

# Метод проверки правил электромиграции в СБИС

В.Ш. Меликян

ЗАО “СИНОПСИС АРМЕНИЯ”, vazgenm@synopsys.com

**Аннотация** — Описаны новый метод проверки правил электромиграции в СБИС, а также возможности соответствующего программного пакета, учитывающие реалии субмикронных технологий и удовлетворяющие современным практическим требованиям проектирования СБИС.

## I. ВВЕДЕНИЕ

При переходе на субмикронные технологии изготовления сверхбольших интегральных схем (СБИС) происходит перераспределение различных физических явлений, с точки зрения их значимости, на работоспособность схем [1]. В частности, заметно повышается роль электромиграции [2], т.е. массового перемещения металла, вследствие обмена кинетической энергии между проводящими электронами и атомами внутренних металлических межсоединений СБИС при воздействии большой плотности тока.

Электромиграция определяется [3] в виде:

$$J = -\frac{N_A}{kT} D_0 e^{-\frac{Q}{kT}} eZ^* \rho j, \quad (1)$$

где  $N_A$  - плотность атомов в кристаллической решетке;  $D_0$  - коэффициент диффузии;  $Q$  - энергия активации;  $eZ^*$  - результирующий заряд;  $\rho$  - удельное сопротивление;  $k$  - постоянная Больцмана;  $T$  - абсолютная температура;  $j$  - плотность тока.

Это явление проявляется при значениях плотности тока порядка  $10^6 \text{ A/cm}^2$  и более. Вследствие электромиграции в разных отрезках внутренних межсоединений СБИС могут образовываться впадины и отростки (рис. 1).

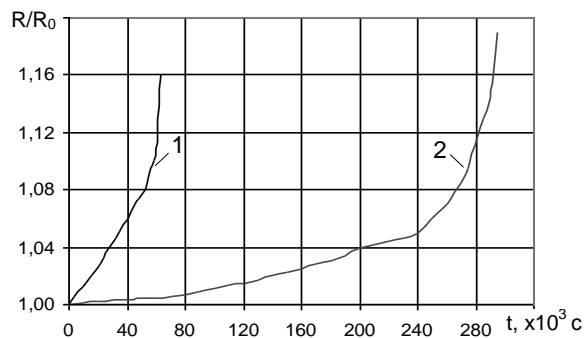


**Рис. 1.** Нарушения, образованные вследствие электромиграции в металлических проводниках: а – в одном слое; б – между двумя слоями

Причиной этому является неоднородность атомных потоков, т.е. дефекты кристаллической решетки, дислокации, многокристалльные структуры и их особенности, наличие теплового градиента и ряд других внешних и внутренних факторов.

Функционирование СБИС может нарушиться не только при разрыве или коротком замыкании проводников, но и при заметном увеличении их сопротивления. Зависимость сопротивления проводника от времени вследствие электромиграции показана на рис. 2.

Кривая 1 получена при плотности тока  $j=3 \cdot 10^3 \text{ A/cm}^2$  и температуре  $T=160^\circ\text{C}$ , а кривая 2 - соответственно при  $j=2,5 \cdot 10^3 \text{ A/cm}^2$  и  $T=140^\circ\text{C}$ . Относительное сопротивление межсоединения СБИС сначала увеличивается медленно, постепенно повреждая проводник, а с некоторого момента резко, что в течение короткого времени приводит к его разрыву.



**Рис. 2.** Зависимость сопротивления алюминиевого проводника от времени вследствие электромиграции

Для начального периода изменения сопротивления вследствие электромиграции экспериментальным путем найдена зависимость [4]

$$R(T) = C j^n t e^{-Q/kT}, \quad (2)$$

где  $C$  - постоянная, зависящая от параметров материала, температуры и формы проводника;  $n$  - степенной указатель плотности тока  $j$ . Посредством измерения сопротивления вследствие электромиграции при разных температурах можно

найти энергию активации, а при разных значениях плотности тока – степенной указатель.

