

Моделирование динамики ключевых показателей рынков компонентов высокопроизводительных вычислительных систем*

Л.Е. ВАРШАВСКИЙ

Аннотация. В статье проводится технико-экономический анализ развития рынков компонентов высокопроизводительных вычислительных систем. Рассматриваются экономико-математические модели развития крупных компаний-производителей микропроцессоров и микросхем. С использованием игрового подхода исследуются сценарии среднесрочного прогнозирования динамики ключевых показателей рынка микропроцессоров архитектуры x86 и ARM в целом и для серверов.

Ключевые слова: микропроцессоры, серверы, микроэлектроника, экономико-математическое моделирование, динамические игры, сценарии.

Введение

Развитие высокопроизводительных вычислительных систем (НРС-систем), и особенно суперкомпьютерных технологий, является одним из решающих факторов повышения конкурентоспособности и укрепления национальной безопасности страны. В связи с этим актуальными являются исследования в области анализа и прогнозирования развития рынка НРС-систем и компонентов для них.

К настоящему времени опубликовано относительно небольшое число работ, относящихся к экономическому исследованию и моделированию различных аспектов развития рынков отдельных компонентов для компьютеров (в основном систем памяти и микропроцессоров) и НРС. Так, в работе [1] проведено исследование технологических изменений рынка компонентов для персональных компьютеров. Разработана эконометрическая модель динамики показателей дуополистического рынка микропроцессоров x86, на основе которой построены сценарии поведения ключевых показателей рынка (средней цены, инвестиций, мощностей, рыночной структуры) на 2002-2006 гг.

В работе [2] построена модель, восходящая к пионерской работе Solow (типа vintage-capital). Значительное внимание в работе уделяется теоретическому анализу динамики цены на микропроцессоры и взаимосвязи темпов снижения цен на вводимые поколения микропроцессоров с темпами уплотнения чипов в соответствии с, так называемым, «законом Мура».

В статье [3] также на основе модели типа vintage-capital исследуются факторы, повлиявшие на динамику технологического прогресса в подотрасли производства микропроцессоров в разные периоды времени.

В статье [4] исследование дуополистического рынка микропроцессоров проводится с учетом того, что драйверами инноваций на рынке являются как конкуренция между дуополистами, так и конкуренция между новым и старым оборудованием, вынуждающая потребителей проводить модернизацию и обновление компьютерного парка. Один из полученных в статье выводов состоит в том, что из-за второго драйвера, монополизация рынка компанией Intel в сложившихся условиях заставила бы последнюю проводить более интенсивную инновационную политику.

В работах [5, 6] исследуется влияние технологических инноваций на структуру рынка суперкомпьютеров, участниками которого являются многопродуктовые фирмы. При ограниченном числе участников рынка показано наличие положительной связи между уровнем конкуренции и инновационной активностью.

Следует, однако, отметить, что вне поля зрения авторов остаются, например, такие появившиеся в последнее время проблемы, как: возможное расширение сегментов рынка микропроцессоров и других приборов в направлении создания энергоэкономичных компонентов для серверов, центров обработки данных (ЦОД, англ. data centers), Интернета вещей (Internet of Things – IoT) и др. приборов и систем. Кроме того, необходимо подчеркнуть, что по имеющейся у нас информации, большая

* Работа подготовлена при частичной финансовой поддержке Российского гуманитарного научного фонда (проект №15-02-00363).

часть работ экономистов в рассматриваемых областях ориентирована лишь на описание сложившихся явлений и процессов с помощью понятий и концепций современной экономической теории и эконометрики, а не на построение инструментария для формирования прогнозов и сценариев развития рынков, связанных с НРС.

Данная проблема актуальна для нашей страны при построении эффективной стратегии импортозамещения, которая должна учитывать опыт развития ведущих компаний мира. Для ее решения в сложившихся условиях особенно важно иметь правильные оценки динамических характеристик развития компаний-производителей компонентов НРС в условиях конкуренции. Эти характеристики могут быть использованы при прогнозировании и планировании показателей деятельности отечественных предприятий, при оценке показателей эффективности производственных инвестиций, а также при формировании конкурентной среды в разных направлениях (сегментах) подотрасли.

В связи с определяющим влиянием элементной базы на производительность НРС-систем и обостряющейся проблемой ее импортозамещения, в настоящей статье значительное внимание уделяется разработке экономико-математических моделей развития рынка микропроцессоров для персональных компьютеров (PC) в целом и для серверов, в которых отражены наметившиеся структурные сдвиги (насыщение рынка персональных компьютеров, выход на рынок микропроцессоров для серверов новых производителей и др.). Подробно рассматриваются составные блоки моделей, описывающие инвестиционные процессы в ведущих компаниях микроэлектронной промышленности.

С использованием аппарата теории динамических игр разработаны прогнозные сценарии развития рынков микропроцессоров. Рассмотренный игровой подход может быть также использован применительно к другим высокотехнологичным производствам.

1. Основные тенденции развития элементной базы НРС (на примере микроэлектроники)

Основу элементной базы НРС-систем составляет продукция микроэлектронной промышленности. 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 тогда сотрудников компаний-разработчиков полупроводниковой продукции (в первую очередь Fairchild, Texas Instruments) искать новые решения по повышению, прежде всего, надежности схем, что в итоге привело к созданию ИС и новой подотрасли (отметим, что наши специалисты старались не отставать от американских [7]).

Быстрое развитие микроэлектроники в 1960-х гг. во многом было связано с возникновением в Кремниевой долине (Silicon Valley) целого кластера новых фирм и организацией их поддержки со стороны венчурных фондов. Прогресс в области миниатюризации ИС позволил наладить выпуск широкой гаммы 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 Fairchild. На базе этой компании с численностью в лучшие годы 1400 чел. возникло множество малых компаний (spinoffs) с численностью 12500 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 архитектуры x86 для разработанных в компании IBM персональных компьютеров и впоследствии, отказавшись от выпуска модулей памяти, стать ведущим участником нового рынка [8–10].

Одним из важнейших драйверов развития микроэлектроники с момента ее зарождения стало повышение степени интеграции полупроводниковых схем, что обеспечивало увеличение быстродействия, снижение рассеиваемой энергии и повышение качества и надежности работы схем. Еще в середине 1960-х гг. видным специалистом в области микроэлектроники, одним из основателей

компания Intel Г. Муром (H. Moore) была выдвинута широко известная ныне гипотеза об увеличении в 2 раза степени интеграции интегральных схем через каждые 1,5–2 года, впоследствии ставшая императивом последующих изменений в микроэлектронике [11]. 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). Следование этой закономерности позволяло вплоть до начала 2000-х гг. добиваться роста производительности устройств (микропроцессоров, памяти) главным образом за счет их минитюаризации и увеличения частоты [12].

