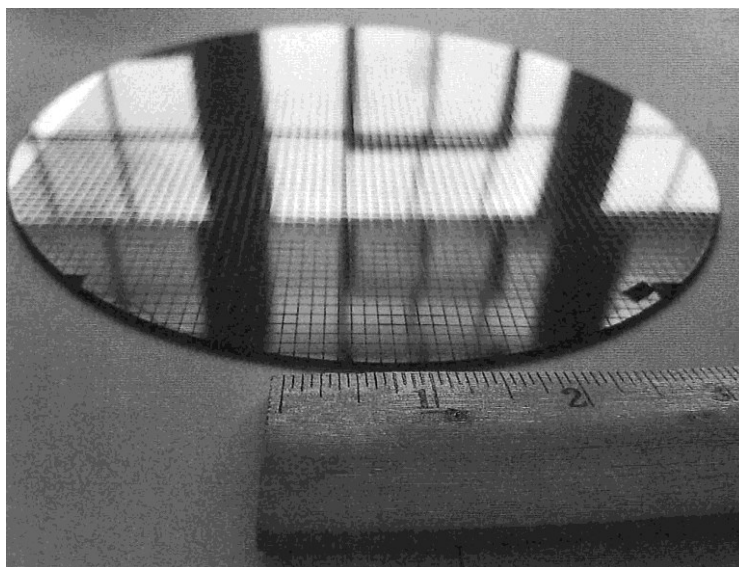
Стоки за широко потребление (или само стоки) са продукти, които се продават от множество доставчици в големи обеми и по същество са идентични. На практика, стандартните

DRAM памети, флаш паметите, мониторите и клавиатурите са стоки за широко потребление, каквито са и всички продукти, продавани в хранителните магазини. През последните 30 години голяма част от индустрията за персонални компютри е бизнес със стоки за широко потребление, фокусиран върху изграждането на настолни и преносими компютри, работещи под Microsoft Windows. Тъй като много производители доставят почти идентични продукти, пазарът е силно конкурентен. Разбира се, тази конкуренция намалява разликата между себестойност и продажна цена, но също така намалява себестойността. В търговията със стоки за широко потребление продаваните обеми са големи, освен това продуктите са унифицирани, което позволява на множество доставчици да се конкурират в производството на компоненти за тях. Резултатът от това е, че общата цена на продукта е по-ниска, поради конкуренцията между производителите на компоненти и високата производствена ефективност, която се постигнала в следствие на големите производствени обеми. Конкуренцията води до това, че се постигат много добри ценови показатели в ниския клас компютри, макар и с много ограничени печалби – характерно за всеки бизнес със стоки за широко потребление.

2. Себестойност на интегралните схеми

На все по-конкурентния пазар на компютри, стандартните компоненти – дискове, флаш памети, DRAM и т. н. – се превръщат в значителна част от общите разходи за изграждане на всяка компютърна система. По-голяма част от себестойността в различните класове компютри се формира от разходите за интегрални схеми. На практика при персоналните мобилни компютри (ПМК), които, заради по-високата надеждност, са базирани на ИС от типа „системи върху чип“ (СВЧ), разходите за интегрални схеми формират по-голяма част от себестойността на компютъра. Ето защо компютърните инженери трябва да знаят какво определя цената на ИС, а от там и себестойността на настоящите компютри.

Въпреки, че разходите за производство на ИС намаляват експоненциално, основният процес за тяхното производство не е променен: Определен брой схемни пластини се произвеждат върху подложка от чист (монокристален) полупроводников материал (фиг. 1), най-често силиций. Схемните пластини върху подложката се тестват едновременно и след това се отделят, чрез разрязване. Всяка от годните пластини се поставя в корпус, запояват се крачетата и се тества.



Фиг. 1. Полупроводникова подложка с диаметър 200 mm.

Разходите за производството на една готова ИС могат да се определят по следната формула:

$$P_{\text{ИС}} = \frac{P_{\text{пл}} + P_{\text{т}} + P_{\text{к}} + P_{\text{тис}}}{B_{\text{гис}}},$$

където: $P_{\text{ИС}}$ – Разходи за ИС; $P_{\text{пл}}$ – Разходи за пластини; $P_{\text{т}}$ – Разходи за тестване на пластините; $P_{\text{к}}$ – Разходи за корпуси; $P_{\text{тис}}$ – Разходи за тестването на ИС; $B_{\text{гис}}$ – Брой годни ИС.

За да се определи броят на годните ИС, които се получават от една подложка, първо е необходимо да се определи общият брой на пластините в подложката, а от там лесно се получават разходите за пластини:

$$P_{\text{пл}} = \frac{P_{\text{пд}}}{B_{\text{пл}} \times \Pi_{\text{гпл}}},$$

където: $P_{\text{пд}}$ – Разходи за подложка; $B_{\text{пл}}$ – Броят пластини в подложката; $\Pi_{\text{гпл}}$ – Процент на годни пластини в подложката (рандеман).