Для среднего времени повреждения (СВП) проводника используется следующая формула [5]

$$\text{СВП} = C' j^{-n} e^{-Q/kT}, \quad (3)$$

Вследствие электромиграции часто СБИС выходят из строя. Это связано с рядом причин, одной из которых является то, что особенность электромиграции, в основном, проявляется в ходе эксплуатации (иногда – даже в течение нескольких лет) СБИС. Поэтому последствия электромиграции не могут быть легко прогнозированы в процессе проектирования или же обнаружены путем тестирования опытных образцов СБИС. Учитывая важность электромиграции, предприятия-изготовители СБИС добавляют в правила проектирования сведения, направленные на предотвращение данного явления. Параллельно с прогрессом технологий производства СБИС намечается также тенденция постоянного ужесточения этих правил. Однако из-за объективных трудностей проверки правил электромиграции последние до сих пор не внесены в соответствующие программные средства, т.е. оставлены за проектировщиками, что, по понятным причинам, недопустимо. Несмотря на то, что последние годы интенсивно разрабатываются средства проверки правил электромиграции в СБИС, имеющиеся программные инструментари [6-9] требуют недопустимо больших затрат машинных ресурсов.

Кроме этого, наиболее известные программные пакеты, такие как VoltageStorm [6], ElectronStorm [7], Astro-Rail [8] и Astro-Xtalk [9], имеют ряд общих и специфических недостатков. В частности, программные средства VoltageStorm и Astro-Rail предназначены для проверки правил электромиграции только в сетях питания СБИС, а ElectronStorm и Astro-Xtalk – только для сигнальных путей.

К общим недостаткам следует отнести также: необходимость получения дополнительных экстракций и проведения моделирования, большой объем требуемой исходной информации, отсутствие возможностей исправления обнаруженных ошибок и т.д.

Специфическими недостатками программных средств VoltageStorm и ElectronStorm являются: моделирование списком электрических элементов и связей, игнорирование фактом округления углов в реальных топологиях, необходимость использования других средств в процессе проверки (Fire & Ice QX, Thunder), проверка распределения плотности тока методом конечных элементов (МКЭ) [10].

Специфическими недостатками программных средств Astro-Rail и Astro-Xtalk являются:

использование асимптотического метода оценки сигнала, возможность осуществления только грубой проверки, расчет плотности тока в межсоединениях по их ширине и посредством суммарной площади межслойных переходов.

Отмеченные недостатки ограничивают возможности использования существующих программных средств. Следовательно, в настоящее время весьма актуальна разработка средств проверки правил электромиграции в СБИС, обеспечивающих допустимые расходы требуемых затрат машинных ресурсов. Кроме того, к подобным средствам предъявляются также следующие требования: возможность проверки правил электромиграции одновременно как в сетях питания, так и в сигнальных линиях; точность проверки, удовлетворяющая требованиям эксплуатации современных СБИС; удобство и простота использования; наличие возможности корректировки выявленных ошибок; выявление избыточной ширины во внутренних соединениях СБИС и формирование соответствующих сообщений; составление отчетов о выявленных ошибках в принятых форматах и т.д.

## II. МЕТОД ПРОВЕРКИ

Выбор типовых топологических структур (ТС) предлагается проводить с учетом частоты их использования в реальных СБИС и покрываемых ими удельных площадей на основе статистических данных (табл. 1). По этим критериям для моделирования выбраны ТС, приведенные на рис.3, а в табл. 1 выделены выбранные ТС.

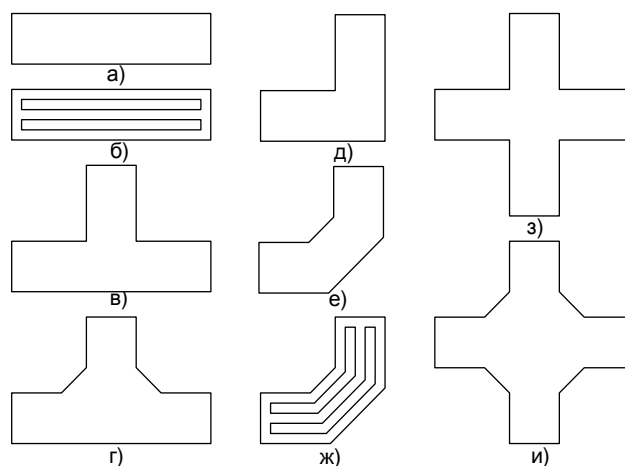


Рис. 3. Типовые структуры, выбранные для моделирования

Моделирование этих структур предоставляет возможность автоматической оценки наибольшего значения плотности тока в этих структурах в зависимости от их геометрических параметров и граничных условий.