Однако уже в середине первого десятилетия XXI века, в связи с форсированием разработчиками роста производительности микросхем путем использования решений, способствовавших несбалансированному с уменьшением размеров схем росту тактовой частоты (в первую очередь это относится к создававшимся микропроцессорам), кремниевая полупроводниковая КМОП-технология стала подходить к границам своего развития. К этому времени стали остро ощущаться проблемы, связанные с повышением энергоемкости электронных приборов при уменьшении размеров и ростом капиталоемкости их производства. В первую очередь, необходимо 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 [13]).

Эти факторы уже в середине 2000-х гг. стали сдерживать дальнейшее уменьшение напряжения, подаваемое на транзисторы, и особенно рост тактовой (внутренней) частоты. С этого времени закон Деннарда перестал действовать. Показательной является судьба микропроцессора Tejas, разработанного компанией Intel. В 2002–2004 гг. компанией 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. Однако в конце 2004 г. разработчикам компании стало ясно, что при заявленных параметрах он характеризуется весьма высоким тепловыделением (впоследствии было установлено, что имеет место степенная зависимость потребляемой процессором мощности от его тактовой частоты с показателем степени, большим 2 [14]). По этой причине в 2005 г. Intel объявил об отказе от производства микропроцессора Tejas, и в 2006 г. перешел к выпуску двухядерного процессора Core^{*}, а впоследствии – многоядерных процессоров.

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 традиционной планарной к энергоэффективной трехмерной структуре транзисторов (плавниковая конструкция FinFET с топологическим размером 22 нм и 14 нм, [15]**), достигнуты определенные успехи в разработке кремний-фотонных приборов на одном чипе, в которых проводящие металлические соединения заменяются на оптические (подробнее см. [13]).

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 годов. С 1995 г. по 2015 г. топологический размер полупроводниковых схем уменьшился в 25 раз, причем только за последние 10 лет – почти в 5 раз (рассчитано по данным [16, с. 249]; <http://www.intel.com>). В 2015 г. Intel начал производство чипов с топологическим размером микросхем 14 нм, причем в 2017 г. предполагает перейти на топологический размер 10 нм, а впоследствии – на 7 нм и 5 нм***. Следует отметить, что Intel является технологическим лидером по производству чипов. Другие компании-производители микросхем используют в качестве топологического размера (англ. node) собственные характеристики размеров, которые, несмотря на объявляемую ими малую величину, несопостави-

* URL: <http://pe4.info/1-7.php>

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

*** URL: <http://www.cnews.ru/news/top/index.shtml?2012/05/15/489441>.

мы с объективной характеристикой топологического размера, используемого Intel*.

Вероятность перехода компаний-производителей чипов на эти, и еще более совершенные технологические процессы, в последнее время возросла, что, в частности, связано с наметившимся прогрессом в создании долго ожидавшихся экономически эффективных установок экстремальной ультрафиолетовой фотолитографии (EUV-сканеров). Так, нидерландская компания ASML Holding NV, являющаяся ведущим производителем установок фотолитографии, уже в 2015 г. производила EUV-сканер NXE:3350B system с оптической мощностью 80 Вт. Однако для рентабельного производства чипов выходная мощность излучения, по оценкам этой компании, должна составлять 200-250 Вт, что, при решении ряда других проблем (связанных, в частности, с созданием защитных термостойких мембран для фотошаблонов) может обеспечить необходимый суточный объем выпуска 1500 пластин. К настоящему времени на EUV-сканерах удалось довести выпуск продукции до 1000 пластин в день, а на установках NXE:3350B system – 1368 пластин в течение 24 часов. Однако коэффициент готовности (availability) созданных EUV-сканеров составляет пока 70-75%, что существенно ниже, чем при использовании применяемой в настоящее время иммерсионной технологии (95%). В связи с нерешенностью перечисленных проблем в последнее время несколько снизился оптимизм в отношении сроков начала массового использования EUV-систем. Так, компания Intel планирует освоить производство чипов с топологическими размерами 10 нм и 7 нм, основываясь на собственных разработках (используя усовершенствованный вариант иммерсионной технологии – multiple patterning), а компания TSMC предполагает использовать EUV-установки при освоении технологии с уровнем 5 нм только в 2020 г. **, ***, ****.

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

* URL: <http://www.extremetech.com/computing/227229-samsung-full-speed-ahead-for-10nm-euv-deploys-at-the-7nm-node>

** URL: <http://electronics360.globalspec.com/article/5264/intel-orders-15-euv-lithography-systems>.

*** <https://www.asml.com/euv-is-at-the-cusp-of-being-introduced-in-volume-chip-production-the-industrialization-metrics-of-euv-most-importantly-productivity-and-availability-will-drive-the-decision-/en/s41905?rid=41906>

**** URL: <http://www.extremetech.com/computing/221532-tsmc-will-begin-10nm-production-this-year-claims-5nm-by-2020>

пределам роста производительности схем. Так, в последнее время ежегодные затраты на исследование и разработки (RD) только в компании Intel составляют свыше 10 млрд. долл. (т.е. более 20% от уровня доходов), причем они уже превосходят инвестиции компании в основной капитал. Характерно, что даже в кризисные годы объем затрат на исследование и разработки в ведущих компаниях отрасли практически не уменьшается. Достаточно типичной является динамика этих затрат, приведенная на рис. 1 по данным компании Intel.

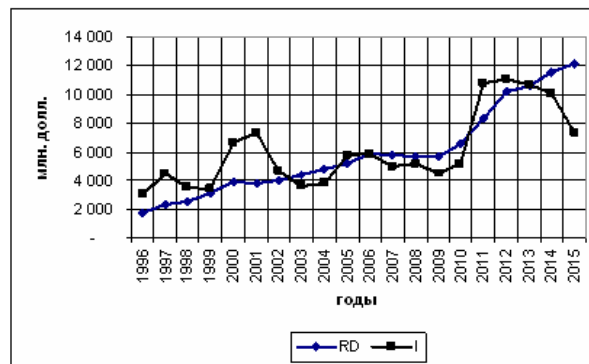


Рис. 1. Динамика затрат на исследования и разработки (RD) и капитальных вложений (I) в компании Intel (в млн. долл. в текущих ценах: составлено по данным годовых отчетов из www.intel.com)

О значительной величине производственных инвестиций в обновление производства свидетельствует и тот факт, что капитальные вложения Intel в сооружение фабрики по производству чипов с топологическим размером схем 14 нм в штате Аризона оценивались в 5 млрд. долл. ****. В другой компании, Global Foundries, специализирующейся на производстве чипов, суммарные за время существования производственные инвестиции в фабрику №1 в г. Дрездене (месячной производственной мощностью 80000 пластин диаметром 300 мм с топологическим размером схем 45 нм) составили 7 млрд. долл. Объем этих инвестиций является одним из наиболее крупных среди зарубежных инвестиций, когда-либо сделанных в Германии *****. Наглядной характеристикой капиталоемкости производства в отрасли является стоимость EUV-сканера NXE:3350B, которая составляет 75 млн. долл., что практически совпадает с ценой современного магистрального узкофюзеляжного самолета Boeing-737-700***** (на крупной фабрике требуется не менее 10 таких установок).

