ISSN 2311-875X (Online)
ISSN 2073-2872 (Print)

Приоритеты России

ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА ДИНАМИКИ РЫНОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ И ФОРМИРОВАНИЯ КОНКУРЕНТНОЙ СРЕДЫ В МИКРОЭЛЕКТРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Леонид Евгеньевич ВАРШАВСКИЙ

доктор экономических наук, главный научный сотрудник,
Центральный экономико-математический институт РАН, Москва, Российская Федерация
hodvar@mail.ru

История статьи:
Принята 07.10.2015
Принята в доработанном виде 01.12.2015
Одобрена 20.01.2016

УДК 338.45.01; 330.43; 338.27
JEL: C54, D43, O21

Аннотация

Тема. Сокращение заказов и объемов финансирования наукоемкого сектора экономики страны в 1990-х гг. повлекло за собой замедление развития такой наукоемкой отрасли, как микроэлектроника. Актуальными остаются вопросы разработки стратегии развития и преодоления отставания в этом промышленном секторе.

Цели. Разработка экономико-математических методов анализа динамики рыночных процессов и формирования конкурентной среды в микроэлектронной промышленности. Исследование тенденций развития микроэлектроники в стране и за рубежом, анализ инвестиционных процессов в ведущих компаниях микроэлектронной промышленности.

Методология. Анализ инвестиционных процессов проведен на основе эконометрических методов, исследование экономической эффективности инвестиций в компаниях опирается на аппарат *Z*-преобразования. Предложен подход к формированию рыночных структур в микроэлектронике, основанный на использовании динамических игр.

Результаты. Проведен анализ основных тенденций и драйверов экономического развития микроэлектроники в России и за рубежом. Исследовано влияние изменения топологических размеров полупроводниковых схем на структуру выпускаемой продукции и экономические показатели ведущих компаний-производителей. Построены модели и определены динамические характеристики инвестиционных процессов в ведущих компаниях, позволяющие провести оценку инвестиций в основной капитал, необходимых для обеспечения возможных вариантов производства некоторых видов микроэлектронной продукции. Разработан подход к определению экономической эффективности производственных инвестиций (ROI), основанный на использовании *Z*-преобразования. Представлен математический инструментарий конструирования рыночных структур, основанный на использовании игрового подхода и *Z*-преобразования, позволяющий, не прибегая к трудоемким вычислениям, исследовать динамику экономических показателей компаний.

Выводы и значимость. Предложенные в статье экономико-математические методы и модели позволяют провести содержательный анализ инвестиционных процессов на рынках микроэлектронной продукции и создают основу для формирования регулирующими органами эффективных рыночных структур. Полученные результаты могут быть использованы при формировании предложений по созданию структуры отечественного рынка продукции микроэлектроники, по государственной политике стимулирования инвестиционной деятельности, а также по антимонопольной политике.

Ключевые слова:
микроэлектроника,
моделирование,
инвестиционные процессы,
конкурентная среда,
динамические игры

© Издательский дом ФИНАНСЫ и КРЕДИТ, 2015

Введение

Производство высокотехнологичной наукоемкой продукции является необходимым условием для устойчивого долгосрочного экономического роста. Однако сокращение заказов и объемов финансирования наукоемкого сектора экономики страны в 1990-х гг. наряду с открытием внутреннего рынка повлекло за собой замедление развития наукоемких отраслей и нарастание технологического отставания целого ряда отечественных производств от зарубежных. В первую очередь это относится к такой базовой подотрасли, как микроэлектроника.

В настоящее время даже для производства военной техники часто используются микроэлектронные компоненты и комплектующие из зарубежных стран, что приводит к ослаблению технологической безопасности страны, потере квалифицированных рабочих мест, дополнительным затратам в валюте, а также к наличию уязвимостей в киберинфраструктуре (преднамеренных и непреднамеренных), повышающих риски возникновения внештатных ситуаций[1] [1]. В этой ситуации российским производителям целесообразно правильно наметить приоритеты технологического развития на ближайшие годы, определить свою нишу на рынках подобной продукции, а также начать исследования и разработки в тех направлениях,

[1] URL: http://ras.ru/news/news_release.aspx?ID=ae6d7b19-8882-4dcc-8636-b8a26f9ab92f

которые будут определять технологические изменения через 5-10 лет.

Таким образом, перед отечественной микроэлектронной промышленностью стоят задачи огромной важности, от решения которых зависит будущее страны. Успешное развитие подотрасли в складывающихся условиях должно базироваться на эффективной стратегии импортозамещения, учитывающей опыт развития ведущих компаний мира. В связи с ограниченностью времени и ресурсов для обеспечения количественного и качественного роста необходимых объемов микроэлектронной продукции особенно важно иметь правильные оценки динамических характеристик развития фирм-производителей в условиях конкуренции.

В настоящей работе проводится экономико-математический анализ и моделирование инвестиционных процессов в ведущих компаниях микроэлектронной промышленности, таких как Intel и TSMC (на долю первой приходится 80% мирового выпуска микропроцессоров x86, на долю второй – 50% производства полупроводниковых пластин). Рассматривается подход к формированию рыночных структур в микроэлектронике, основанный на использовании динамических игр. Построенные модели используются для оценки инвестиций (капитальных вложений), необходимых для обеспечения возможных вариантов производства некоторых видов микроэлектронной продукции.

Основные факторы и проблемы инновационного развития микроэлектроники

Зарождение микроэлектроники связывают с появлением интегральных схем (ИС) в конце 1950-х – начале 1960-х гг. Особую роль в появлении отрасли сыграли потребности и заказы аэрокосмической промышленности. Так, в США важную стимулирующую роль в разработке ИС сыграла работа по созданию ракеты Minuteman. В условиях острого противостояния в период холодной войны оборонное ведомство этой страны предъявляло повышенные требования к техническим характеристикам авионики для ракетной техники (включая массо-габаритные, точность, надежность и др.), которые не могли быть удовлетворены при использовании существовавших тогда дискретных схем. Эти требования побудили молодых в то время сотрудников компаний – разработчиков полупроводниковой продукции (в первую очередь Faircild, Texas Instruments) искать новые решения по повышению прежде всего надежности схем, что в итоге привело к созданию ИС и новой подотрасли. Следует отметить, что советские специалисты старались не отставать от американских в разработке новых видов полупроводниковых приборов.

Быстрое развитие микроэлектроники в 1960-х гг. во многом было связано с возникновением в Кремниевой долине целого кластера новых фирм и организацией их поддержки со стороны венчурных фондов. Прогресс в области миниатюризации ИС позволил наладить выпуск широкой линейки продукции для промышленного и бытового применения. Появились новые разработки для промышленной и бытовой электроники (модули полупроводниковой памяти, калькуляторы, часы и др.), возникли новые сегменты рынка, на которых в 1970–1980-х гг. развернулась жесткая конкурентная борьба между американскими и, прежде всего, японскими компаниями.

Ряд компаний Кремниевой долины стал прародителем многих других (возникло такое понятие, как *spin-off*). В этом отношении уникальным явлением является компания Faircild. На базе этой компании с численностью в лучшие годы 1 400 чел. возникло множество малых компаний (*spin-off company*) с численностью 12 500 чел. Некоторые из них (особенно Intel, AMD) превратились впоследствии в гигантов микроэлектроники. Так, изобретение в начале 1970-х гг. в Intel микропроцессора позволило этой компании получить право производить микропроцессоры для разработанных в компании IBM персональных компьютеров и впоследствии, отказавшись от выпуска модулей памяти, стать ведущим участником нового рынка [2–4].

Одним из важнейших драйверов развития микроэлектроники с момента ее зарождения стало уменьшение размеров полупроводниковых схем. Чем меньше размеры и выше степень интеграции схем, тем выше их быстродействие и больше память. Уменьшение размеров до определенных пределов ведет также к снижению рассеиваемой энергии, что в свою очередь способствует повышению качества и надежности работы схем. Этим объясняется стремление ученых и инженеров снижать топологические размеры схем и повышать степень их интеграции до пределов, определяемых фундаментальными физическими ограничениями.

Еще в середине 1960-х гг. видным специалистом в области микроэлектроники, одним из основателей компании Intel Г. Муром (*H. Moore*) была

высказана широко известная ныне гипотеза об увеличении в 2 раза степени интеграции интегральных схем через каждые 1,5-2 года, впоследствии ставшая драйвером дальнейших изменений в микроэлектронике[2]. Значительное влияние на развитие микроэлектронных схем и устройств оказала вышедшая в 1974 г. работа Р. Деннарда (*R. Dennard*) с сотрудниками, в которой было показано, что в чипах на основе КМОП-технологии (*CMOS*) плотность рассеиваемой энергии сохраняется постоянной при одинаковом уменьшении в *k* раз топологического размера, подводимого к транзистору напряжения, а также при увеличении во столько же раз внутренней частоты устройства (в этом состоит так называемый закон Деннарда). Понимание этой закономерности позволяло вплоть до начала 2000-х гг. добиваться роста производительности устройств (микропроцессоров, памяти) главным образом за счет их миниатюризации и увеличения частоты [5]. Так, за период с 1971 по 2000 г. количество транзисторов в микропроцессорах компании Intel увеличилось почти в 19 тыс. раз, а внутренняя частота – в 30 тыс. раз!