Таблица 1

Статистические данные для обоснования выбора типовых структур

Типовая структура	СБИС А		СБИС Б		СБИС В		СБИС Г	
	Площадь, %	Количество	Площадь, %	Количество	Площадь, %	Количество	Площадь, %	Количество
Рис. 3а	39	16643910	36	20582714	40	7374407	31	6583941
Рис. 3б	10	9283	14	16700	0	0	0	0
Рис. 3в	4	56859	2	13269	9	170152	5	8195
Рис. 3г	0	0	4	2582	0	0	0	0
Рис. 3д	16	341139	4	840437	11	166584	15	225007
Рис. 3е	0	0	12	38474	2	39033	0	5
Рис. 3ж	1	28	1	56	0	0	0	64
Рис. 3з	3	65401	3	26780	6	95161	2	16339
Рис. 3и	0	0	5	1341	0	0	0	0
Итого	73		81		68		53	

Для моделирования выбранных ТС в качестве граничных условий были заданы плотности тока по направлению нормали. Найдена зависимость наибольшего значения плотности тока от граничных условий и геометрических параметров рассматриваемой модели.

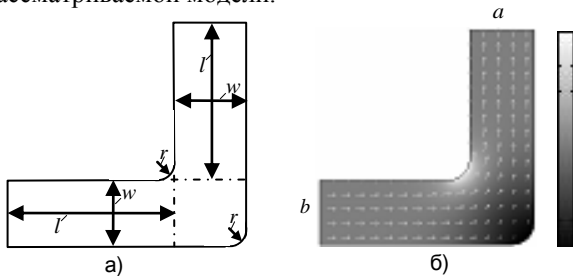


Рис. 4. Пример ТС: а – параметры; б – распределение плотности тока

Продемонстрируем суть метода на примере ТС, представленной на рис.4. В этом случае имеет место равномерное распределение токов по направлению нормали, равное  $j_n$  и  $-j_n$ , соответственно, для ребер  $a$  и  $b$ ; для остальных - 0. По карте распределения плотности тока видно, что у внутреннего угла модели ток сгущается, а у внешнего, наоборот, разрежается. Произведено моделирование с целью выявления закономерностей распределения тока при неравномерных граничных условиях. Для ребра  $a$  ТС на рис.5а было применено граничное условие с равномерным распределением тока  $j_n=1$ , а для ребра  $b$  на рис.5б распределение в основном, сосредоточено в верхнем углу. Плотность тока резко убывает у верхнего ребра и увеличивается у нижнего при отдалении от ребра  $b$ . В середине прямого участка плотности этих токов в наибольшей степени приближаются друг к другу (рис. 5в).