**** URL: <http://www.nanowerk.com/news/newsid=20205.php>

***** URL: <http://www.globalfoundries.com/manufacturing/manufacturing-overview>

***** URL: <http://www.boeing.com/company/about-bca/>

Усложнение условий развития заставило компанию Intel отказаться от двухгодичного цикла в используемой с 2007 г. модели технологических изменений (tick-tock) и перейти к трехгодичному циклу (освоение нового технологического процесса – выпуск микропроцессора с новой архитектурой – повышение производительности и энергоэффективности процессоров)*.

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, т.е. не имеющие в своем составе фабрик). Такое разделение позволило фирмам-разработчикам схем сосредоточиться на стадии исследований и разработок, а также на продаже продукции. За счет аутсорсинга производства им удалось существенно снизить зависимость от выпуска своей продукции на свободных мощностях фабрик интегрированных 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 [17]. Эта компания, созданная в конце 1980-х гг., превратилась в крупнейшую компанию-производителя пластин и микросхем (pure-play semiconductor foundry) на основе дизайнов второй группы компаний (fabless), с годовым объемом продаж около 20 млрд. долл. На нее приходится почти 50% объема продаж фирм первой группы. За последнее десятилетие повысилась концентрация производства на рынке производителей пластин (foundries), в результате чего он 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., – ниже (доля 10 крупнейших фирм составляла менее 65%) **. Наиболее крупными из них являются компании Qualcomm, Broadcom, AMD (с 2009 г., после передачи своих фабрик в компанию Global Foundries).

Среди чисто дизайнерских фирм особая роль принадлежит компании ARM Ltd. которая специализируется на разработке чипов с процес-

сорами на основе собственной ARM-архитектуры. По данным этой компании в 2015 г. с использованием этих процессоров всего в мире было произведено 15 млрд. чипов, причем 45% из них было использовано в мобильных устройствах. В 85% всех производимых смартфонов были установлены энергоэффективные процессоры с архитектурой ARM. Сравнительно небольшие доходы этой компании (в 2015 г. они составляли немногим менее 1,5 млрд. долл) формируются за счет лицензий и ройалти на производимую продукцию. Динамика ключевых показателей компании приведена на рис. 2.

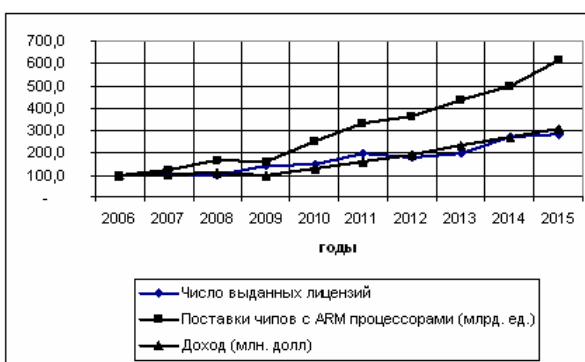


Рис. 2. Динамика ключевых показателей компании ARM (2006=100)

Наряду с перечисленными выше группами фирм, следует отметить небольшое число гигантских интегрированных компаний (англ. integrated device manufacturer (IDM)), играющих ключевую роль в отрасли, которые сами разрабатывают, производят и продают схемы и приборы. К их числу относятся такие крупнейшие компании, как Intel, Samsung, IBM, STMicroelectronics и др.

В последнее время по мере насыщения рынка персональных компьютеров и появления новых сегментов рынка компонентов НРС происходит активизация консолидации и взаимодействий компаний микроэлектронного профиля. Так, Intel приобрел компанию Altera, являющуюся крупнейшим производителем FPGA (Field-Programmable Gate Array – программируемая пользователем вентильная матрица). Японская компания Softbank за 32 млрд. долл. приобрела уже упоминавшуюся компанию ARM Ltd. Совсем недавно, в августе 2016 года, Intel заключил соглашение с ARM о контрактном производстве на свободных мощностях своих современных фабрик чипов архитектуры ARM (как однокристалльных систем SoC, так и для высокопроизводительных приборов). Уже известно, что некоторые из таких чипов будет производить ком-

* URL: <http://www.extremetech.com/extreme/225353-intel-formally-kills-its-tick-tock-approach-to-processor-development>

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

пания LG Electronics на основе технологического процесса 10 нм^{*,**}.

2. Экономико-математический анализ динамических характеристик инвестиционных процессов в ведущих микрoeлектронных компаниях

Исследование динамических характеристик инвестиционных процессов ведущих компаний, работающих в рыночных или квазирыночных условиях, является необходимой стадией прогнозирования. Оно, в частности, полезно также и 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 динамические характеристики процессов как в *интегрированных компаниях* (IDM), так и в тех, которые специализируются на *фабричном (foundry) производстве* пластин и разных видов полупроводниковой продукции.

Так, для компании Intel, относящейся к *первой группе компаний*, и являющейся лидером на рынке микропроцессоров с архитектурой x86, на основе временных рядов за 1997-2015 гг. получена следующая операторная зависимость между объемами производства микропроцессоров x86 Q_{Intel_t} (в млн. ед.) и инвестициями в их производство I_{Intel_t} (в млрд. долл.):

$$Q_{Intel_t} = \frac{\chi_t z}{(z - 0.801)^2} I_{Intel_t}, \text{ где } \chi_t = \begin{cases} 3.627 \text{ npu } t \leq 2009; \\ 1.283 \text{ npu } t > 2009 \end{cases} \quad (1)$$

где z – оператор сдвига: $zx_t = x_{t+1}$ (коэффициент вариации зависимости составляет $v=0.116$). Более низкая отдача от инвестиций после 2009 г. (характеризуется значением параметра χ_t) связана со стабилизацией спроса на персональные компьютеры (PC) и ростом капитальных затрат ввиду перехода на более совершенные и капиталоемкие технологические процессы (32 нм, 22 нм и 14 нм).

Для компании AMD, которая до 2009 г. также относилась к *первой группе компаний*, на основе временных рядов из годовых отчетов за 1997-2009 гг. (см. www.amd.com) получена следующая операторная зависимость между объемами производства микропроцессоров x86 Q_{AMD_t} (в млн. ед.) и инвестициями в основной капитал I_{AMD_t} (в млрд. долл.):

$$Q_{AMD_t} = \frac{15.6z}{(z - 0.494)^2} I_{AMD_t}. \quad (2)$$

* URL: <https://www.hpcwire.com/2016/07/18/briefing-alert-softbank-will-purchase-arm-ltd-32b/?eid=328383118&bid=1475856>.

** URL: <http://www.simmtester.com/page/news/shownews.asp?num=18409>.

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 1% от установившихся, при постоянных уровнях инвестиций. Значения этих показателей составляют соответственно $T_L = 2 * 0.494 / (1 - 0.494) \approx 2$ года и $T_{0.01} = 9$ лет.

