ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТИМУЛИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Варшавский Л.Е.

В статье рассматривается подход к созданию эффективного взаимодействия фабричных и дизайнерских компаний. Проводится сопоставительный анализ эффективности взаимодействия двух видов компаний как при оптимизации по Нэшу, так и при согласованной оптимизации. Исследуется метод расчета оптимальных стратегий по Нэшу в линейных динамических играх с нелинейным неквадратичным критерием.

doi: 10.20537/mce2023econ07

Введение. Один из важных трендов, возникших в условиях ускоренной автоматизации и информатизации, связан с аутсорсингом капиталоемких производств в высокотехнологичных отраслях. За счет аутсорсинга таких производств дизайнерские компании и коллективы получают возможность сосредоточиться на разработке новой наукоемкой продукции и ускорить ее продвижение. Отпадает необходимость изыскания капитальных вложений, а также контроля и управления строительными работами по возведению новых производственных мощностей.

Особенно заметно эти тенденции проявляются в последние 15–20 лет в полупроводниковой промышленности, где происходил переход от вертикально интегрированных компаний (IDM) к «бесфабричным» (fabless) или дизайнерским компаниям. Такие изменения произошли при одновременном развитии высокотехнологичного фабричного сектора (foundry), несущего колоссальные капитальные расходы и способного выполнять самые современные и сложные заказы дизайнеров. К настоящему времени в микроэлектронной промышленности сформировался олигополистический рынок фабричных компаний и дизайнерский сегмент, на котором присутствует более тысячи дизайнерских компаний

Таким образом, возникла модель Fabless-foundry, успешно применяемая при разработке и производстве микроэлектронных интегральных схем [1]. Эту модель предполагается использовать в Стратегии развития электронной промышленности Российской Федерации на период до 2030 г. [2]. Данный подход к эффективному взаимодействию фабричных и дизайнерских компаний может быть использован и в ряде других отраслей, в частности, при взаимодействии операторов мобильной связи и провайдеров средств массовой информации, обеспечивающих сетевое распространение контента.

Моделирование взаимодействия дизайнерских и фабричных компаний. Ниже рассматриваются статическая и динамическая модели взаимодействия дизайнерских и фабричных компаний. Предполагается, что функционируют N_1 идентичных дизайнерских компаний, а также N_0 фабричных компаний.

1. Статический вариант модели

1.1. Дизайнерские компании (Fabless Companies) максимизируют прибыль J_{1j}:

$$J_{1j} = (p_1 - \mu p_0)Q_{1j} \to \max_{Q_{1j}}, \tag{1}$$

где p_1 — цена продукции дизайнерских фирм, в расчете на единицу потребляемой продукции фабричного сектора, p_0 — цена продукции фабричного сектора, μ — соотношение между затратами дизайнерской компании (включая затраты на НИОКР) и затратами на приобретение сырья в фабричном секторе, Q_{1j} — объем продукции фабричного сектора, потребляемой j-ой дизайнерской компанией, $j=1,...N_1$.

Обратная функция спроса для дизайнерских компаний имеет следующий вид:

$$p_1 = a - b * LN(Q_1), \tag{2}$$

где $Q_1 = \sum_{j=1}^{N_1} Q_{1j}$, причем Q_1 — совокупный объем продукции фабричного сектора, потребляемой дизайнерскими компаниями.

Учитывая (1)–(2), можно показать, что оптимальный объем продукции дизайнерских компаний составляет:

$$Q_1 = \exp\left\{\frac{a - \mu p_0}{b} - \frac{1}{N_1}\right\}, \tag{3}$$

а цена

$$p_1 = \mu p_0 + \frac{b}{N_1}. \tag{4}$$

1.2. Фабричные компании (Foundry Companies) руководствуются обратной функцией спроса (2). Предполагая, что суммарный объём производства фабричных компаний $Q_0 = Q_1$, из (3) можно получить обратную функцию спроса для фабричных компаний:

$$p_0 = A - B * LN(Q_0), \tag{2a}$$

где $A = \frac{a - b/N_1}{\mu}$; $B = \frac{b}{\mu}$.