Однако уже в середине первого десятилетия XXI в. традиционная полупроводниковая технология стала подходить к границам развития, которые обусловлены фундаментальными законами физики. В результате этого, по мнению экспертов, закон Мура может перестать действовать уже в ближайшие годы. Это связано в первую очередь с повышением энергоемкости электронных приборов при уменьшении размеров и ростом капиталоемкости их производства. Здесь необходимо прежде всего выделить проблемы отвода тепла, выделяемого из-за непрерывно повышающейся температуры по мере повышения плотности монтажа элементов и частоты, а также возникновения в чипах токов утечки (как из-за работы на высоких частотах, так и за счет проявления квантовых эффектов, в частности – туннельного эффекта [6]).

Эти факторы уже в середине 2000–х гг. стали сдерживать дальнейшее уменьшение напряжения, подаваемое на транзисторы, а также рост внутренней частоты. С этого времени закон Деннарда перестал действовать. Показательной является судьба микропроцессора Tejas, разработанного компанией Intel. В 2002–2004 гг. анонсировался выпуск этого процессора с внутренней частотой более 4 ГГц, которую в последующих модификациях предполагалось повысить до 10 ГГц. Интересно отметить, что в тот период Intel планировал обеспечить к 2010 г. производство процессоров с внутренней частотой 15 ГГц, состоящих из 1 млрд транзисторов [7]. Однако в конце 2004 г. разработчикам компании стало ясно, что при заявленных параметрах он характеризуется весьма высоким тепловыделением. По этой причине в 2005 г. Intel объявил об отказе от производства микропроцессора Tejas, а в 2006 г. перешел к выпуску двухъядерного процессора Cuor[3].

Для решения проблемы повышения энергоэффективности микроэлектронных схем (преодоления того, что в англоязычной литературе именуется *power wall*) используется широкий спектр методов, начиная с совершенствования применяемых материалов, архитектуры создаваемых приборов и кончая использованием программных средств. Недавно осуществлен переход от производства традиционных планарных к трехмерной структуре транзисторов, достигнуты определенные успехи в разработке кремний-фотонных приборов на одном чипе, в которых проводящие металлические соединения заменяются на оптические (подробнее см. [6]).

Благодаря разработанным научно-техническим решениям прогресс в области миниатюризации и повышения производительности микроэлектронных устройств и компонентов ЭВМ идет значительно быстрее, чем предполагалось даже в конце 1980-х – начале 1990-х гг. С 1995 по 2015 г. топологический размер полупроводниковых схем уменьшился в 25 раз, причем только за последние 10 лет текущего десятилетия – почти в 5 раз. Так, в 1995 г. топологический размер схемы Intel составлял 350 нм, в 1997 г. – 250, в 1999 г. – 180, в 2001 г. – 130, в 2003 г. – 90, в 2005 г. – 65, в 2007 г. – 45, в 2009 г. – 32, в 2011 г. – 22 и в 2015 г. – всего 14 нм [8].

В конце 2011 г. компания Intel приступила к масштабному производству микро-процессоров на основе трехмерных транзисторов 3D Tri-Gate, относящихся к конструкции FinFET, с топологическим размером 22 нм (о начале разработки было объявлено в 2002 г.[4]). В этих трехмерных транзисторах при работе с низким электрическим напряжением (примерно 0,7 В) производительность на 37% выше, а расход

[2] *Gordon M.* Progress in Digital Integrated Electronics. URL: http://download.intel.com/museum/Moores_Law/Articles-Press_Releases/Gordon_Moore_1975_Speech.pdf

[3] URL: http://pe4.info/1-7.php

[4] *Щука А.А.* Наноэлектроника. М.: Физматкнига, 2007.

энергии на 50% меньше, чем у транзисторов с топологическим размером 32 нм, выполненных по традиционной планарной технологии. При этом увеличение производственных затрат составляет, по оценкам, всего 2–3%[5]. Еще более эффективными по расходу энергии должны быть, по расчетам разработчиков, чипы с топологическим размером 14 нм, производство которых начато в 2015 г. В 2017 г. Intel предполагает перейти на топологический размер 10 нм, а впоследствии – на 7 и 5 нм[6].

Вероятность перехода на эти технологические процессы в последнее время возросла, что связано с наметившимся прогрессом в создании экономически эффективных установок экстремальной ультрафиолетовой фотолитографии (EUV). Так, нидерландская компания ASML Holding NV, являющаяся ведущим производителем установок фотолитографии, создала EUV–фотолитограф NXE:3350B system с оптической мощностью 80 Вт (для рентабельного производства чипов выходная мощность излучения должна составлять не менее 100 Вт). В феврале текущего года ведущему производителю пластин, компании TSMC, удалось довести выпуск продукции на этой установке до 1 000 пластин в день, что позволило существенно приблизиться к экономически выгодному объему производства. В результате компания ASML уже получила выгодные заказы на поставку 15 установок и планирует в 2017 г. довести выпуск NXE:3350B до 24 установок[7].

Наряду с проблемой повышения энергоэффективности необходимо также отметить проблему роста наукоемкости и капиталоемкости производства, которая обостряется по мере уменьшения топологического размера интегральных схем, характеризующего приближение к физическим пределам роста производительности схем. Так, в последнее время ежегодные затраты на исследования и разработки (RD) только в компании Intel составляют свыше 10 млрд долл. США (то есть около 20% от уровня доходов). Такой же высокий уровень характерен для инвестиций компании в основной капитал. Характерно, что даже в кризисные годы объем затрат на исследования и разработки в ведущих компаниях отрасли практически не уменьшается.

О значительной величине производственных инвестиций в обновление производства свидетельствует и тот факт, что только для перехода на выпуск чипов по технологии 32 нм компания Intel планировала в течение двух лет осуществить капитальные вложения в размере 7 млрд долл. США[8]. Капитальные вложения этой компании в сооружение в штате Аризона фабрики по производству чипов с топологическим размером схем 14 нм оценивались в 5 млрд долл. США[9]. В другой компании, GLOBALFOUNDRIES, специализирующейся на производстве чипов, суммарные за время существования производственные инвестиции в фабрику № 1 в Дрездене (месячной производственной мощностью 80 тыс. пластин диаметром 300 мм с топологическим размером схем 45 нм) составили 7 млрд долл. США. Объем этих вложений является одним из наиболее крупных среди зарубежных инвестиций, когда-либо сделанных в Германии[10].

Наглядной характеристикой капиталоемкости производства в отрасли является стоимость EUV-фотолитографа NXE:3350B, которая составляет 75 млн долл. США, что вдвое выше стоимости современного магистрального узкофюзеляжного самолета типа Boeing-737 или A-320 (на крупной фабрике потребуется не менее 10 таких фотолитографов).

В связи с колоссальной науко- и капиталоемкостью микроэлектронной отрасли произошло разделение фирм на фирмы – производители пластин и чипов (англ. *foundries*) и большое число фирм – разработчиков дизайна схем и приборов (англ. *fabless*, то есть не имеющих в своем составе фабрик). Такое разделение позволило фирмам – разработчикам схем сосредоточиться на стадии исследований и разработок, а также существенно снизить зависимость от выпуска своей продукции на свободных мощностях фабрик крупнейших компаний и, тем самым, риск потери прав на интеллектуальную собственность.

Концепция *foundry*-фирмы была успешно реализована на Тайване М. Чангом в ходе создания компании TSMC при поддержке местного правительства[11]. Созданная в конце 1980-х гг., она превратилась в крупнейшую компанию –

[5] URL: http://newsroom.intel.com/community/intel_newsroom/blog/2011/05/04/intel-reinvents-transistors-using-new-3-d-structure

[6] URL: http://cnews.ru/news/top/index.shtml?2012/05/15/489441

[7] *Clarke P.* Intel Orders 15 EUV Lithography Systems. URL: http://electronics360.globalspec.com/article/5264/intel-orders-15-euv-lithography-systems

[8] URL: http://nanotechwire.com/news.asp?nid=7404

[9] URL: http://nanowerk.com/news/newsid=20205.php

[10] URL: http://globalfoundries.com/manufacturing/manufacturing-overview

производителя пластин и микросхем (*pure-play semiconductor foundry*) на основе дизайнов второй группы компаний (*fabless*), с годовым объемом продаж около 20 млрд долл. США. На ее долю приходится почти 50% объема продаж фирм первой группы. В то же время рынок производителей пластин (*foundries*) превратился в чисто олигополистический, с небольшим числом крупных участников. На этом рынке доля 10 наиболее крупных производителей составляет порядка 90%. Уровень концентрации на рынке фирм-разработчиков (*fabless*), суммарные доходы которых в 2013 г. оценивались в 78 млрд долл. США, ниже (доля 10 крупнейших фирм составляла менее 65%)[12].

Среди компаний микроэлектронного профиля выделяется также небольшое число интегрированных компаний (англ. *integrated device manufacturer, IDM*), которые разрабатывают, производят и продают схемы и приборы. К их числу относятся такие крупнейшие компании, как Intel, IBM, Samsung, STMicroelectronics и др.

Ситуация в российской микроэлектронике

История отечественной микроэлектронной промышленности также насчитывает более 50 лет. Как и в США, главным драйвером развития подотрасли были потребности и заказы оборонной и аэрокосмической промышленности. В начале 1960-х гг. в нашей стране была разработана и впоследствии реализована стратегия формирования микроэлектронной промышленности, в рамках которой осуществлялось перепрофилирование старых или создание новых НИИ с опытными заводами, а также серийных заводов с КБ. Был создан крупный центр микроэлектроники в г. Зеленограде, включающий в себя научные и производственные организации.