Меньшая инерционность связи между исследуемыми показателями в компании AMD (динамика связей характеризуется числами в знаменателях соотношений (1) и (2)) обусловлена тем, что эта компания, являющаяся «вторым источником» производства микропроцессоров x86 для персональных компьютеров архитектуры IBM, значительную часть продукции выпускала по лицензиям компаний Intel^{***}.

Для компании TSMC, относящейся к *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} (в млн. ед.), и инвестициями в основной капитал I_t (в млрд. долл. США):

$$Q_{wt} = 30 * \left[\frac{-0.121(z-1)}{(z-0.545)^2} + \frac{0.152}{z} \right] I_t \quad (3)$$

(коэффициент вариации для этой зависимости составил $v=0.047$).

Из последнего соотношения следует, что при постоянных объемах инвестиций соотношение между объемами производства и инвестиций стабилизировалось бы на уровне $30 * 0.152 = 4.55$ пластин/1000 долл. 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 (3), представляющее собой распределенное запаздывание второго порядка).

3. Прогнозирование динамики показателей рынка микропроцессоров x86 на среднесрочный период

Используемая модель

Построенные зависимости используются далее в качестве составных блоков агрегированных моделей прогнозирования динамики показателей рынка микропроцессоров x86, которые представля-

*** URL: <http://www.amd.com/ru-ru/who-we-are/corporate-information/history>.

ют собой один из вариантов динамической модели рационального поведения участников олигополии в виде линейной динамической игры по Нэшу-Курно [18, 19]. Предполагается, что олигополия состоит из N фирм. Центральным блоком модели является следующая зависимость, связывающая объемы производства Q_{it} со входной переменной u_{it} (производственными инвестициями или вводом мощностей), $i = 1, 2, \dots, N$ – индекс фирмы:

$$Q_{it} = W_i(z) u_{it} + Q_{0it} = \frac{B_i(z)}{A_i(z)} u_{it} + Q_{0it}, \quad (4)$$

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: $zx_t = x_{t+1}$

$$A_i(z) = \sum_{k=0}^n a_{ik} z^k, B_i(z) = \sum_{j=0}^m b_{ij} z^j, m \leq n, \quad (5)$$

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

Другой блок модели – обратная функция спроса. В модели предполагается баланс суммарного

$$\text{спроса } D_t \text{ и предложения } Q_t, \text{ т.е. } D_t = Q_t = \sum_{i=1}^N Q_{it}$$

и линейная зависимость цены на рынке p_t от объема спроса:

$$p_t = a - bD_t = a - bQ_t, \quad (6)$$

где a, b – постоянные параметры.

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

$$J_i = \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t [(p_t - c_i) Q_{it} - q_i u_{it} - \frac{1}{2} \rho_i u_{it}^2] \rightarrow \max_{u_{it}} \quad (7)$$

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; $\frac{1}{2} \rho_i u_{it}^2$ – затраты регулирования

(adjustment cost, см., например, [20], причем $\rho_i > 0$ – коэффициент, характеризующий инвестиционные возможности олигополистов (при прочих равных условиях, чем меньше его величина, тем эти возможности больше), $i = 1, 2, \dots, N$. Управляющими переменными в модели являются вводы мощностей (или инвестиции в основной капитал) u_{it} , $i = 1, 2, \dots, N$.

Оптимальные по Нэшу-Курно стратегии участников рынка

Для проведения прогнозных расчетов на основе модели (4)-(7) могут быть использованы 2 подхода, основанные: на представлении модели в пространстве состояний и использовании обобщенных (generalized, в англоязычной литературе используются также термин coupled) матричных уравнений Риккати (см., например, [21, 22]; на использовании операционного исчисления [18, 19]. Эти подходы взаимно дополняют друг друга.

При использовании первого подхода для расчета как разомкнутых (open-loop), так и замкнутых (feedback или Markov perfect) оптимальных по Нэшу-Курно стратегий следует предварительно представить модель (4)-(7) в эквивалентной форме в пространстве состояний:

$$X_t = AX_{t-1} + \sum_{i=1}^N B_i u_{it} + D \xi_t, \quad (8)$$

$$J_i = \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t \left(\frac{1}{2} X_t' H_i X_t - C_{0i}' X_t - q_{it}' u_{it} - \frac{1}{2} \rho_i u_{it}^2 \right) \rightarrow \max_{u_{it}} \quad (9)$$

где матрицы и векторы $A, B_i, D, H_i, C_{0i}, q_{it}, X_t, \xi_t, i = 1, 2, \dots, N$ связаны с параметрами и переменными исходной модели. Получаемые оптимальные стратегии участников олигополии u_{it} линейно связаны с вектором состояния системы (8):

$$u_{it} = K_{it} X_{t-1} + \eta_{it}, \quad (10)$$

в котором K_{it} и η_{it} – векторы, зависящие от решений обобщенных уравнений Риккати (Basar and Olsder, 1995).

При определении оптимальных разомкнутых (open-loop) игровых стратегий олигополистов с критерием (7), более наглядным и удобным для экономического анализа является второй подход, основанный на использовании операционного исчисления (широко распространенного при исследовании дискретных систем управления и в теории связи Z-преобразования, см., например, [23, 24]) и нахождении экстремума функционалов в гильбертовом пространстве (см. [18, 19]). Используя предложенный метод, из необходимого условия экстремума функционала (7) можно получить формулы для расчета оптимального управления u_{it} (производственных инвестиций и др.) и объемов производства Q_{it} i -го олигополиста, максимизирующего критерий NPV с учетом затрат регулирования [19]:

$$Q_{it} = W_i(z) u_{it} = \frac{\Gamma_i(z, (\beta z)^{-1})}{b} (p_t - PL_i - bQ_{0it}), \quad (11)$$

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

$$\Gamma_i [z, (\beta z)^{-1}] = \frac{bW_i(z)W_i((\beta z)^{-1})}{\rho_i + bW_i(z)W_i((\beta z)^{-1})}, \quad (12)$$

$$i = 1, 2, \dots, N;$$

$$p_i = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^N \Gamma_i [z, (\beta z)^{-1}]} \{a + \sum_{i=1}^N \Gamma_i [z, (\beta z)^{-1}] (PL_i + bQ_{0i})\}. \quad (13)$$

Для получения выражений, характеризующих динамику рассматриваемых показателей во временной области, необходимо провести факторизацию правых частей выражений (12)-(13). Факторизация многочленов может быть проведена, например, в среде MATLAB с использованием процедур поиска корней полиномов, а также процедур формирования соединений систем, реализованных в Control Systems Toolbox (таких, в частности, как series(.), parallel(.), feedback(.) и др. При невысоком порядке передаточной функции $W_i(z)$ такие расчеты могут быть также проведены с использованием нашедших широкое распространение электронных таблиц [25].