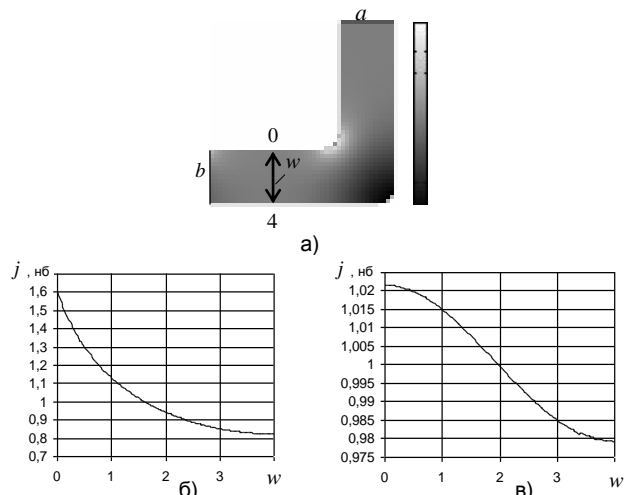


Рис. 5. Случай неравномерного распределения граничных токов

Было выявлено также, что одновременно с увеличением длины ветвей ТС наибольшее и наименьшее значения (рис.5в) стремятся к единице. Следовательно, можно предположить, что при увеличении длины ветвей  $l$  рассматриваемой модели уменьшается воздействие распределения граничных условий на наибольшее значение плотности тока (НЗПТ). Это позволяет избежать расчета распределения граничных условий модели и выявления зависимости наибольшей плотности тока от этого распределения. Расчет распределения граничных токов вновь приводит к решению дифференциальных уравнений. Необходимо найти такую наименьшую длину ветвей  $l_{HM}$ , при которой для значений длин ветвей, превышающих эту, относительная разница наибольших значений плотности тока модели не превышает заданную погрешность  $\epsilon$  при любых возможных  $r$  и  $w$ . Длину  $l_{HM}$  необходимо найти для таких граничных условий, которые с практической точки зрения можно считать наихудшими, так как при других граничных условиях для одного и того же значения  $\epsilon$  получим более меньшие значения  $l_{HM}$ . В результате исследования для рассматриваемой ТС была выбрана структура, представленная на рис.6, обеспечивающая наихудшие граничные условия.

С помощью выбранной структуры найдена зависимость длины  $l_{HM}$  от радиуса  $r$  и ширины  $w$  (рис.6).

Произведен опыт с целью выявления значительности изменения наибольшего значения плотности рассматриваемого тока в зависимости от значений длин  $l_1$  и  $l_2$ , превосходящих  $l$ . Учитывая, что одновременно с уменьшением длины  $l$  увеличивается влияние граничных условий на НЗПТ, значение  $l$  было выбрано по возможности минимальным -  $l = 3 \cdot r$  (это значение наименьшее, так

как при  $l = 2 \cdot r$  внутренние ребра равны нулю (рис. 6)). Значение  $w$  выбрано равным  $l$ . Такое значение  $w$  практически можно считать наилучшим, так как с увеличением  $w$  также увеличивается влияние граничных условий на НЗПТ. В случае величин  $w$ , превышающих  $l$ , погрешность  $\varepsilon$  для НЗПТ с практической точки зрения недопустимо велика. Очевидно, что в этом случае результаты опытов не зависят от величины  $r$ . Принимая  $r=1$ , получим  $l=3$ ,  $w=3$ . Из-за наложения ветвей значения  $l_1$  и  $l_2$  одновременно не могут превышать  $l$ . Вследствие этого фиксируется значение одной из них почти равным  $l$  и изменяется значение только другой величины. На основе зависимости НЗПТ от  $l_1$ , полученной в результате опыта, можно заключить, что в случае  $l_1$ , почти равным  $l$ , получается НЗПТ, которое при большем  $l_1$  (после которого изменение значения тока меньше, чем ошибка программного средства, использованного для получения модели) меньше полученного НЗПТ не более чем на 1% (рис. 7а). Учитывая также тот факт, что с увеличением  $l$  уменьшается влияние граничных условий на НЗПТ, можно утверждать, что в этом случае разница составит 1%.

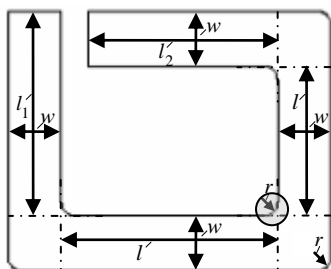


Рис. 6. Структура, выбранная для нахождения значения  $l_{HM}$

Для вывода зависимости НЗПТ от одновременного изменения  $l_1$  и  $l_2$  сначала изменяем  $l_1$  в диапазоне значений, меньших чем  $l$  (рис. 7б), оставляя  $l_2$  почти равным  $l$ , после чего производим одновременное изменение  $l_1$  и  $l_2$  в том же промежутке значений (рис. 7в). Таким образом, можно заключить, что результаты, полученные для области, большей чем  $l$ , почти не изменятся при одновременном изменении  $l_2$ . Полученные результаты дают возможность считать значения  $l_1$  и  $l_2$  равными  $l$  при нахождении зависимости НЗПТ от параметров рассматриваемой модели.