В целом в СССР существовал полный цикл микроэлектронного производства, а уровень отечественных разработок до 1980 г., по мнению экспертов, соответствовал или незначительно уступал уровню разработок ведущих зарубежных фирм. Однако в дальнейшем из-за промедления в радикальном перевооружении отрасли началось прогрессирующее отставание советской микроэлектроники[13].

Положение резко ухудшилось с переходом экономики страны к рынку в 1990-х гг. Из-за скудного финансирования производственный и кадровый потенциал многих предприятий подотрасли был утерян. Ситуацию осложнило и открытие внутреннего рынка страны для импорта зарубежной микроэлектронной продукции. Ведущие предприятия отрасли – АО «Ангстрем», АО «Микрон» (впоследствии компания «НИИМЭ и Микрон») – выживали за счет производства и экспорта относительно простой продукции – чипов для калькуляторов и электронных игр в страны Юго-Восточной Азии (по некоторым данным, АО «Ангстрем» в середине 1990-х гг. принадлежало 25–30% мирового рынка таких чипов[14]). Во многом благодаря этому АО «Ангстрем» нашло средства для модернизации и реконструкции производства: в 1994 г. впервые в стране была введена линия по производству чипов на пластинах диаметром 150 мм с топологическим размером схем 0,8–1,2 мкм. В дальнейшем на предприятии была введена линия по производству чипов с технологическим уровнем 0,5–0,6 мкм. Оно стало специализироваться также на разработке и производстве идентификационных средств[15].

Положение начало несколько выправляться в середине 2000-х гг. В те годы, например, АО «Микрон» стало специализироваться на силовой электронике (объем рынка силовых компонентов в России тогда составлял всего лишь 54,5 млн долл. США), а затем, в связи с появлением огромного спроса на устройства мобильной связи, ему удалось наладить масштабное производство SIM-карт по технологии, предоставленной компанией STMicroelectronics.

Определенную положительную роль для развития подотрасли сыграли программа «Развитие электронной компонентной базы», которая являлась частью федеральной целевой программы «Национальная технологическая база» на период 2002–2006 гг., федеральные целевые программы «Электронная Россия (2002–2010 гг.)», а также «Развитие электронной компонентной базы и

[11] *Perry T.S.* Morris Chang: Foundry Father. URL: http://spectrum.ieee.org/at-work/tech-careers/morris-chang-foundry-father

[12] URL: http://electronics-eetimes.com/en/fabless-chip-companies-ranked-by-2013-sales.html?cmp_id=7&news_id=222921061

[13] *Малашевич Б.М., Малашевич Д.Б.* Микроэлектроника. Краткие основы и история развития. В кн.: Базовые лекции по электронике. Т. II. Твердотельная электроника / под общ. ред. В.М. Пролейко. М.: Техносфера, 2009. С. 96–170.

[14] Газета «Сорок один», 1995, № 41. С. 2; № 45. С. 1–4.

[15] Россия должна стать мировым брэндом. URL: http://angstrem.ru/release/release81.htm

радиоэлектроники». В результате завод «Микрон» стал производить чипы также и для электронных документов, транспортных билетов, социальных карт. Кроме того, в 2012 г. при содействии ГК «Роснано» предприятие закупило у STMicroelectron технологию и оборудование для выпуска чипов с топологическим размером схем 90 нм.

В настоящее время производственная мощность завода по выпуску чипов с топологическим размером 180–90 нм составляет 36 тыс. 200-миллиметровых пластин в год[16]. Кроме того, в компании разработали технологию производства продукции по нормам 65 нм, которая, в частности, может быть использована при производстве микропроцессора «Эльбрус-4С», созданного компанией «МЦСТ». По мере роста числа заказов компанией предполагается построить новый завод по производству чипов на пластинах диаметром 300 мм[17]. Несмотря на то что производственная мощность «НИИМЭ и Микрон» более чем на два порядка ниже, чем в ведущих мировых компаниях – производителях микроэлектронной продукции (например, производственная мощность тайваньской компании TSMC приближается к 19 млн пластин в год в пересчете на пластины диметром 200 мм), компания, работая в трудных условиях, к настоящему времени обеспечила себе доминирующее положение на внутреннем рынке в качестве интегрированного производителя продукции (англ. *Integrated Device Manufacturer, IDM*).

Следует отметить, что в рамках программы «Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники» осуществлялось также финансирование ряда проектов, выполнявшихся заводами «Микрон» и «Ангстрем», компаниями МЦСТ (разработчик микропроцессоров «Эльбрус», предназначенных для работы в компьютерах на промышленных и государственных объектах, не использующих операционную систему Windows) и «Т-Платформа» (разработчик суперкомпьютеров)[18].

В настоящее время государственная поддержка отечественной микроэлектронной промышленности осуществляется в рамках госпрограммы «Развитие электронной и радиоэлектронной промышленности на 2013–2025 гг.»[19]. В государственной программе планировалось довести долю отечественных радиоэлектронных изделий на мировом рынке до 0,8%, а на внутреннем рынке – до 40% (в 2014 г. эти показатели составляли соответственно 0,4 и 19%). Такие относительно скромные показатели некоторые специалисты объясняют слабым спросом на отечественную продукцию.

При разработке программы планировалось также достижение в 2015 г. уровня технологии производства чипов в 45 нм, а в 2025 г. – 10 нм. Однако намеченные в программе топологические размеры схем значительно выше, чем достигнутые в ведущих зарубежных компаниях (там уже производятся чипы с уровнем технологии 14 нм, а переход на уровень 10 нм состоится до 2020 г.). Следует отметить и то, что к настоящему времени не начато производство чипов с технологическим уровнем 65 нм, на который, в частности, ориентируется разработчик процессоров «Эльбрус» – компания «МЦСТ».

Объем отечественного рынка микроэлектроники составил в 2014 г. всего 2,78 млрд долл. США, причем наблюдаемый в последние годы рост выпуска продукции подотрасли связывают с увеличением выпуска военного и аэрокосмического оборудования[20]. Ввиду этого повышается актуальность формирования конкурентной среды для развития сотен предприятий подотрасли. Рядом специалистов предлагается иметь *«на каждом ключевом направлении… минимум два ведущих предприятия»*, у которых *«должна быть возможность выбирать лучших технологических партнеров, поставщиков, подрядчиков»*[21].

Эффективная стратегия развития подотрасли, включающая мероприятия по импортозамещению, должна строиться с учетом опыта развития ведущих компаний мира. В сложившихся условиях особенно важно иметь правильные оценки динамических характеристик развития передовых фирм-производителей в условиях конкуренции.

Моделирование экономической динамики в ведущих компаниях микроэлектронной промышленности

Влияние топологического развития схем на показатели эффективности производства. Как

[16] *Иванов В.* Завод «Микрон»: сердце российского хайтека. URL: http://zoom.cnews.ru/publication/printed/53480

[17] Производство российских микроэлектронных компонентов // КИП и автоматика: обслуживание и ремонт. 2014. № 1. С. 46–50.

[18] URL: http://kip-industry.ru/?mod=news&id=220

[19] URL: http://fcp.economy.gov.ru/cgi-bin/cis/fcp.cgi/Fcp/ViewGP/View/2015/19

[20] URL: http://vedomosti.ru/newspaper/articles/2015/03/24/militarizatsiya-chipov

[21] *Покровский И.* Вырастить электронную микроэкономику. URL: http://sovel.org/article03102014

отмечалось выше, одно из главных направлений увеличения производительности микроэлектронных устройств состоит в уменьшении размеров и повышении степени интеграции схем (рис. 1). Вместе с тем уменьшение топологических размеров полупроводниковых схем влияет на структуру выпускаемой продукции и экономические показатели компаний-производителей.

В связи с уменьшением топологического размера схем, производимых во вновь вводимых цехах и фабриках, в ведущих компаниях-производителях происходит снижение средней величины этого показателя (см. рис. 1). Так, в компании TSMC зависимость между минимальным $hp_{min\,t}$ и средним (по получаемым доходам) $hp_{avg\,t}$ топологическими размерами интегральных схем может быть описана следующим регрессионным соотношением, построенным по временным рядам за 1999–2014 гг.:

$$hp_{avg\,t} = \underset{(0,03)}{0,83}\ hp_{avg\,t-1} + \underset{(0,046)}{1,17}\ hp_{min\,t}\ ,\ R^2 = 0,999. \quad (1)$$

(В скобках здесь и далее указаны среднеквадратические оценки ошибок параметров).

Из полученного соотношения следует, что средняя продолжительность времени, в течение которого ввод новых мощностей с топологическим размером $hp_{min\,t}$ влияет на средний по компании топологический размер схем $hp_{avg\,t}$, составляет $T_{avg\,t} = 0,83 /(1 – 0,83) = 4,9$ лет. При этом период $T_{0,01}$, в течение которого происходит практически полный переход на производство схем с минимальным топологическим размером (до уровня, отклоняющегося от установившегося не более, чем на 1%), составляет $T_{0,01} = Ln\,(0,01) / Ln(0,83) = 24,7$ лет. Высокое значение периода $T_{0,01}$ связано с необходимостью удовлетворения спроса на относительно простые изделия, для которых, в отличие от компонентов для вычислительных устройств, не требуются высокое быстродействие и большой объем памяти (например, аналоговые схемы, электронные билеты и документы и др.).