Используя свойства Z-преобразования, можно при постоянных PL_i , основываясь на (12)-(13), оценить установившиеся уровни производства участников рынка $Q_{i\infty}$ [19]:

$$Q_{i\infty} = \frac{\Gamma_i(1, (1+r))}{b} (p_\infty - PL_i), \quad (11a)$$

цены $p_\infty = a - b \sum_{i=1}^N Q_{i\infty}$, рыночных долей фирм

$MS_i(\infty)$, а также других показателей. Из (12), (13), (11a) следует, что объемы производства и рыночная доля фирм тем выше, чем меньше их лимитирующие затраты PL_i и коэффициенты ρ_i , характеризующие их инвестиционные возможности (их значение влияет на величину $\Gamma_i(1, 1+r)$). Последнее соотношение может быть использовано при оценке значений коэффициентов ρ_i , при которых достигаются желаемые (целевые) установившиеся уровни производства участников рынка $Q_{i\infty}$. Так, очевидно:

$$\rho_i = \left[\frac{(p_\infty - PL_i)}{Q_{i\infty}} - b \right] W_i(1)W_i(1+r) = (\delta_i - 1) b W_i(1)W_i(1+r), \quad (14)$$

где $\delta_i = \frac{(p_\infty - PL_i)}{bQ_{i\infty}}$ – характеристика инвестиционных ограничений i -й фирмы (в статической модели Курно, в которой отсутствуют такие ограничения, $\delta_i = 1$) $i = 1, 2, \dots, N$.

После нахождения коэффициентов ρ_i может быть рассчитана динамика объемов производства олигополистов Q_{it} , цены и другие рыночные показате-

телей. С другой стороны, на основе соотношения (14) можно приближенно оценить фактические значения коэффициентов ρ_i . Для этого следует заменить $Q_{i\infty}$ и p_∞ на среднегодовые значения этих показателей за представительный период: $Q_{i\text{avg}}$ и p_{avg} .

Прогнозные сценарии динамики показателей рынка микропроцессоров x86

Как известно, рынок микропроцессоров архитектуры x86 представляет собой дуополию, участниками которой являются компании Intel и AMD с рыночными долями соответственно свыше 80% и менее 20 % поставок и продаж. В связи с этим, сценарии развития данного рынка могут быть построены путем решения игровой задачи (4)-(7) при разных гипотезах изменения параметров моделей.

В настоящей работе в качестве блоков, описывающих связи между производственными инвестициями и объемами производства микропроцессоров в компаниях использованы несколько измененные зависимости (1) и (2). Так, в расчетах принято, что значение χ_i в зависимости (1) равно среднеарифметическому полученных значений до и после 2009 г., т.е. $\chi_i = (3,627 + 1,283)/2 = 2,455$, а соответствующий коэффициент для компании AMD составляет $15,6 * (3,627/2,455) = 3,068$ (последнее изменение связано с тем, что идентификация зависимости (2) осуществлялась на основе данных до 2009 г.). Несмотря на то, что с 2009 г. чипы с микропроцессорами для компании AMD производятся в основном на фабриках компании Global Foundries, динамика связи между производственными инвестициями в развитие фабрик и объемами производства микропроцессоров в компании AMD может, по нашему мнению, сохраниться и в среднесрочной перспективе.

В результате эконометрического анализа обратной функции спроса (6) с начала 2000-х гг. до 2014 г. (исследовалось 5 линейных регрессионных зависимостей для 5 периодов времени) получены стабильные значения параметров a и b с высокими значениями t -статистик (для параметра $a = 7-10$, а для параметра $b = 2-3$) при приемлемых значениях коэффициента детерминации R^2 (порядка 0,5). В итоге в расчетах в качестве базовой была использована следующая обратная функция спроса на микропроцессоры архитектуры x86 (включая микропроцессоры для настольных персональных компьютеров, ноутбуков и серверов):

$$p_t = 180.285 - 0.159 Q_{total t}, \quad (15)$$

$$(23.699) \quad (0.081)$$

где $Q_{total t} = Q_{Intel t} + Q_{AMD t}$ – суммарный объем поставок микропроцессоров архитектуры x-86 в млн.

ед., p_t – средняя цена микропроцессоров компании Intel в долл/ед (здесь и далее в скобках приведены среднеквадратические оценки ошибок параметров). Средняя цена микропроцессоров компании AMD составляет примерно 0,6 от соответствующего показателя компании Intel (по нашим оценкам эта величина составляла в 2010-2014 гг. 0,584).

Основными потребителями микропроцессоров x86 являются производители персональных компьютеров, которые в последние годы испытывают стабилизацию (с 2010 по 2012 гг.) и даже падение спроса на PC (с 2013 г.). По мнению аналитиков, причины наметившейся тенденции состоят в том, что возможности персональных компьютеров с последними поколениями микропроцессоров x86 превосходят потребности большинства потребителей, которых вполне устраивают возможности эксплуатируемых компьютеров и мобильных устройств (смартфонов и планшетов). Другой фактор обусловлен ухудшением общеэкономической ситуации в мире. В связи с этими факторами за последние годы произошло увеличение продолжительности эксплуатации PC, что в итоге отразилось на спросе как на них самих, так и на комплектующие для них **,.

Ввиду отсутствия надежных данных о наличном парке PC, при формировании сценариев изменения показателей рынка микропроцессоров x86 приходится задаваться гипотезами о тех или иных изменениях параметров обратной функции спроса (15). В настоящей работе в результате решения игровой задачи (4)-(7) построены разомкнутые (open-loop) оптимальные по Нэшу-Курно стратегии участников дуополии при разных значениях параметров функции спроса ($a=160,2; 170,2; 180,2; b=0,149; 0,159; 0,169; 0,179$) и соответствующие им ключевые показатели рынка микропроцессоров x86. Результаты расчетов приведены на рис. 3–5.

Для большинства сценариев проведенные расчеты показывают стабилизацию или уменьшение объемов суммарного производства рассматриваемых процессоров $Q_{total t}$ (максимальное уменьшение может составить около 15% к 2021 г. относительно 2015 г.). При уменьшении параметра b до уровня 0,149 возможен рост производства микропроцессоров относительно 2015 г. на 10%, а к 2025 г. – на 14%. Такой сценарий может произойти, в частности, в случае более интенсивного, чем в настоящее время, выбытия эксплуатируемых компьютеров, и при улучшении общемировой экономической ситуации (рис. 3).

Средняя цена микропроцессоров x86 p_t при всех сценариях будет ниже, чем в 2015 г., а рыноч-

ная доля компаний AMD в большинстве сценариев может быть несколько выше, чем в базовом 2015 г. (рис. 4–5).