Результаты проведенных опытов показали, что для худшего избранного варианта при  $l/w = 1,5$  относительная разница полученных НЗПТ составляет 0,5...0,6% от значения, полученного для НЗПТ при больших значениях  $l$  (рис. 8). Принимая во внимание то, что погрешность наилучшего варианта намного меньше погрешности наихудшего, можно утверждать,

что суммарная погрешность будет меньше 1%. Такой процент погрешности будет наибольшим, так как при увеличении  $l$  он резко уменьшается как в наихудшем, так и в наилучшем вариантах, стремясь к нулю.

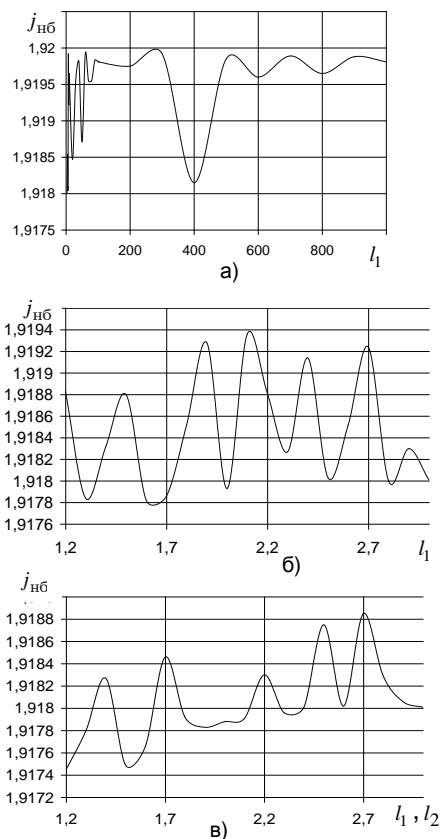


Рис. 7. Зависимость  $j_{нб}$  от  $l_1$  при: а -  $l_1 \geq l$ ; б -  $l_1 \leq l$ ; в - от  $l_1$  и  $l_2$  ( $l_1 \leq l, l_2 \leq l$ )

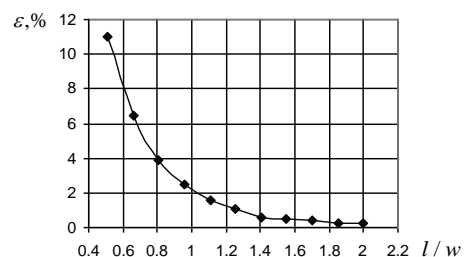


Рис. 8. Зависимость погрешности  $\varepsilon$  от  $l/w$

Для рассматриваемой ТС при соблюдении ограничения

$$l/w \geq 1,5 \quad (4)$$

были проведены опыты с целью нахождения зависимостей плотности тока  $j_{нб}$  от параметров  $r$  и  $w$ . В результате предыдущего опыта было также получено, что  $j_{нб}$  не зависит от  $w$  и  $r$  и наоборот, то есть имеет вид

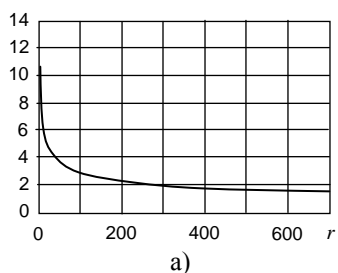
$$j_{нб} = f(r) \cdot \varphi(w) \cdot j, \quad (5)$$

где

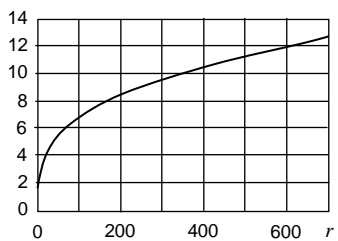
$$j = \frac{I}{w}, \quad (6)$$

и представляет собой плотность тока в равномерно распределенной области. Тем самым это является граничным ограничением для тех ребер рассматриваемой ТС, которые по направлению нормали имеют значение тока, отличное от нуля.