Ниже рассматривается 2 случая: 1. когда фабричные компании, руководствуясь (2а), используют стратегии, оптимальные по Нэшу; 2. когда они используют согласованные с дизайнерскими компаниями стратегии.

1.3. Оптимизация по Нэшу. В этом случае фабричные компании максимизируют чистый приведенный доход (NPV) — J_{0i}:

$$J_{0i} = (p_0 - PL_{0i})Q_{0i} \to \max_{Q_{0i}}, \tag{5}$$

где PL_{0i} — приведенные затраты [3], Q_{0i} — объем производства продукции i–ой компании фабричного сектора, i=1,…N₀,. $Q_0 = \sum_{i=1}^{N_0} Q_{0i}$.

Тогда оптимальные объемы производства для отдельных компаний Q_{0i}^* составляют:

$$Q_{0i}^* = \left\{ \frac{\overline{PL}_0 - PL_i}{B} + \frac{1}{N_0} \right\} Q_0^*,\ i = 1, 2, ..., N_0, \tag{6}$$

где $\overline{PL}_0$ — средние приведенные затраты в компаниях фабричного сектора, Q_0^* — суммарный оптимальный объем производства компаний фабричного сектора, равный:

$$Q_0^* = Q_1^* = \exp\left\{ \frac{A - \overline{PL}_0}{B} - \frac{1}{N_0} \right\}, \tag{7}$$

Этим объемам производства соответствует продажная цена единицы продукции фабричного сектора p_0^*:

$$p_0^* = \overline{PL}_0 + \frac{B}{N_0}. \tag{8}$$

1.4. Согласованная оптимизация. В этом случае фабричные и дизайнерские компании максимизируют суммарный NPV — J :

$$\begin{aligned} \mathrm{J} &= \sum_{i=1}^{N_0} \gamma_0 (p_0 - PL_{0i}) Q_{0i} + \sum_{j=1}^{N_1} \gamma_1 \frac{b}{N_1} Q_{1j} = \\ &= \sum_{i=1}^{N_0} [\gamma_0 (p_0 - PL_{0i}) + \gamma_1 b] Q_{0i} \to \max_{Q_{0i}}, \end{aligned} \tag{9}$$

где γ_0 и γ_1 — положительные коэффициенты, назначаемые соответственно для фабричных и дизайнерских компаний.

Тогда можно показать, что при обратной функции спроса (2а) оптимальные объёмы производства Q_{0i}^*, Q_0^*,и потребления Q_1^* продукции фабричного сектора равны:

$$Q_{0i}^* = \left\{ \frac{\overline{PL}_0 - PL_i}{B} + \frac{1}{N_0} \right\} Q_0^*, \ i = 1, 2, ..., N_0, \tag{7a}$$

$$Q_0^* = Q_1^* = \exp\left\langle \frac{A - \overline{PL}_0 + \dfrac{\gamma_1}{N_1 \gamma_0} b}{B} - \frac{1}{N_0} \right\rangle. \tag{10}$$

Продажная цена единицы продукции фабричного сектора p_0^* составляет:

$$p_0^* = \overline{PL}_0 + \frac{B}{N_0} - \frac{\gamma_1}{N_1 \gamma_0} b. \tag{11}$$

В табл. 1 приведены формулы для расчета основных показателей компаний при статической оптимизации, соответствующие логарифмической функции спроса (2).

Таблица 1. Сопоставление результатов статической оптимизации по Нэшу и при согласованной оптимизации.

Показатель	Оптимизация по Нэшу, формулы (7), (8)	Согласованная оптимизация, формулы (10), (11)
$Q_0^* = Q_1^*$	$\exp\left\{\dfrac{A-\overline{PL}_0}{B} - \dfrac{1}{N_0}\right\}$	$\exp\left\langle \dfrac{A-\overline{PL}_0 + \dfrac{\gamma_1}{N_1\gamma_0}b}{B} - \dfrac{1}{N_0} \right\rangle$
p_0^*	$\overline{PL}_0 + \dfrac{B}{N_0}$	$\overline{PL}_0 + \dfrac{B}{N_0} - \dfrac{\gamma_1}{N_1\gamma_0}b$

2. Динамический вариант модели.