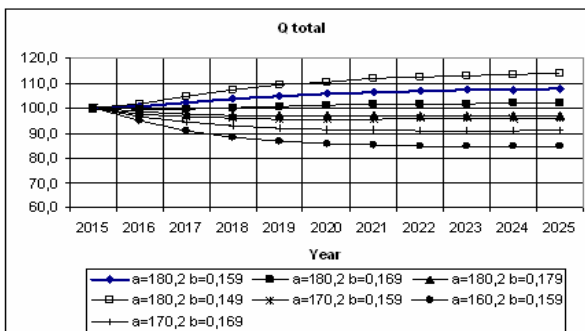


Рис. 3. Динамика суммарных объемов производства микропроцессоров x86 $Q_{total t}$ при разных значениях параметров обратной функции спроса (2015=100)



Рис. 4. Динамика средней цены микропроцессоров x86 p_t при разных значениях параметров обратной функции спроса (2015=100)

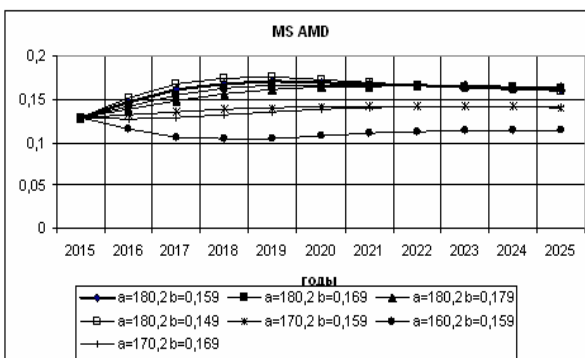


Рис. 5. Динамика рыночной доли (MS) компании AMD в производстве микропроцессоров x86 при разных значениях параметров обратной функции спроса (2015=100)

* URL: <http://femstrategy.com/2012/12/21/the-end-of-x86-an-update/>
 ** URL: <https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS40909316>

В связи с насыщением рынка персональных компьютеров, ведущие производители микропроцессоров переключаются на выпуск более перспективной продукции, с которой связываются повышенные темпы роста спроса. Такими видами продукции для Intel, уже объявившим о предстоящих сокращениях персонала на 11%, являются, в частности, микропроцессоры и другие чипы для серверов (для центров обработки данных – ЦОД), для Интернета вещей (IoT), для робототехнических устройств. Эти направления уже сейчас обеспечивают почти 40% доходов и более 70% операционной прибыли компании*. Следует отметить и то, что, если средняя цена производимого в компании Intel микропроцессора x86 составляет порядка 140 долл, то средняя цена микропроцессора для серверов – свыше 600 долл. Цена на наиболее мощные многоядерные микропроцессоры этой компании (например, на 18-ядерный процессор Intel Xeon E7-8890 v3) превышает в настоящее время 7000 долл.** В связи с наличием такой разницы, все больше компаний стремится выйти на высококоротельный и быстрорастущий рынок микропроцессоров для серверов.

4. Исследование перспективной структуры рынка микропроцессоров для серверов (с архитектурой x-86 и ARM)

В настоящее время в производимых серверах используются микропроцессоры с архитектурой x86 и RISC. Доля первого типа серверов в объеме продаж (в млрд. долл) составляет 70%, а в объеме поставок (в млн. ед.) приближается к 90%. В последнее время главный производитель микропроцессоров с архитектурой x86, компания Intel (на нее приходится 99% поставок процессоров рассматриваемого класса, причем практически все они относятся к серии Intel Xeon), начинает испытывать конкуренцию с выходящими на рынок серверов производителями микропроцессоров с архитектурой ARM (она также представляет разновидность архитектуры RISC).

По мнению специалистов, процессоры с архитектурой ARM в перспективе могут обеспечить большую экономичность за счет существенно меньшей энергоемкости, что подтверждается стремительным распространением и практически полной монополизацией микропроцессорами с архитектурой ARM рынка мобильных устройств. По некоторым оценкам, в 2020 г. доля серверов,

оснащенных микропроцессорами с этой архитектурой, в общем производстве микропроцессоров x86+ARM может достигнуть 20–25% (<http://www.computerworld.in/news/intel-faces-challenge-server-market-new-arm-chips>). Однако по мнению аналитиков массовое производство такой продукции компаниями-лицензиарами ARM-архитектуры начнется в 2017–2018 гг. (табл. 1).

Появление серверов с ARM-архитектурой приветствуется провайдерами Интернета и облачных сервисов, а также в финансовом секторе (финансовый гигант Morgan Stanley остался удовлетворенным результатами тестирования сервера с ARM-микропроцессором X-Gene компании AppliedMicro). Этот сегмент потребителей заинтересован в снижении зависимости от одного монополиста микропроцессоров x86***.

К грядущим изменениям на рассматриваемом рынке серьезно готовится и Intel. Так, компанией ведутся работы по созданию гибридного чипа, состоящего из микропроцессора Xeon и FPGA. По результатам исследований в компаниях Intel и Google, использование FPGA в качестве ускорителя оказывается эффективнее, чем графического процессора Tesla 20 GPU компании Nvidia с точки зрения, как быстродействия, так и энергоэффективности. В Intel считают, что к 2020 г. до 1/3 провайдеров облачных сервисов будет использовать такие гибридные чипы****.

С целью исследования сценариев развития рынка в настоящей работе на основе данных компаний IDC и Gartner построена следующая обратная функция спроса на микропроцессоры для серверов архитектуры x86:

$$p_t = \frac{697.684}{(168.787)} + \frac{24.087}{(4.888)} R \& D_t - \frac{16.351}{(8.859)} Q_{x86t},$$

$$R^2 = 0.802, \quad (16)$$

где Q_{x86t} – объем поставок микропроцессоров архитектуры x-86 для серверов в млн. ед., p_t – средняя цена этих микропроцессоров в долл/ед, $R \& D_t$ – объем исследований и разработок в компании Intel в млрд. долл.

Прогнозный уровень исследований и разработок в компании Intel рассчитывался на основе следующей экономико-статистической зависимости, связывающей $R \& D_t$ в млн. долл с минимальным топологическим размером интегральных схем $hp_{\min t}$:

*** URL: <http://www.computerworld.com/article/3005264/computer-processors/morgan-stanley-kicks-tires-on-arm-servers-wants-a-rival-for-intel.html>

**** URL: <http://www.nextplatform.com/2015/07/29/why-hyperscalers-and-clouds-are-pushing-intel-into-fpgas/>

* URL: <http://www.nextplatform.com/2015/07/20/intel-slows-moores-law-pace-as-enterprise-spending-tightens/>

** Источник: Intel® Processor PricingEffective June 20, 2016

Таблица 1

Некоторые разработчики и возможные производители серверных микропроцессоров архитектуры ARM *)

Компания-лицензиар ARM-архитектуры	Микропроцессор	Возможный производитель чипов, техпроцесс	Год начала производства
Applied Micro	X-Genе 3	TSMC, 16 nm FinFET	Конец 2016
Cavium	ThunderX2	Global Foundries, 14 nm FinFET	Первая половина 2017 г.
Qualcomm	QCOM	Samsung, 14 nm process	Не ранее 2017 г.
AMD	K-12	Н.Д.	2017
Applied Micro	X-Genе 3	TSMC, 16 nm FinFET	Конец 2016

*) Составлено на основе данных в: <http://seekingalpha.com/article/3983132-intel-arm-servers-renew-attack>

$$R\&D_t = 0,939RD_{t-1} - 703,388 \text{Log}(hp_{\min t}) + 3670,668$$

$$(0,140) \quad (466,301) \quad (2547,951)$$

$$R^2 = 0.953, \quad (17)$$

причем перспективные значения показателя $hp_{\min t}$ брались из дорожных карт компании.