Интересно отметить, что если до начала 2000-х гг. в структуре доходов (*revenues*) компании TSMC доминировали изделия для сегмента «Компьютеры» то, начиная с 2004 г. происходит рост доли доходов от продажи изделий для сегмента «Связь» (с 43% в 2004 г. до 58% в 2014 г.). Такая тенденция связана прежде всего с массовым освоением производства мобильных устройств с увеличивающимися функциями и производительностью, в особенности смартфонов. Изменение долей доходов от продажи изделий для сегментов «Связь» и «Компьютеры» δ_{it} происходило параллельно с уменьшением среднего по компании топологического размера $hp_{avg\,t}$ и может быть описано линейной регрессионной зависимостью:

$$\delta_{it} = a_i + b_i\, hp_{avg\,t}\ , \quad (2)$$

оценки параметров которой представлены в табл. 1.

Представляет также интерес влияние топологического размера схем $hp_{min\,t}$ на показатели эффективности производства (капиталоотдачу f_{kt}, удельные затраты на единицу основного капитала (фондов) c_{kt}. В TSMC в 1999–2007 гг. имела место отрицательная корреляция между f_{kt} и c_{kt} с одной стороны и $hp_{min\,t}$ – с другой, что может быть объяснено переходом к освоению производства наноэлектронных схем (то есть с топологическим размером менее 100 нм). Впоследствии, в 2008–2014 гг., корреляция между этими показателями стала положительной, что, по-видимому, связано как с постепенным уменьшением удельных затрат по мере роста масштабов и обучения (эффект *learning by doing*), так и с переходом к выпуску устройств массового потребления и некоторым ослаблением спроса на вычислительные устройства (табл. 2).

Как отмечалось ранее, по мере уменьшения топологического размера $hp_{min\ t}$, в ведущих микроэлектронных компаниях растут затраты на исследования и разработки. Так, экономико-статистический анализ показывает, что в компании Intel динамика объемов выполнявшихся исследований и разработок за период 2002–2014 гг. RD_t хорошо описывается следующим разностным уравнением:

$$RD_t = \underset{(0,140)}{0,939}\ RD_{t-1} - \underset{(466,301)}{703,388}\ \log\,(hp_{min\,t}) + \underset{(2547,951)}{3670,668},$$
$$R^2 = 0,953 \quad (3)$$

Анализ динамических характеристик инвестиционных процессов в ведущих компаниях отрасли. Исследование динамических

характеристик инвестиционных процессов ведущих компаний, работающих в рыночных или квазирыночных условиях, полезно для оценки возможной скорости освоения новых технологий отечественными производителями и необходимых инвестиций в основные фонды, требуемых для достижения желаемых уровней производства. При этом представляют интерес оценки процессов как в интегрированных компаниях (*IDM*), так и в тех, которые специализируются на фабричном производстве пластин и микросхем для разных видов полупроводниковой продукции (*foundry*).

Так, для компании AMD, которая до 2009 г. относилась к *первой группе компаний*, на основе временных рядов из годовых отчетов[22] за 1997–2009 гг. получена следующая операторная зависимость между объемами производства микропроцессоров x86 $Q_{micro\,t}$ (млн ед.) и инвестиций в основной капитал I_t (млн долл. США):

$$Q_{micro\,t} = [0{,}0156z / (z - 0{,}494)^2]\, I_t\,, \qquad (4)$$

где z – оператор сдвига: $zx_t = x_{t+1}$ (в расчетах предполагалось, что инвестиции в производство микропроцессоров составляют 70% от общих инвестиций компании в основной капитал). Об удовлетворительном качестве полученной зависимости свидетельствует приемлемое значение коэффициента вариации ($v = 0{,}092$).

Полученная зависимость позволяет рассчитать среднюю продолжительность выпуска изделий за счет осуществленных инвестиций T_L и $T_{0,01}$ – время выхода на уровни производства, отличающиеся не более чем на 1% от установившихся, при постоянных уровнях инвестиций. Значения этих показателей составляют соответственно $T_L = 2{\cdot}0{,}494/(1 - 0{,}494) \approx 2$ года и $T_{0,01} \approx 9$ лет.

На основе полученной зависимости рассчитаны объемы инвестиций в основной капитал, необходимые для достижения годовых уровней производства микропроцессоров $Q_{\max}$ в 10 и 20 млн ед. (рис. 2, 3). Расчеты показывают, что за десятилетний период для реализации первого варианта производственной программы потребуется 1,8 млрд долл. США, а второго – 3,6 млрд долл. США.

Для компании TSMC, относящейся *ко второй группе компаний*, на основе временных рядов до 2005–2014 гг. получена несколько более сложная операторная зависимость между потенциально возможными годовыми объемами производства пластин, приведенных к пластинам диаметром 200 мм Q_{wt} (млн ед.), и инвестициями в основной капитал I_t (млрд долл. США):

$$Q_{wt} = 30\left[\!\left[\frac{-0{,}121(z-1)}{(z-0{,}545)^2} + \frac{0{,}152}{z}\right]\!\right] I_t \qquad (5)$$

(коэффициент вариации для этой зависимости составил $v = 0{,}047$).

Из полученного соотношения следует, что при постоянных объемах инвестиций соотношение между объемами производства и инвестиций стабилизировалось бы на уровне 30 · 0,152 = 4,55 пластин/1 000 долл. США. В действительности, из-за неизбежного увеличения инвестиций по мере снижения топологического размера схем, величина этого соотношения в последнее десятилетие была в 1,5-2 раза меньше (эту разницу характеризует первое слагаемое в правой части (5), представляющее собой распределенное запаздывание второго порядка).

Анализ эффективности инвестиций в ведущих компаниях отрасли. Полученные выше операторные зависимости могут быть использованы при изучении эффективности инвестиций. Однако при наличии временных рядов небольшой продолжительности более надежные результаты могут быть получены на основе операторных зависимостей, связывающих основной капитал (основные фонды) K_t с объемами продаж (доходами, англ. *revenues*) Rev_t и затратами C_t:

$$Rev_t = W_R(z)K_t;\; C_t = W_C(z)K_t\,, \qquad (6)$$

где $W_i(z)$ – передаточные функции, представляющие собой отношение полиномов относительно переменной z, $i = R, C$. Учитывая, что величина основного капитала связана с инвестициями распределенным лагом первого порядка:

$$K_t = \frac{\alpha z}{z - \lambda} I_t\,, \qquad (7)$$

данные зависимости можно использовать при усредненной оценке эффективности (доходности) инвестиций *ROI* (англ. *return on investments*), складывающейся в течение отдельных периодов. Действительно, усредненное значение *ROI* при

[22] URL: http//amd.com

бесконечном горизонте планирования инвестиций составляет:

$$ROI=\frac{\sum_{t=0}^{\infty}\beta^t\frac{\alpha z}{z-\lambda}(W_R(z)-W_C(z))I_t}{\sum_{i=0}^{\infty}\beta^t I_t}=$$
$$=\frac{\alpha\beta^{-1}}{\beta^{-1}-\lambda}(W_R(\beta^{-1})-W_C(\beta^{-1}))=$$
$$=\frac{\alpha(1+r)}{1+r-\lambda}[W_R(1+r)-W_C(1+r)] \quad , \qquad (8)$$

где $\beta=\frac{1}{(1+r)}$ – дисконтирующий множитель, r – ставка процента (при переходе к правой части соотношения (8) использованы свойства z-преобразования, см. [9]).

Проведенный в настоящей работе эконометрический анализ показал, что следующие виды передаточных функций адекватно описывают связь между показателями K_t, с одной стороны, и Rev_t C_t – с другой:

$$W_i(z)=\frac{\gamma_i(z-1)}{(z-\lambda)^2}+\eta_i \quad ; \qquad (9а)$$

$$W_i(z)=\frac{\gamma_i(z-1)}{(z-\lambda)^2}+\frac{\eta_i}{z} \qquad (9б)$$

i = R, C. Значения оценок параметров зависимостей (9а) и (9б) приведены в табл. 2. В большинстве построенных зависимостей коэффициент $\gamma < 0$, что связано с наличием лагов освоения мощностей (для зависимостей с $W_R(z)$), а также эффектов экономии от увеличения масштаба и от обучения (для зависимостей с $W_C(z)$). Расчетные значения показателей, полученные с использованием найденных оценок, близки к фактическим и характеризуются низким значением коэффициентов вариации v (табл. 3).

На основе построенных зависимостей (7), (9а), (9б) могут быть определены объемы основного капитала (фондов) и инвестиций, необходимые для достижения планируемых уровней доходов (продаж). Динамика объемов инвестиций, необходимых для достижения к концу десятилетнего периода объема продаж в 1 млрд долл. США, представлена на рис. 4. При тех характеристиках инвестиционного процесса, которые сложились в компании Intel в 2002–2014 гг., для этого потребовалось бы 1,5 млрд долл. США, а в компании TSMC 2005–2013 гг. – почти 2,5 млрд долл. США. Такая разница в потребных инвестициях обусловлена существенным отличием структуры выпускаемой продукции двух компаний. Так, Intel сосредоточена на выпуске высокодоходных микропроцессоров (норма прибыли при их производстве превышает 60%), а TSMC выпускает полупроводниковую продукцию самого широкого профиля.

Найденные зависимости использовались также при усредненной оценке эффективности инвестиций *ROI* в рассматриваемых компаниях (табл. 4). Полученные результаты показывают, что если бы TSMC в перспективе развивалась так же, как и в 1999–2008 гг., то операционная прибыль компании превысила бы общий объем инвестиций на 57%. Однако при тех параметрах ключевых зависимостей, которые сложились в более поздний период (в 2005–2014 гг.) этот показатель уменьшился бы до до 28,5%. В то же время в компании Intel усредненная эффективность инвестиций повысилась (с 40% в 1997–2009 гг. до 121% в 2002–2014 гг., табл. 4).