Предполагается, что фабричный рынок является олигополистическим, на котором фабричные олигополисты, руководствуясь обратной функцией спроса (2а), максимизируют *NPV* с учетом затрат регулирования (adjustment costs) [3, 4]:

$$J_{0i} = \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t \left[(p_{0t} - c_i)Q_{0it} - I_{0it} - \frac{1}{2}\rho_{0i} I_{0it}^2 \right] \to \max_{I_{0it}}, \tag{12}$$

где $\beta = 1/(1+r)$ — дисконтирующий множитель, соответствующий ставке дисконтирования r; p_{0t} — цена продукции; c_i — средние удельные производственные издержки; I_{0it} инвестиции в основной капитал – стоимость единицы мощностей; $\frac{1}{2}\rho_{0i} I_{0it}^2$ — затраты регулирования (adjustment cost, см., например, [4], причем $\rho_{0i} > 0$ — коэффициент, характеризующий инвестиционные возможности олигополистов, $i = 1, 2, ..., N_0$. Управляющими переменными в модели являются инвестиции I_{0it}, $i = 1, 2, ..., N_0$.

В модели предполагается, что объемы производства фабричных компаний Q_{0it} связаны с инвестициями I_{it} операторным соотношением:

$$Q_{0it} = W(z) I_{0it}, \tag{13}$$

где z — оператор сдвига, т.е. $zx_t = x_{t+1}$, $W(z)$ — передаточная функция, идентичная для всех олигополистов.

Тогда из условия оптимальности (12) при (2а) и (13) следует:

$$\partial J_{0i}/\partial I_{0it} = W((\beta z)^{-1})(p_{0t} - PL_{0i}) - W((\beta z)^{-1})B\left[\frac{Q_{0it}}{Q_{0t}}\right] - \rho_{0i} I_{0it} = 0\,, \qquad (14)$$

где PL_{0i} =c$_{0i}$+1/W(1+r) — приведенные затраты, i=1,2…N$_0$ [3].

Суммируя (14) по всем i, имеем:

$$N_0 W((\beta z)^{-1})(p_{0t} - \overline{PL}_0) - W((\beta z)^{-1})B - \sum_{i=1}^{N_0} \rho_{0i} I_{0it} = 0\,, \qquad (15)$$

где $\overline{PL}_0 = \sum_{i=1}^{N_0} PL_{0i}$ — средняя величина приведенных затрат по совокупности фабричных компаний.

Это же соотношение может быть получено, если предположить, что совокупность фабричных компаний максимизирует критерий:

$$J_0 = \sum_{t=1}^{\infty} \beta^t [(p_{0t} - \overline{PL}_0 + \frac{N_0 - 1}{N_0} B) Q_{0t} - \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} \rho_{0i} I_{0it}^2] \to \max_{\{I_{0it}\}}\,, \qquad (16)$$

При $\rho_{0i} = \rho_0$; $I_{0t} = \sum_{i=1}^{N_0} I_{0it}$ максимизация критерия:

$$J_0 = \sum_{t=1}^{\infty} \beta^t [(p_{0t} - \overline{PL}_0 + \frac{N_0 - 1}{N_0} B) Q_{0t} - \frac{1}{2} \frac{\rho_0}{N_0} I_{0t}^2] \to \max_{I_{0t}}\,, \qquad (17)$$

приводит к (15). В результате такой оптимизации определяются как объёмы инвестиций I_{0t} и производства Q_{0t}, так и цена *p0t*. При этом максимизация критерия (12) для отдельных фабричных компаний эквивалентна максимизации несколько видоизмененного критерия при известных Q_{0t} и *p0t*:

$$J_{0i} = \sum_{t=1}^{\infty} \beta^t [(p_{0t} - PL_{0it} - \frac{1}{2} \frac{Q_{0it}}{Q_{0t}} * B) Q_{0it} - \frac{1}{2} \rho_{0i} I_{0it}^2] \to \max_{I_{0it}}\,, \qquad (18)$$

i=1,2…N0.