При проведении расчетов предполагалось, что рынок микропроцессоров архитектуры x86 и ARM для серверов представляет собой олигополию, участниками которой являются с одной стороны компания Intel (практически все производство микропроцессоров архитектуры x86 будет сосредоточено на ее фабриках), а с другой стороны – компании, выпускающие микропроцессоры архитектуры ARM.

Предполагалось, что аргументами обратной функции спроса (16), наряду с $R\&D_t$, являются $Q_{\text{total } t} = Q_{1t} + Q_{2t}$, где индекс 1 относится к компаниям, производящими микропроцессоры архитектуры ARM, а индекс 2 – к компании Intel, производящей микропроцессоры архитектуры x86.

Кроме того, предполагалось, что технологический уровень оборудования компаний, выпускающих микропроцессоры архитектуры ARM одинаков. Операторные зависимости между инвестициями в производство микропроцессоров для серверов I_{it} (в млрд. долл) и объемами производства микропроцессоров для серверов двух типов Q_{it} (в млн. ед.), а также удельные затраты на производство микропроцессоров для базового варианта (в долл) приведены в табл. 2.

На рис. 6 представлена динамика объемов производства микропроцессоров для серверов архитектуры ARM Q_{1t} и x86 Q_{2t} в базовом сценарии для случая дуополии. При этом сценарии в 2020 г. объем производства микропроцессоров архитектуры ARM превысит 5 млн. ед., а архитектуры x86 – 25 млн. ед.

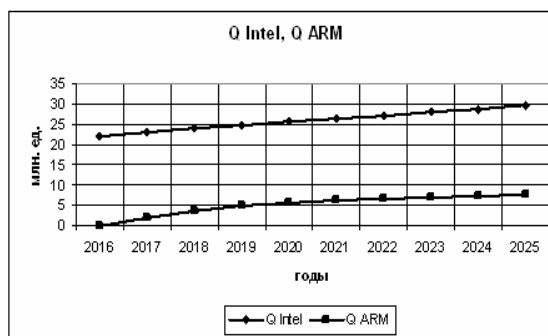


Рис. 6. Динамика объемов производства микропроцессоров для серверов архитектуры ARM Q_{1t} и x86 Q_{2t} в базовом сценарии

Для случая дуополии рассматривались возможные в перспективе варианты структуры рынка, соответствующие различным величинам соотношений между удельными операционными затратами

$$\eta_c = \frac{c_1}{c_2}$$

компаний, характеризующими инвестиционные воз-

$$можности компаний \eta_p = \frac{\rho_1}{\rho_2}$$

можности компаний. Некоторые результаты расчетов, проведенных на основе модели (4)-(7) с использованием расширенных уравнений Риккати, приведены на рис. 7, 8.

На рис. 7 представлены варианты динамики рыночной доли MS_{1t} микропроцессоров архитектуры ARM при величинах соотношений между удельными операционными затратами компаний η_c , равных 1.0, 1.25, 1.5, 0.75, и 0.50 (при этом $\eta_p = 1$), а на рис. 8 – при величинах соотношений между коэффициентами η_p , равных 1.0, 2.0, 1.5, 0.75, 0.5. При базовом сценарии рыночная доля MS_{1t} микропроцессоров архитектуры ARM приблизится до 20% в 2021 г. Расчеты показывают,

Таблица 2

Показатели компаний для базового сценария

Микропроцессоры	Передаточная функция	Удельные затраты на производство микропроцессора, c_1, c_2 , долл	Коэффициенты при затратах регулирования ρ_1, ρ_2
Производители микропроцессоров архитектуры ARM	$Q_{it} = \frac{3.068z}{(z - 0.494)^2} I_{it}$	160	6299 ¹⁾
Intel	$Q_{2t} = \frac{0.569z}{(z - 0.822)^2} I_{2t}$	160	363 ²⁾

¹⁾ рассчитано в соответствии с (14) при среднегодовом значении δ для компании AMD на рынке микропроцессоров

²⁾ рассчитано в соответствии с (14) на основе среднегодовых данных на рынке серверных микропроцессоров.

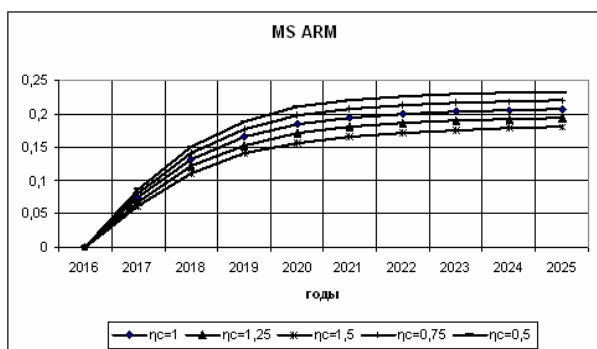


Рис. 7. Динамика рыночной доли MS_{it} микропроцессоров для серверов архитектуры ARM при различной величине соотношений между удельными операционными затратами компаний η_c (при условии $\eta_p = 1$)

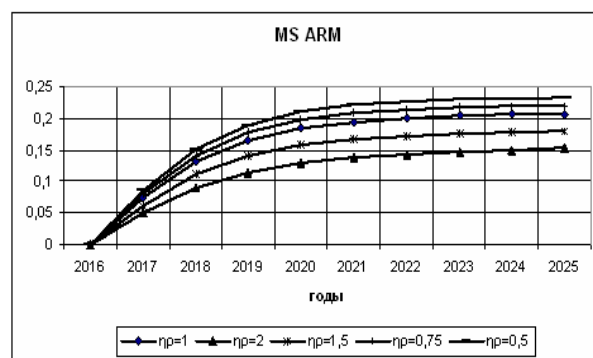


Рис. 8. Динамика рыночной доли MS_{it} микропроцессоров для серверов архитектуры ARM при различной величине соотношений между коэффициентами η_p (при условии $\eta_c = 1$).

что структура рассматриваемого рынка в перспективе несколько более чувствительна к изменениям величин соотношений между коэффициентами, характеризующими инвестиционные возможности

компаний $\eta_p = \frac{\rho_1}{\rho_2}$, чем к изменениям величин η_c (см. рис. 7, 8).