Для получения функций  $f$  и  $\varphi$  были проведены два опыта, в одном из которых было зафиксировано значение параметра  $w$  ( $w = 1000$ ) и получена зависимость  $j_{нб}$  от  $r$  (рис. 9а), а во втором - зафиксировано значение параметра  $r$  ( $r = 1$ ) и найдена зависимость от  $w$  (рис. 9б).



а)



б)

Рис. 9. Зависимость  $j_{нб}$  от: а -  $r$ ; б -  $w$

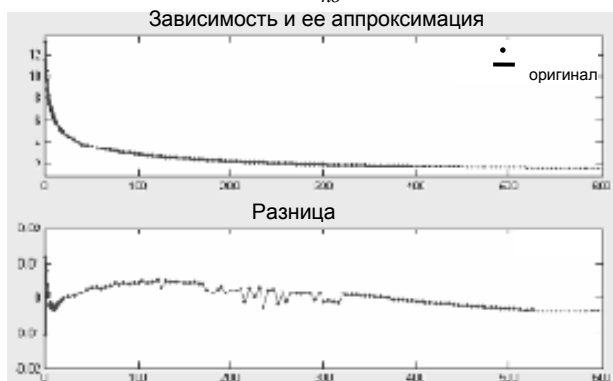


Рис. 10. Результат аппроксимации зависимости  $j_{нб}$  от  $r$

В результате аппроксимации функцией зависимости, приведенной на рис. 9а, для рассматриваемой ТС получено (рис. 10 и 11)

$$j_{нб} = (13,2 \cdot r^{-0,33} - 0,06368) \cdot (0,09743 \cdot w^{0,3365} + 0,0005986) \cdot j \quad (7)$$

Используя выражения (6) и (7), для  $w$  получим

$$\frac{0,09743 \cdot w^{0,3365} + 0,0005986}{w} = \frac{j_{нб}}{I \cdot (13,2 \cdot r^{-0,33} - 0,06368)}. \quad (8)$$

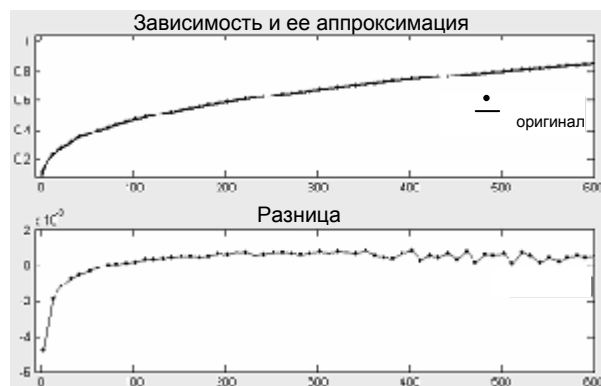


Рис. 11. Результат аппроксимации зависимости

$j_{нб}$  от  $w$

На рис.12 приведена общая схема разработанного метода проверки правил электромиграции, а на рис.13 - обобщенная схема интеграции разработанного метода и процесса проектирования СБИС.



Рис. 12. Общая схема метода проверки

Разработан программный пакет, реализующий предложенный метод проверки правил электромиграции. В пакет включены два программных средства: EMETS - выявление

электромиграции посредством типовых структур, TS-Calculator – калькулятор типовых структур.

Таблица 2

**Затраты машинного времени и памяти, необходимые для получения распределения плотности тока в ТС угла**

Сеть разбиения	Без улучшений	С одним улучшением	С двумя улучшениями	С тремя улучшениями
Время, с	0,125	0,391	1,734	7,984
Память, кб	1,3	8,7	28,9	97,4