Броят пластини в подложка може да се определи приблизително със следната формула:

$$B_{\text{пл}} = \frac{\pi \times \left(\frac{d}{2}\right)^2}{S_{\text{пл}}} - \frac{\pi \times d}{\sqrt{2} \times S_{\text{пл}}},$$

където: d – Диаметър на подложка; $S_{\text{пл}}$ – Площ на пластината.

Първата част от формулата е отношението на площта на подложката (πr^2) към площта на пластината. Втората част показва приблизително броя на квадратните пластини по периферията на кръглата подложка, като обиколката на подложката (πd) се разделя на диагонала на квадратната пластина.

Пример: Ако диаметърът на една подложка d е 300 mm (30 cm), да се намерят броя на пластините в нея $B_{\text{пл}}$: 1) За квадратни пластини със страна 1,5 cm и 2) За квадратни пластини със страна 1,0 cm.

Ако страната е 1,5 cm, то лицето на квадрата е 2,25 cm. Тогава максималния брой пластини в подложката е:

$$B_{\text{пл}} = \frac{\pi \times \left(\frac{30}{2}\right)^2}{2,25} - \frac{\pi \times 30}{\sqrt{2} \times 2,25} = \frac{706,9}{2,25} - \frac{94,2}{2,12} = 270$$

Максималния брой пластини с размер 1,0 cm е:

$$B_{\text{пл}} = \frac{\pi \times \left(\frac{30}{2}\right)^2}{1} - \frac{\pi \times 30}{\sqrt{2} \times 1,0} = \frac{706,9}{1,0} - \frac{94,2}{1,41} = 640$$

За определяне на дела на годните пластини в една подложка, ако се приеме, че дефектите са равномерно разпределени в площта се използва формулата:

$$B_{\text{гпл}} = B_{\text{пл}} \times \frac{1}{(1 + B_{\text{дф}} \times S_{\text{пл}})^N},$$

където: $B_{гпл}$ – Брой годни пластини в подложка; $S_{пл}$ – Площ на подложката; $B_{дф}$ – Брой дефекти в единица площ; N – фактор, отчитащ сложността на производствения технологичен процес.

Броят дефекти в единица площ през 2017 г. за 28 nm и за 16 nm технологични размери са били съответно: 0,012 – 0,016 и 0,016 – 0,047 дефекта на cm^2 .

За 28 nm технологичен процес факторът N през 2017 г. е бил между 7,5 – 9,5, а за 16 nm – от 10 до 14.

Пример: Ако броят на дефектите в един cm^2 е $B_{дф}=0,047$, а $N=12$, да се намери броят на годни пластини в подложка ($B_{гпл}$) за пластини със страна: 1,5 cm и 1,0 cm.

За по-големите пластини се получава:

$$B_{гпл} = 270 \times \frac{1}{(1 + 0,047 \times 2,25)^{12}} = 80$$

За пластините с размер на страната 1 cm резултатът е:

$$B_{гпл} = 640 \times \frac{1}{(1 + 0,047 \times 1,0)^{12}} = 368$$

Близо 30% от големите и около 60% от малките пластини са годни.

Много от микропроцесорите са с размер на пластините в диапазона между 1,0 и 2,25 cm^2 . Някой от 32-битовите микропроцесори за вградени системи са по-малки от 0,05 cm^2 . Има ИС за сървъри и графични процесори по-големи от 8 cm^2 .

Предвид огромния ценови натиск върху продукти като DRAM и SRAM памети, проектантите включват резервиране на елементите в ИС като начин за повишаване процента на годните ИС, т.е. рандемана. От няколко години насам в DRAM паметите се добавят резервни запомнящи клетки, които да заменят такива, които са показали дефекти по време на тестовете. Проектантите използват подобни техники в SRAM масивите, използвани за кеш в микропроцесорите. По същата причина в графичните процесори има 4 излишни процесора от общо 84. Очевидно е, че добавянето на резервни елементи в ИС има за цел увеличаване на рандемана.

През 2017 г. разходите за производство на подложка с диаметър 300 mm по 28 nm технологичен процес са били между 7000 и 9000 лева, а по 16 nm технология – около 12000 лв. Така, ако разходите за производство на подложката са 12000 лв., то разходите за пластина с площ 1 cm^2 ще бъдат 27 лв., а за 2,25 cm^2 пластина – 100 лв., или близо 4 пъти по-големи разходи за пластина, която е два пъти по-голяма.

Процесът на производство определя разходите за подложката, и рандемана от нея. Единственото, което проектантът може да определи, за да повлияе на себестойността, е площта на пластината. На практика, тъй като броят на дефектите за единица площ е малък, броят на годните пластини от подложка, а следователно и себестойността за една пластина нараства с площта на пластината на квадрат. Проектантът определя размера на пластината, а по такъв начин и цената и като решава какви функции да добави или премахне, а също и чрез броя на входно-изходите пинове.