О формировании конкурентной среды в отечественной микроэлектронике

При организации новых производств, имеющих жизненно важное значение для экономики и обороноспособности страны, необходимо, как отмечалось ранее, не допускать монополизацию производства. В связи с этим за рубежом в ряде отраслей, особенно в электронной промышленности, широко используется идея «второго источника», появление которой связывают с бывшим министром обороны США Р. Макнамара [10]. Введение «второго источника» позволяет не только снизить риски прекращения разработки и производства жизненно необходимой продукции, но и за счет возникновения конкуренции во многих случаях снизить цену для потребителей. Следует отметить, что в оборонно-промышленном комплексе СССР также поддерживалась конкуренция между предприятиями, хотя и не на рыночной основе.

В микроэлектронике классическим примером «второго источника» является компания AMD, которая в 1982 г. по запросу IBM подписала соглашение об осуществлении функции второго поставщика микропроцессоров для персональных компьютеров IBM наряду с Intel[23]. Некоторые другие примеры соглашений о «втором источнике» в электронной промышленности приведены в табл. 5.

[23] URL: http://amd.com/ru-ru/who-we-are/corporate-information/history

Далее рассматривается игровой подход к формированию рыночных структур, который может быть использован в микроэлектронной отрасли страны. Предполагается, что новое производство микропроцессоров для компьютеров может быть освоено в двух компаниях, то есть создается так называемая *дуополия*. Экономические показатели компаний близки к показателям таких ведущих производителей, как Intel и AMD. Задача государства может состоять в расширении инвестиционных возможностей фирм, ориентированных на достижение максимальной экономической эффективности, или предоставление фирмам субсидий.

Используемая модель. Проводимый в настоящей статье анализ основан на использовании агрегированной динамической модели рационального поведения участников дуополии в виде линейной динамической игры по Нэшу-Курно с квадратичными критериями, в которой участвуют две фирмы [11, 12]. Центральным блоком модели является следующая зависимость, связывающая объемы производства Q_{it} со входной переменной u_{it} (производственными инвестициями или вводом мощностей), i – индекс фирмы, $i = 1, 2$:

$$Q_{it}=W_i(z)u_{it}+Q_{0it}=\frac{B_i(z)}{A_i(z)}u_{it}+Q_{0it} \quad , \qquad (10)$$

где $W_i(z) = B_i(z)/A_i(z)$ – передаточная функция, причем $A_i(z)$, $B_i(z)$ – полиномы относительно переменной z, представляющей собой оператор сдвига $zx_t = x_{t+1}$:

$$A_i(z)=\sum_{i=0}^{n} a_{ik} z^k ; B_i(z)=\sum_{i=0}^{m} b_{ij} z^j , m\leqslant n \quad , \qquad (11)$$

имеющие корни, не превышающие по модулю 1, причем $W_i(1) > 0$; Q_{0t} – объем производства при отсутствии инвестиций.

Другой блок модели – обратная функция (оператор) спроса. В модели предполагается баланс суммарного спроса D_t и предложения Q_t, то есть $D_t=Q_t=\sum_{i=1}^{2} Q_{it}$ и линейная зависимость цены на рынке p_t от объема спроса:

$$p_t = a - bD_t = a - bQ_t , \qquad (12)$$

где a, b– постоянные параметры.

Предполагается, что дуополисты максимизируют чистую текущую стоимость *NPV* с учетом затрат регулирования (*adjustment costs*) (13):

$$J_i'=\sum_{t=0}^{\infty} \beta^t[(p_t-c_i)Q_{it}-q_i u_{it}-1/2\ \rho_i u_{it}^2]\rightarrow \max u_{it} \quad ,$$

где $\beta = 1/(1 + r)$ – дисконтирующий множитель, соответствующий ставке дисконтирования r; p_t – цена продукции; c_i – средние удельные производственные издержки; q_i – стоимость единицы мощностей; $0{,}5\cdot\rho_i u_{it}^2$ – затраты регулирования (*adjustment cost*, см., например [13]), причем $\rho_i > 0$ – коэффициент, характеризующий инвестиционные возможности олигополистов (при прочих равных условиях, чем меньше его величина, тем эти возможности больше), $i = 1, 2$. Управляющими переменными в модели являются вводы мощностей (или инвестиции в основной капитал) u_{it}, $i = 1, 2$.

Оптимальные по Нэшу-Курно стратегии участников рынка. В статьях автора [11, 12] разработан эффективный метод определения оптимальных разомкнутых (*open-loop*) игровых стратегий олигополистов с критерием (13), основанный на использовании операционного исчисления (широко распространенного при исследовании дискретных систем управления и в теории связи *Z*-преобразования, см., например[24] [14]), и нахождении экстремума функционалов в гильбертовом пространстве. Используя предложенный метод, из необходимого условия экстремума функционала (13) можно получить формулы для расчета оптимального управления u_{it} (производственных инвестиций и др.) и объемов производства Q_{it} i-го дуополиста, максимизирующего критерий *NPV* с учетом затрат регулирования [11]:

$$Q_{it}=W_i(z)u_{it}=\frac{\Gamma_i(z,\beta_z^{-1})}{b}(p_t-PL_i-bQ_{0it}) \quad , \qquad (14)$$

где $PL_i = c_i + q_i/W(1 + r_i)$ – лимитирующие затраты i-й фирмы;

$$\Gamma_i[z,\beta_z^{-1}]=\frac{bW_i(z)W_i(\beta_z^{-1})}{\rho_i+bW_i(z)W_i(\beta_z^{-1})} \quad , i = 1, 2 \qquad (15)$$

$$p_t=\frac{1}{1+\sum_{i=1}^{2}\Gamma_i[z,\beta_z^{-1}]}\left\{a+\sum_{i=1}^{2}\Gamma_i[z,\beta_z^{-1}](PL_i+bQ_{0it})\right\} . \qquad (16)$$

[24] *Кузин Л.Т.* Расчет и проектирование дискретных систем управления. М.: Машгиз, 1962.

Используя свойства Z-преобразования, можно при постоянных PL_i, основываясь на (14) и (15), оценить установившиеся уровни производства участников рынка $Q_{i\infty}$ [11]:

$$Q_{i\infty}=\frac{\Gamma_i(1,(1+r))}{b}(p_\infty-PL_i) \quad , \qquad (14a)$$

цены $p_\infty = a - b(Q_{1\infty} + Q_{2\infty})$, рыночных долей двух групп фирм $MS_1(\infty)$ и $MS_2(\infty)$, а также других показателей.

Из выражений (14)–(16) следует, что фирмы могут повысить объемы производства и рыночную долю за счет уменьшения лимитирующих затрат PL_i и коэффициентов ρ_i, характеризующих их инвестиционные возможности (их значение влияет на величину $\Gamma_i(1, 1 + r)$). Следовательно, желаемая рыночная структура может быть обеспечена регулирующим органом (или ассоциацией потребителей производимого фирмами продукта) как путем предоставления субсидий, так и путем расширения инвестиционных возможностей отстающих участников.

Для реализации последнего способа необходимо рассчитать значения коэффициентов ρ_i, при которых достигаются желаемые установившиеся уровни производства компаний $Q_{i\infty}$. Основываясь на формуле (14а), можно получить:

$$\rho_i=\frac{W_i(1)W_i(1+r)}{Q_{i\infty}}[(p_\infty-PL_i)-b] \text{ , } i = 1, 2 \text{ .} \quad (17)$$

После нахождения коэффициентов ρ_i на основе формул (14)–(16) вычисляется динамика объемов производства дуополистов Q_{it}, цены и других рыночных показателей.

Динамика объемов производства микропроцессоров Q_{it}, (i = 1, 2) и инвестиций компаний I_{it}, (i = 1, 2) в условной дуополии, структура которой сформирована в соответствии с предлагаемым подходом, приведена на рис. 5 и 6. В расчетах принято, что передаточные функции, связывающие инвестиции (в млн долл. США) и объемы производства процессоров (в млн ед.), имеют следующий вид:

$$Q_{it}=\frac{0{,}02}{z-0{,}75}I_t \quad . \qquad (18)$$

Если PL_i = 59,3 долл. США/ед., ставка процента r = 0,05, то средняя цена микропроцессора в долларах линейно связана с объемами их предложения на рынке (в нашем случае – с суммарным объемом производства участников $Q_{\text{tot}\,t} = Q_{1t} + Q_{2t}$, млн ед.):

$$p_t = 178{,}765 - 0{,}164(Q_{1t} + Q_{2t}) \text{ ,} \qquad (19)$$

причем последняя зависимость получена на основе данных о средней цене микропроцессоров Intel и продажах персональных компьютеров на российском рынке. Заданные установившиеся уровни производства участников рынка составляют $Q_{1\infty} = 2$ и $Q_{2\infty} = 10$ млн микропроцессоров в год. Соответствующие этим уровням значения коэффициентов ρ_i, рассчитанные в соответствии с (17), составляют: $\rho_1 = 0{,}0232$; $\rho_2 = 0{,}0063$.

Расчеты на основе соотношений (14)–(16), (18) показывают, что для выхода на заданные уровни производства фирмам потребуется за 10-летний период осуществить инвестиции в основной капитал соответственно в объемах 272 и 1 210 млн долл. США.