Таким образом, для определения оптимальных по Нэшу значений производительности фабричных компаний можно использовать двухстадийную процедуру. На первой стадии в соответствии с критерием (17) определяются суммарные объемы производства фабричных компаний Q_{0t}, и цена p_{0t} На второй стадии по отдельности определяются инвестиции и объемы производства фабричных компаний I_{0it}, Q_{0it}, *i=1,2…No.* С этой целью используется оптимизация в соответствии с критериями (18).

В случае разных коэффициентов $\rho_{0i} \neq \rho_0$ следует использовать итеративную двухстадийную процедуру, когда на первой итерации при оптимизации критерия (17) для совокупности компаний выбирается начальное значение ρ_0^0, которое после расчета объемов инвестиций I_{0it} и производства Q_{0it} на основе (18) может в дальнейшем уточняться в соответствии со следующим соотношением:

$$\rho_0^{k+1} = \frac{\sum_{i=0}^{N_0} \rho_{0i} \sum_{t=0}^{\infty} I_{0it}(\rho_0^k)}{\sum_{t=0}^{\infty} I_{0it}(\rho_0^k)}, \tag{19}$$

где k — номер итерации.

Практика проведения расчетов показывает, что для обеспечения приемлемого приближения к оптимальным решениям при небольших N_0 достаточно 3–4 итераций. Рассмотренная процедура может быть использована и при других нелинейных функциях спроса, типа $p_0 = f(Q_0)$, например, при функции с постоянной эластичностью ε: $p_0 = \varsigma Q_0^{\varepsilon}$.

Изложенная процедура нахождения оптимальных игровых стратегий может быть просто реализована в электронных таблицах типа Excel, в которых предусмотрено решение оптимизационных задач. Она не требует обращения к специальным численным методам решения задач оптимального управления и теории игр (например, к методам квазилинеаризации [5]).

Результаты расчетов

В настоящей работе при проведении имитационных расчетов предполагалось, что совокупность дизайнерских компаний составляет $N_1 = 100$, а рынок фабричных компаний представляет собой дуополию ($N_0 = 2$). Использовались следующие блоки:

1. обратная функция спроса (2), полученная путем обработки данных реального рынка интегральных схем:

$$p_1 = 7.147 - 1.240LN(Q_{1t}), \quad R^2 = 0.868;$$
$$(0.146)\ (0.482)$$

где p_1 — средняя цена продукции дизайнерских компаний в расчете на условную пластину, приобретаемую ими у фабричных компаний (в скобках указаны значения среднеквадратических ошибок оценок параметров);

2. передаточная функция (13) следующего вида:

$$W(z) = \frac{0.743z}{(z-0.434)^2}.$$

Значения параметров зависимостей, используемых в расчетах на основе рассмотренной модели, равны: c_{01}=0.3; c_{02}=0.5; $\rho_{01} = 0.15$; $\rho_{02} = 0.20$; μ=1.654: r=0.05.

Результаты расчетов ключевых показателей фирм для статической модели представлены в таблице 2. Согласованная оптимизация позволяет заметно увеличить объемы производства, повысить NPV компаний и одновременно снизить цены.

Таблица 2. Результаты расчетов на основе статической модели (1–10).

Показатель	Оптимизация по Нэшу	Согласованная оптимизация		
		$\gamma_0 = 1$; γ_1=1	$\gamma_0 = 10$; γ_1=1	$\gamma_0 = 20$; γ_1=1
Q_0	58.702	59.681	69.263	81.724
Q_{01}	37.184	37.804	43.874	51.767
Q_{02}	21.518	21.877	25.389	29.957
p_0	1.261	1.248	1.137	1.013

Этот же вывод справедлив и для случая динамической модели. Как показывают расчёты, при $\gamma_0 > 30$ согласованная оптимизация позволяет увеличить объемы производства и NPV фабричных компаний по сравнению с оптимизацией по Нэшу (рис. 1, 2).