Преди да може да се вложи в компютъра подложката трябва да се постави в корпус и да се тества отново. Това увеличава разходите с около 50%.

3. Постоянни и променливи разходи при формиране на себестойността

Описаните в предходната точка разходи са променливи, те са основни за определяне на себестойността на една пластина при производство на повече от един милион ИС. При по-малки производствени обеми, определящи за себестойността на една ИС са постоянните разходи. Постоянните разходи се формират от цената на набора от маски за производство. На всеки етап от производствения процес е необходима отделна маска. В съвременните технологични процеси с 10 метализирани слоя разходите за създаване на маските са 7 млн. лв. за 16 nm технология и 2,5 млн. лв. за 28 nm технология.

За намаляване на тези разходи съществува възможност за включване на няколко различни проекта от различни проектантски бюра в една обща маска, за производството им върху една обща подложка. Така разходите се разпределят и всяко проектантско бюро получава по няколко нетествани пластини от своя проект за провеждане на изпитания и последваща реализация. Така се подпомага откриването и отстраняването на неизправности в проекта, но то не е приложимо, ако обемът, в който трябва да се реализира проекта е в рамките на десетки или стотици хиляди броя, тъй като стойността на маските остава висока. В този случай могат да се използват програмируеми логически интегрални схеми (ПЛИС), които са готови ИС с гъвкава структура. Вместо с маски проектът може да се реализира в структурата на тази гъвкава ИС.

4. Себестойност и цена на интегралните схеми

С превръщането на компютрите в масова стока, маржът между разходите за производство и крайната цена, на която продуктът се продава, се свива. Тази разлика се разпределя между: научноизследователската и развойна дейност в компанията, маркетинга, продажбите, поддръжката на производственото оборудване, наема на сгради, разходите за финансиране, предварителните печалби и данъци. Повечето компании изразходват едва от 4% (в бизнеса с компютри за широко потребление) до 12% (в бизнеса със сървъри от висок клас) от приходите си за научноизследователската и развойна дейност, в която влиза и работата на всички инженери.

5. Производствени разходи и операционни разходи

При скалируемите сървърни хранилища (ССХ) разходите за работата на оборудването, състоящо се от десетки хиляди сървъри са значителен дял от общите разходи за притежание, които включват и разходите за закупуване. Отчисленията от покупната цена за амортизация на сървърите и мрежовото оборудване в ССХ, чиито жизнен цикъл е около 3-4 години са равни само на половината от месечните разходи за тяхната работа. Около 40% от работните разходи за ССХ са за електрическа енергия, амортизацията на електроенергийната инфраструктура и системите за охлаждане на сървърното оборудване. Това показва, че за да се намалят операционните разходи за ССХ е необходимо, в процеса на проектиране, да се оптимизира енергопотреблението.

II. Практическа част:

В практическата част студентите ще използват статистическа информация, за да изследват, как различните проектни решения оказват влияние на разходите за производство на ИС.

В таблица 1 са представени хипотетични данни за съвременни ИС, които оказват влияние на себестойността им.

Таблица 1. Производствени фактори, влияещи на себестойността

Название на ИС	Площ на пластината $S_{пл}$ (mm ²)	Брой дефекти $B_{дф}$ (за cm ²)	N	Технологичен размер (nm)	Брой транзистори (в млрд.)	Брой ядра
BlueDragon	180	0,03	12	10	7,5	4
RedDragon	120	0,04	14	7	7,5	4
Phoenix	200	0,04	14	7	12	8

Забележка:

Подложките за производство и на трите вида ИС са с диаметър $d=450\text{ mm}$.

III. Въпроси и задачи:

1. Определете рандемана на ИС с название Phoenix?
2. Определете рандемана на ИС с название RedDragon?
3. Защо Phoenix има по-висок брой дефекти на единица площ в сравнение с BlueDragon?
4. Може ли да се изпълни поръчка за доставка на 50000 RedDragon ИС и 25000 Phoenix ИС на месец, ако капацитета на фабриката за производство е общо 70 подложки на месец? Колко подложки са необходими за производството за всеки вид ИС?

Рандеманът за Phoenix е малък, затова би могло ИС да се направи по-евтина, като онези ИС без дефекти да се продават като 8-ядрени версии на процесора, ИС с дефекти в 1 до 4 ядра се продават като 4-ядрени процесори, тези с дефекти в 5 или 6 от ядрата да се продават като 2-ядрени, а тези с дефекти в 7 от ядрата – като 1-ядрени.

5. Изчислете рандемана за 1-ядрената версия на Phoenix, като намалите площта на пластината до 1/8 от дадения в таблицата размер. Използвайте същия подход за да определите рандемана за 2-ядрената и 4-ядрената версии.

6. Използвайте получените резултати за да определите кои ИС си заслужава да се поставят в корпус и да се продават?

7. Ако първоначалните разходи за производство на Phoenix ИС с 8 ядра са 35 лв., то какви ще бъдат разходите за новите Phoenix ИС?