Заключение

Рассмотренные в статье эконометрические модели позволяют провести содержательный анализ инвестиционных процессов на рынках микроэлектронной продукции. Они создают основу для формирования регулирующими органами эффективных рыночных структур.

Предложен эффективный метод конструирования структуры рынков микроэлектронной продукции, основанный на использовании Z-преобразования. Рассмотренный метод позволяет проводить оценку ключевых экономических показателей рынков и компаний в динамике.

Полученные результаты могут быть использованы при формировании предложений по созданию структуры отечественного рынка продукции микроэлектроники, по государственной политике стимулирования инвестиционной деятельности, а также по антимонопольной политике.

Таблица 1

Оценки параметров a_i, b_i зависимости (2), i = 1, 2 для компании TSMC

Сегмент	a_i	b_i	Коэффициент детерминации R^2
Связь	0,62446 (0,03527)	–0,00149 (0,00021)	0,764
Компьютеры	0,10639 (0,0363)	0,00128 (0,00022)	0,694

Таблица 2

Коэффициенты корреляции капиталотдачи f_{kt} и общих затрат на единицу основного капитала c_{kt} с минимальным топологическим размером интегральных схем $hp_{min\ t}$ в компании TSMC

Годы	f_{kt}	c_{kt}	$f_{kt} - c_{kt}$	$hp_{min\ t}$, нм
1999–2007	–0,835	–0,904	–0,713	1
2008–2014	0,904	0,934	0,79	1

Таблица 3

Оценки параметров зависимостей (9а), (9б)

Компания	Период оценивания	Вид зависимости	λ	γ	η	$T_{0,01}$	Коэффициент вариации v
I. Зависимость: Основной капитал → Продажи $W_R(z)$							
TSMC	1999–2008	(9б)	0,763	0,037	1,126	23,9	0,098
TSMC	2005–2013	(9б)	0,566	–0,748	1,416	11	0,066
Intel	1997–2009*	(9а)	0,436	–1,907	2,187	7,4	0,047
Intel	2002–2014*	(9а)	0,59	–1,23	2,181	11,6	0,023
II. Зависимость: Основной капитал → Общие затраты (включая затраты на маркетинг и исследованияи разработки $W_C(z)$)							
TSMC	1999–2008	(9б)	0,514	–0,024	0,784	9,4	0,068
TSMC	2005–2013	(9б)	0,551	–0,633	0,996	10,5	0,035
Intel	1997–2009*	(9а)	0,521	–1,113	1,733	9,6	0,054
Intel	2002–2014*	(9а)	0,798	–0,712	1,812	28,8	0,061

* Оценки для соотношения между основным капиталом K и скользящим средним от доходов *MA Rev*.

Таблица 4

Усредненные оценки эффективности (доходности) инвестиций *ROI*

Компания	Период оценивания	$W_R(1 + r)$	$W_C(1 + r)$	ROI	$ROI - 1$
TSMC	1999–2008	4,166	2,598	1,568	0,568
TSMC	2005–2014	4,158	2,872	1,285	0,285
Intel	1997–2009	6,768	5,367	1,401	0,401
Intel	2002–2014	6,618	4,408	2,21	1,21

Примечание. r = 0,05.

Таблица 5

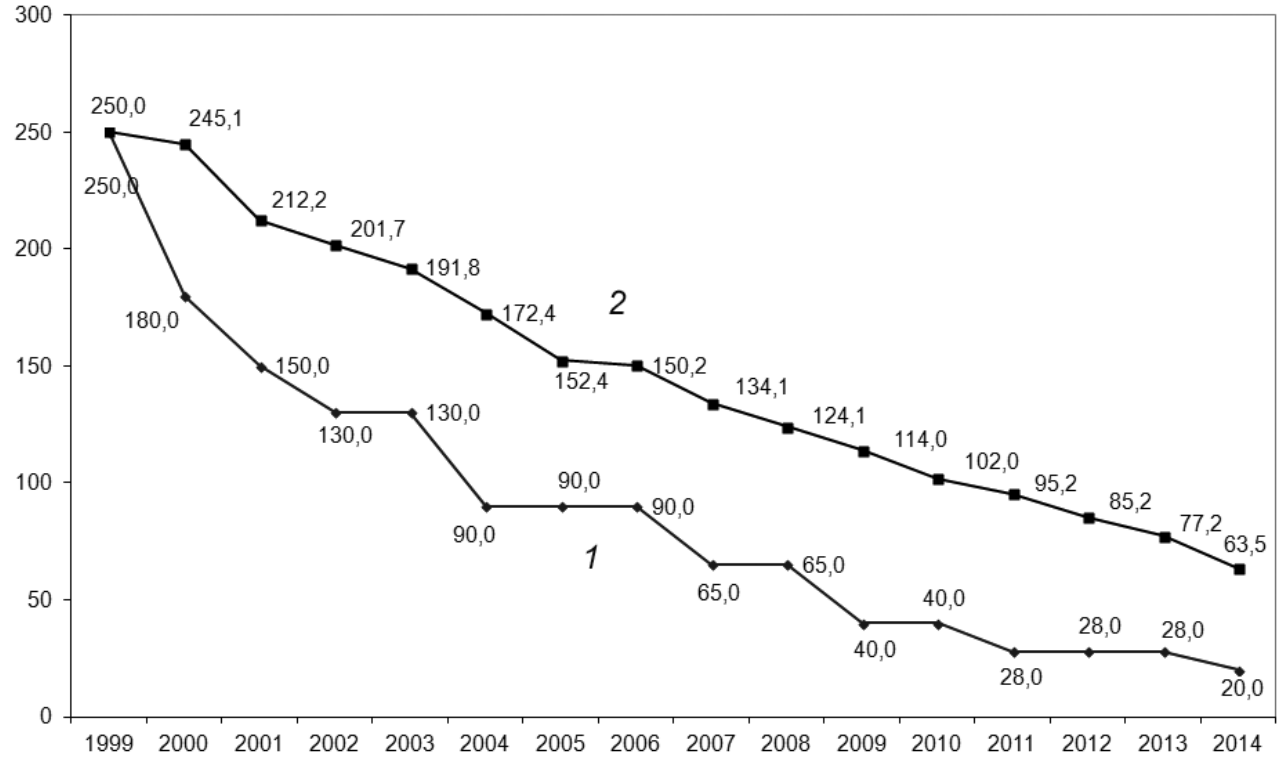
Примеры соглашений о «втором источнике» в электронной промышленности

Компания – разработчик нового продукта (технологии)	Компания – «второй источник»	Рынок	Лицензируемый продукт	Год заключения соглашения
FCI Electronics	Samtec Inc.	Высокоскоростные межсоединения	Высокоскоростные соединения следующего поколения ExaMAX®, разработанные FCI Electronics	2014
Soitec	IntelliEPI	Полупроводники на основе арсенида галлия (GaAs)	Технологии компании Soitec	2013
Integrated Device Technology, Inc. (IDT)	Texas Instruments inc.	Переключательные устройства для телекоммуникационных систем	Высокоскоростные переключательные устройства, разработанные компанией IDT	2001
Microsemi	Motorola	Выпрямители для смартфонов и ноутбуков на основе эффекта Шоттки	Пакет выпрямителей Powermite(R) малого размера, разработанный компанией Microsemi	1996

Источник: [11]

Рисунок 1

Динамика топологических размеров интегральных схем в компании TSMC 1999–2014 гг., нм:
1 – минимального $hp_{min\ t}$; *2* – среднего $hp_{avg\ t}$



Источник: составлено по данным годовых отчетов URL: http://tsmc.com

Рисунок 2

Динамика объемов производства микропроцессоров для двух вариантов производственной программы в каждый следующий год, млн шт.:
1 – Q_{max} = 10; *2* – Q_{max} = 20