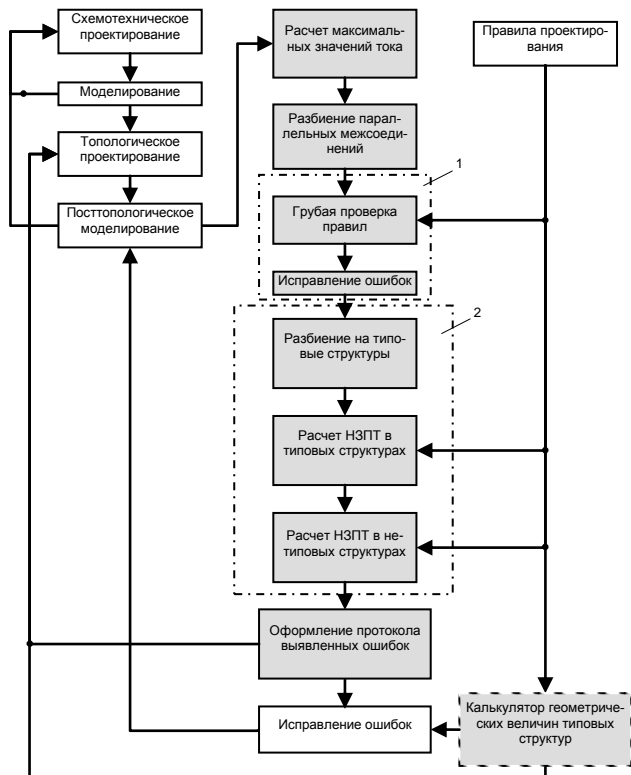
Отметим, что при применении варианта с минимальными временем и памятью, т.е. с вариантом без улучшения, для расчета НЗПТ в 50000 ТС требуется 1 час 44 мин, в то время как при применении полученной формулы для рассматриваемой ТС необходимо всего 0,0257 с.

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный метод проверки правил электромиграции в СБИС и соответствующий программный пакет обладают неоспоримыми преимуществами по сравнению с существующими аналогичными средствами и удовлетворяют современным практическим требованиям проектирования СБИС.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Arnaud L. Electromigration Threshold Length Effect in Dual Damascene Copper-Oxide Interconnects // IEEE, Physics Symposium Proceedings. -2002. - P. 433-434.
- [2] Leon R. Electromigration Failure in Au and Joule Heating Induced Oxidation in Cu Conductors // NEEP. – Pasadena, 2001. <http://parts.jpl.nasa.gov/resources.htm>.
- [3] Yoh G., Najm F. A Statistical Model for Electromigration Failures // First International Symposium on Quality of Electronic Design. - 2000. – P. 45-50.
- [4] Buerke A., Wendrock H., Wetzig K. Study of Electromigration Damage in Al Interconnect Lines inside a SEM // Crystal Research and Technology. - Dresden, 2000. – P. 721-730.
- [5] Black J.R. Electromigration-A Brief Survey and Some Recent Results // IEEE Transactions On Electron Devices. - 1969. - V. ED-16. - № 4. - P. 338-347.
- [6] Cadence Inc., VoltageStorm Transistor-Level PGS User Guide, V. 4.0.0, September, 2003.
- [7] Cadence Inc., ElectronStorm Manual, V. 4.0.0, September 2003.
- [8] Synopsys Inc., Astro-Rail User Guide, V. W-2004.12, December, 2004.
- [9] Synopsys Inc., Astro User Guide, V. W-2004.12, December, 2004.
- [10] Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы. – М.: Мир, 1984. - 428 с.



**Рис. 13. Обобщенная схема интеграции метода проверки и процесса проектирования СБИС**

В отличие от программных средств Astro-Rail и Astro-Xtalk, проверка в новом пакете осуществляется без дополнительного извлечения и моделирования. Кроме того, вышеупомянутая проверка производится в несколько раз быстрее. Например, при моделировании схемы, содержащей всего 5\*10<sup>5</sup> элементов, для получения значений динамических токов по каждому ЭЭ с помощью программных средств Astro-Rail и Astro-Xtalk требуется более двух дней, в то время как для грубой проверки правил электромиграции с помощью разработанного пакета – не более 6 часов.

Независимость от граничных условий ТС дает возможность не беспокоиться по поводу ошибок в результате исправления выявленных ошибок, возникаемых вследствие изменения граничных условий, что невозможно утверждать при применении МКЭ.

В качестве примера в табл. 2 приведены необходимые затраты машинных ресурсов для получения распределения плотности тока посредством МКЭ в моделированной ТС угла (табл. 2). Результаты получены для средней ширины ТС. Для расчетов использован Intel(R) Pentium(R) M с тактовой частотой 2,00 ГГц.