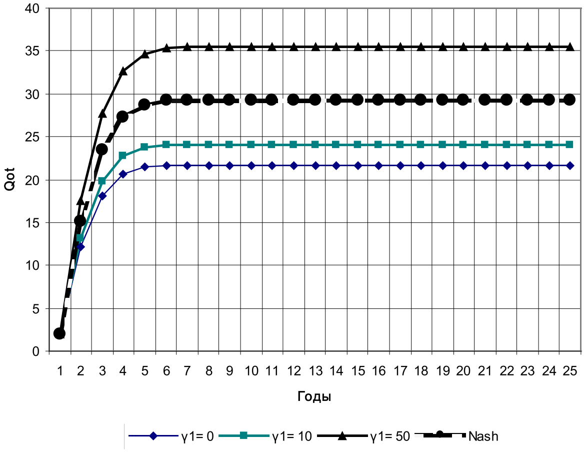

Рис. 1. Динамика суммарных объемов производства фабричных компаний Q_{0t} при согласованной оптимизации (при разных значениях весового коэффициента γ_0) и при оптимизации по Нэшу.

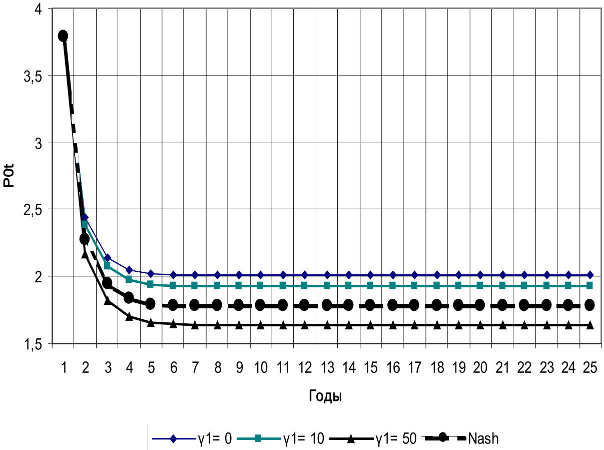

Рис. 2. Динамика цены на продукцию фабричных компаний p_{0t} при согласованной оптимизации (при разных значениях весового коэффициента γ_0) и при оптимизации по Нэшу.

Выводы. Аутсорсинг капиталоемких производств в высокотехнологичных отраслях, по-видимому, станет устойчивым трендом в ближайшие десятилетия. В связи с этим, особое значение приобретает планирование и реализация модели Fabless-foundry.

Использование игровых подходов может быть полезным при формировании эффективного взаимодействия фабричных и дизайнерских компаний, которые предлагается реализовать в Стратегии развития электронной промышленности Российской Федерации [2].

Для обеспечения устойчивого роста производства и одновременно достаточного уровня рентабельности фабричного производства в высокотехнологичных отраслях, необходима реализация мер государственной поддержке этого сектора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Thurk J.* Outsourcing, firm innovation, and industry dynamics in the production of semiconductors. March 2019. URL: https://economics.yale.edu/sites/default/files/outsourcingpaper_v2.pdf
2. Стратегия развития электронной промышленности Российской Федерации на период до 2030 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 января 2020 г. № 20-р.
3. *Варшавский Л.Е.* Социально-экономические проблемы развития информационно-коммуникационных технологий (ИКТ). М.: ЦЭМИ РАН, 2022.
4. *Варшавский Л.Е.* Использование методов теории управления для формирования рыночных структур *// Компьютерные исследования и моделирование,* 2014, Т.6, №5. с. 839–859.
5. *Хофер Э. Лундерштедт Р*. Численные методы оптимизации. М.: Машиностроение, 1981.

ECONOMIC AND MATHEMATICAL STUDY OF THE EFFECTIVENESS OF STIMULATING THE DEVELOPMENT OF HIGH-TECH INDUSTRIES

Varshavsky L.E.

The article discusses an approach to creating an effective interaction between foundry and fabless (design) companies. A comparative analysis of the effectiveness of interaction between two types of companies is carried out both with Nash optimization and with coordinated optimization. A method for calculating Nash optimal strategies in linear dynamic games with a nonlinear non-quadratic criterion is investigated.