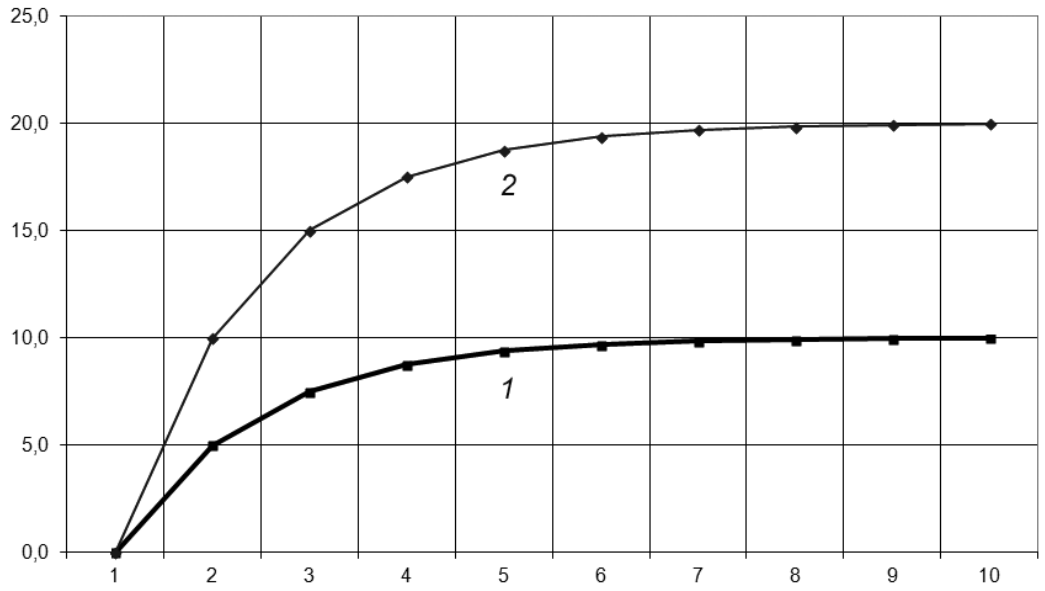
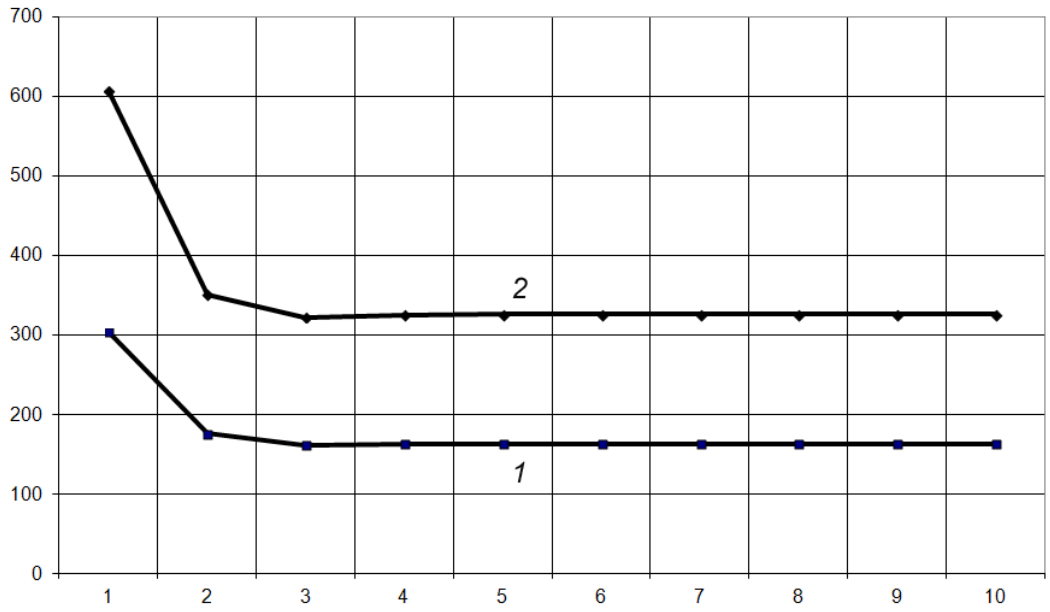


Рисунок 3

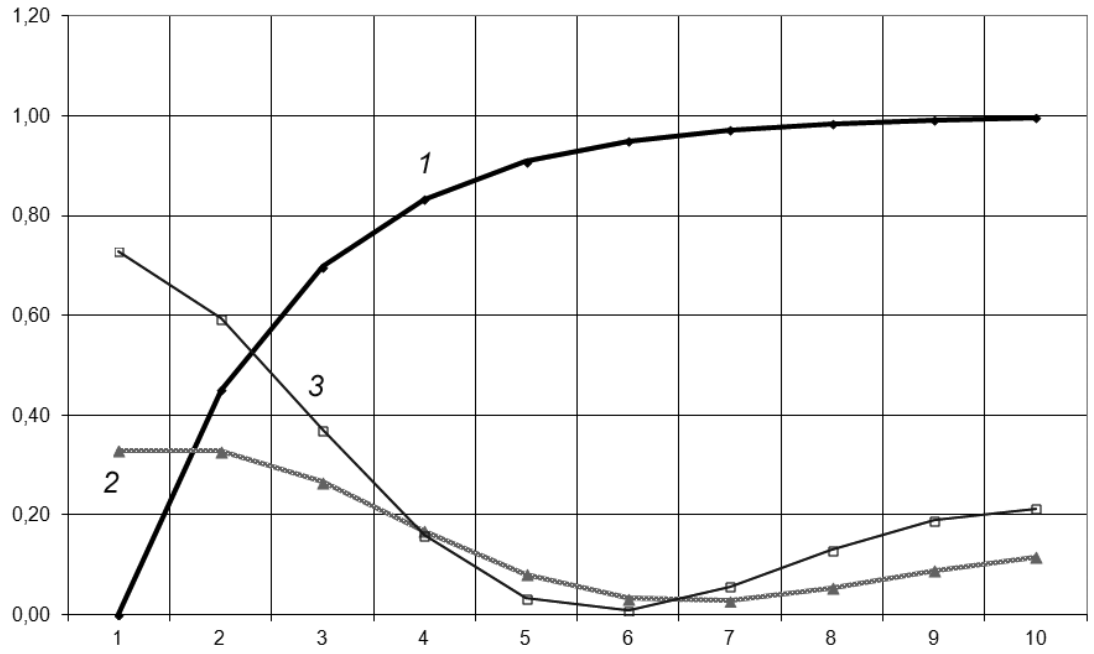
Динамика инвестиций в основной капитал, необходимых для обеспечения двух вариантов производства микропроцессоров в каждый следующий год, млн долл. США:
1 – Q_{max} = 10; *2* – Q_{max} = 20



Источник: рассчитано на основе эконометрической зависимости (4) для компании AMD

Рисунок 4

Динамика инвестиций в основной капитал, необходимых для обеспечения заданных объемов продаж в каждый следующий год, млрд долл. США:
1 – объем продаж; *2* – инвестиции Intel; *3* – инвестиции SMC



Источник: рассчитано на основе эконометрической зависимости (9а), (9б) для компаний Intel (за период 2002–2014 гг.) и TSMC (за период 2005–2013 гг.)

Рисунок 5

Динамика объемов производства микропроцессоров в условной дуополии в каждый следующий год, млн шт.:
1 – суммарных Q_{tot} ; *2* – в компании $Q_{1\,t}$; *3* – в компании $Q_{2\,t}$

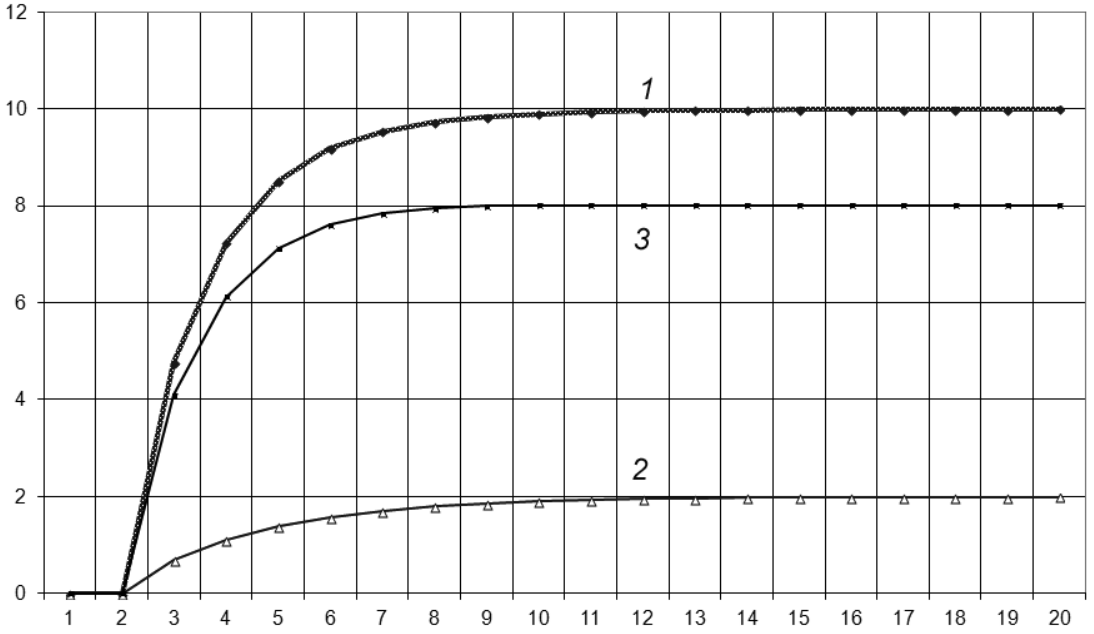
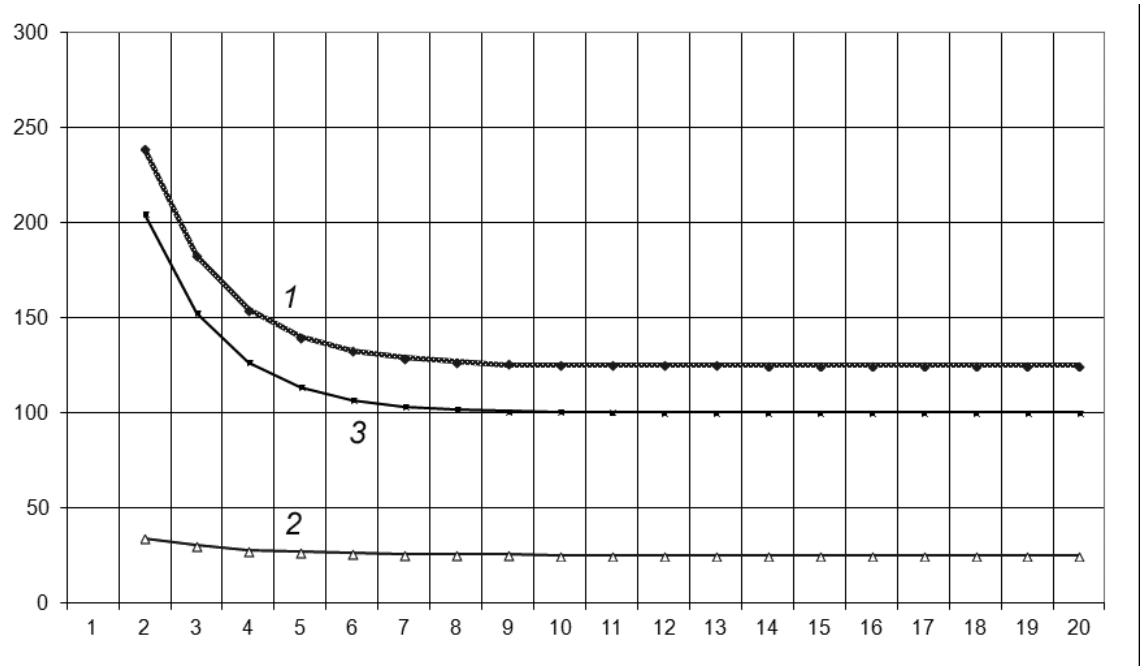


Рисунок 6

Динамика объемов инвестиций в производство микропроцессоров в условной дуополии в каждый следующий год, млн долл. США:

1 – суммарных I_{tot} ; *2* – в компании $I_{1\,t}$; *3* – в компании $I_{2\,t}$



Список литературы

1. *Лаврентьев А.* Законодательная власть России обеспокоена стратегической безопасностью страны // Электроника: наука, технология, бизнес. 2001. № 4. С. 64–65.

2. *Kvamme E.F.* Life in Silicon Valley: A first-hand view of the region growth. In: The Silicon Valley Edge: a habitat for innovation and entrepreneurship. Ed. by Chong-Moon Lee et al. Stanford: Stanford University Press, 2000. P. 59–80.

3. *Lecuyer C.* Fairchild Semiconductor and its influence. In: The Silicon Valley Edge: a habitat for innovation and entrepreneurship. Ed. by Chong-Moon Lee et al. Stanford: Stanford University Press, 2000. P.158–183.

4. *Гроув Э.* Выживают только параноики. Как использовать кризисные периоды, с которыми сталкивается любая компания. М.: Альпина Бизнес Букс, 2004. 200 с.

5. *Dennard R.H., Gaensslen F.H., Rideout V.L., Bassous E., LeBlanc A.R.* Design of ion-implanted MOSFET's with very small physical dimensions // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 1974. vol. 9, iss. 5, P. 256–268.

6. *Варшавский Л.Е.* Проблемы повышения энергоэффективности аппаратных средств в области информационных технологий // Труды ИСА РАН. 2013. Т. 63. Вып. 3. С. 3–19.

7. *Варшавский Л.Е.* Исследование динамики показателей рынков наукоемкой продукции (на примере рынков компонентов персональных компьютеров) // Экономика и математические методы. 2004. Т. 40. № 1. С. 101–116.

8. *Рудометов Е.* Материнские платы и чипсеты. Анатомия ПК. СПб: Питер, 2007. 368 с.

9. *Варшавский Л.Е.* Исследование инвестиционных стратегий фирм на рынках капитало- и наукоемкой продукции (производственные мощности, цены, технологические изменения). М.: Изд-во ЦЭМИ РАН, 2003. 354 с.

10. *Джексон Т.* INTEL. Взгляд изнутри. М.: Лори, 1998. 346 с.

11. *Варшавский Л.Е.* Использование методов теории управления для формирования рыночных структур // Компьютерные исследования и моделирование. 2014. Т. 6. № 5. С. 839–859.

12. *Варшавский Л.Е.* Приближенные методы исследования динамики показателей рыночной структуры // Компьютерные исследования и моделирование. 2012. Т. 4. № 1. С. 219–229.

13. *Gordon S.* Costs of Adjustment, the Aggregation problem and Investment // The Review of Economics and Statistics. 1992. Vol. 74. № 3. P. 422–429.

14. *Jury E.I.* Theory and Applications of the Z-Transform Method. New York: John Wiley, 1964.

ISSN 2311-875X (Online)
ISSN 2073-2872 (Print)

Priorities of Russia

ECONOMIC AND MATHEMATICAL METHODS FOR ANALYZING TRENDS IN MARKET PROCESSES AND THE FORMATION OF COMPETITIVE ENVIRONMENT IN MICROELECTRONICS

Leonid E. VARSHAVSKII

Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
hodvar@mail.ru

Article history:
Received 7 October 2015
Received in revised form
1 December 2015
Accepted 20 January 2016

JEL classification: C54, D43, O21

Keywords: microelectronics, modeling, investment processes, competitive environment, dynamic games

Abstract

Importance Whereas orders and finance for the science-intensive sector decreased in the 1990s and slowed down the sector's development, it became reasonable to formulate a strategy and overcome a lag in the sector.

Objectives The research devises economic and mathematical methods to analyze trends in market processes and form the competitive environment in microelectronics. I also examine how microelectronics develops nation-wide and abroad, analyze investment processes in leading microelectronic companies.

Methods I considered the nvestment processes using econometric methods. The feasibility of investment is examined on the Z-transform framework. I propose an approach to forming market structures in microelectronics, which is based on dynamic games.

Results I analyzed the main trends and drivers in economic development of microelectronics in Russia and abroad; examined the effect of changes in the feature size of semiconductor circuits on the output structure and economic dynamic properties of investment processes in leading companies; invented a Z-transform-based approach to determining the return on production investment based. The article presents mathematical tools for designing market structures, which involve a game-based approach and Z-transform.

Conclusions and Relevance The proposed economic and mathematical methods and models allow analyzing the investment processes in microelectronic markets and lay the basis for regulatory authorities to set up effective market structures. The results can be used to outline proposals for the structure of the domestic microelectronic market, government policies for encouraging the investment activities and anti-monopoly policies.

© Publishing house FINANCE and CREDIT, 2015

References

1. Lavrent'ev A. Zakonodatel'naya vlast' Rossii obespokoena strategicheskoi bezopasnost'yu strany [Strategic security problems worry the Russian legislative authorities. It's time to speak on business]. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes = Electronika: Science, Technology, Business*, 2001, no. 4, pp. 64–65.

2. Kvamme E.F. Life in Silicon Valley: A First-Hand View of the Region Growth. In: The Silicon Valley Edge: a Habitat for Innovation and Entrepreneurship. Stanford, Stanford University Press, 2000, pp. 59–80.

3. Lecuyer C. Fairchild Semiconductor and its Influence. In: The Silicon Valley Edge: a Habitat for Innovation and Entrepreneurship. Stanford, Stanford University Press, 2000, pp.158–183.

4. Grove A. *Vyzhivayut tol'ko paranoiki. Kak ispol'zovat' krizisnye periody, s kotorymi stalkivaetsya lyubaya kompaniya* [Only the Paranoid Survive: How to Exploit the Crisis Points That Challenge Every Company]. Moscow, Al'pina Biznes Buks Publ., 2004, 200 p.

5. Dennard R.H., Gaensslen F.H., Rideout V.L., Bassous E., LeBlanc A.R. Design of Ion-Implanted MOSFET's with Very Small Physical Dimensions. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 1974, vol. 9, iss. 5, pp. 256–268.

6. Varshavskii L.E. Problemy povysheniya energoeffektivnosti apparatnykh sredstv v oblasti informatsionnykh tekhnologii [Issues of increasing the energy efficiency of the equipment infrastructure in IT]. *Trudy ISA RAN = Proceedings of Institute for Systems Analysis of RAS*, 2013, vol. 63, iss. 3, pp. 3–19.

7. Varshavskii L.E. Issledovanie dinamiki pokazatelei rynkov naukoemkoi produktsii (na primere rynkov komponentov personal'nykh komp'yuterov) [Studying the trends in markets of science-intensive products: Evidence from markets of PC components]. *Ekonomika i matematicheskie metody = Economics and Mathematical Methods*, 2004, vol. 40, no. 1, pp. 101–116.

8. Rudometov E. *Materinskie platy i chipsety. Anatomiya PK* [Motherboards and chipsets. PC anatomy]. St. Petersburg, Piter Publ., 2007, 368 p.

9. Varshavskii L.E. *Issledovanie investitsionnykh strategii firm na rynkakh kapitalo- i naukoemkoi produktsii (proizvodstvennye moshchnosti, tseny, tekhnologicheskie izmeneniya)* [The research into investment strategies of firms in markets of capital- and science-intensive products (production capacities, prices, technological changes)]. Moscow, CEMI RAS Publ., 2003, 354 p.

10. Jackson T. *INTEL. Vzglyad iznutri* [Inside Intel: Andy Grove and the Rise of the World's Most Powerful Chip Company]. Moscow, Lori Publ., 1998, 346 p.

11. Varshavskii L.E. Ispol'zovanie metodov teorii upravleniya dlya formirovaniya rynochnykh struktur [The use of the control theory methods to form market structures]. *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie = Computer Research and Modeling*, 2014, vol. 6, no. 5, pp. 839–859.

12. Varshavskii L.E. Priblizhennye metody issledovaniya dinamiki pokazatelei rynochnoi struktury [Approximate methods for studying trends in market structure indicators]. *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie = Computer Research and Modeling*, 2012, vol. 4, no. 1, pp. 219–229.

13. Gordon S. Costs of Adjustment, the Aggregation problem, and Investment. *The Review of Economics and Statistics*, 1992, vol. 74, no. 3, pp. 422–429.

14. Jury E.I. Theory and Applications of the Z-Transform Method. New York, John Wiley, 1964.