Кроме того, исследовалось также влияние числа новых компаний, производящих микропроцессоры архитектуры ARM, на показатели рынка. При этом рассматривалось 2 случая: инвестиционные возможности каждой из N_1 этих компаний такие же, как и в случае дуополии в базовом сценарии ($\rho_{it} = \rho_1 = 6299$): суммарные инвестиционные возможности всех этих компаний такие же, как и для одной компании в случае дуополии в базовом сценарии (т.е. $\rho_{it} = \rho_1 = 6299 * N_1$): На рис. 9, 10

представлена динамика рыночной доли MS_{it} серверных микропроцессоров архитектуры ARM для тех двух случаев при числе новых компаний-производителей микропроцессоров ARM, равном 1, 2, 4, 8. По нашим расчетам, расширение числа новых компаний, обладающих значительными инвестиционными возможностями, до 4 и 8, позволило бы уже к 2020 г. повысить рыночную долю микропроцессоров ARM до 45 и 55% (рис. 9). При скромных инвестиционных возможностях новых компаний расширение их числа приведет к незначительному эффекту (рис. 10). Однако главное условие успешного закрепления на рассматриваемом рынке микропроцессоров архитектуры ARM связано с успешным технологическим прорывом, который может быть осуществлен при решении множества проблем в области программного обеспечения и формирования новой экосистемы (software ecosystem).

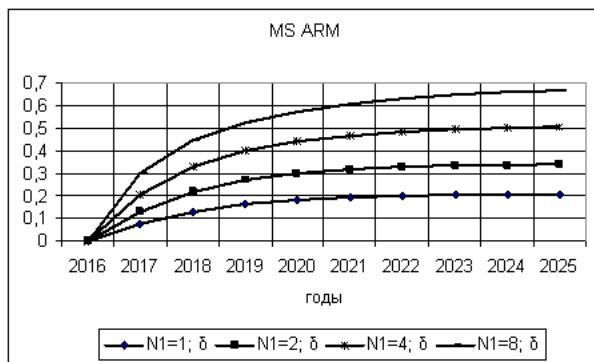


Рис. 9. Динамика рыночной доли MS_{it} микропроцессоров для серверов архитектуры ARM при значительных инвестиционных возможностях каждой из новых компаний при разном их числе N_1

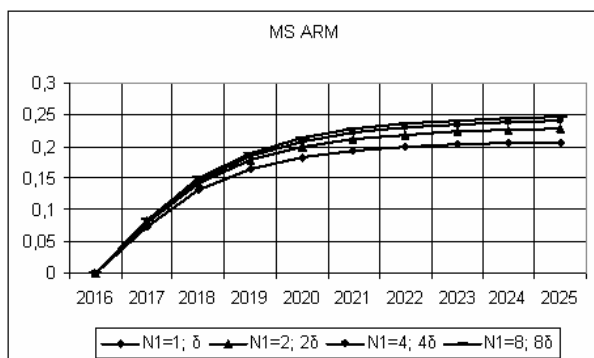


Рис. 10. Динамика рыночной доли MS_{it} микропроцессоров для серверов архитектуры ARM при скромных инвестиционных возможностях каждой из новых компаний при разном их числе N_1

Заключение

Рассмотренные в статье эконометрические модели позволяют провести содержательный анализ инвестиционных процессов на рынках микроэлектронной продукции. Они создают основу для формирования прогнозных сценариев развития рынков микропроцессоров на среднесрочную перспективу в рамках игрового подхода.

Анализ построенных сценариев свидетельствует о реальности достижения целей компании ARM Ltd. на рынке микропроцессоров для серверов. В то же время на рынке микропроцессоров x86 для PC, по видимому, не произойдет серьезных структурных сдвигов и изменений объемных показателей.

Разработанные методы и модели могут быть использованы при формировании предложений по созданию структуры отечественного рынка продукции элементной базы НРС-систем, а также по

государственной политике стимулирования инвестиционной деятельности в высокотехнологических отраслях.

Литература

1. Варшавский Л.Е. Исследование динамики показателей рынков наукоемкой продукции (на примере рынков компонентов персональных компьютеров) // Экономика и математические методы. 2004. Том 40. №1. С. 101–116.
2. Aizcorbe A. and Kortum S. Moores Law and the Semiconductor Industry: A Vintage Model/ Scandinavian Journal of Economics, 2005.– Volume 107.–Issue 4.–pp. 603–630.
3. Pillai U. A Model of Technological Progress in the Microprocessor Industry// The Journal Of Industrial Economics, 2010.– Vol.LXI.–No. 4.– pp. 877–912.
4. Goettler R. L., and Gordon, B. R. Does AMD Spur Intel to Innovate More?// Journal of Political Economy, 2011.– Vol. 119.–No. 6.– pp. 1141–1200.
5. Macieira J. Extending the Frontier: A Structural Model of Investment and Technological Competition in the Supercomputer Industry. 2008. URL: ftp://repec.econ.vt.edu/Papers/Macieiria/macieira_superc_jan22.pdf.
6. Macieira J. A Dynamic Model of Innovation and Technological Competition in the Supercomputer Industry. 2009. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.517.9875&rep=rep1&type=pdf>
7. Малашевич Б.М., Малашевич Д.Б. Микроэлектроника. Краткие основы и история развития// Базовые лекции по электронике. Том II. Твердотельная электроника/Под общ. ред. В.М.Пролейко. М.: Техносфера.– 2009, с. 96–170.
8. Kvamme E.F. Life in Silicon Valley: A first-hand view of the region growth/The Silicon Valley Edge: a habitat for innovation and entrepreneurship/ed. By Chong-Moon Lee et al. Stanford University Press. Stanford. 2000. pp. 59–80.
9. Lecuyer C. Fairchild Semiconductor and its influence/The Silicon Valley Edge: a habitat for innovation and entrepreneurship/ed. By Chong-Moon Lee et al. Stanford University Press. Stanford. 2000. pp.158–183.
10. Гроув А. Выживают только параноики. М.: Альпина Бизнес Букс. 2004. 200 С.
11. Gordon Moore. Progress in Digital Integrated Electronics. http://download.intel.com/museum/Moores_Law/Articles-Press_Releases/Gordon_Moore_1975_Speech.pdf

12. *Dennard R. H., Gaensslen F. H., Yu H-N, Rideout V.I., Bassous E., and LeBlanc A. R.*, Design of ion-implanted MOSFET's with very small physical dimensions// IEEE Journal of Solid-State Circuits. 1974. SC-9, pp. 256–268.
13. *Варшавский Л.Е.* Проблемы повышения энергоэффективности аппаратных средств в области информационных технологий//Труды ИСА РАН. 2013. Т. 63. Вып. 3. С. 3–19.
14. *Митропольский Ю.И.* Элементная база и архитектура будущих суперкомпьютеров// Микроэлектроника. 2015. Том 44. №3. С. 163–179.
15. *Щука А.А.* Нанoeлектроника. М.: Физматкнига. 2007.
16. *Рудометов Е.* Материнские платы и чипсеты. 4-е изд. Анатомия ПК. СПб.: Питер. 2007. 368 С.
17. *Perry T.S. Morris Chang: Foundry Father.* URL: //http://spectrum.ieee.org/at-work/tech-careers/morris-chang-foundry-father.
18. *Варшавский Л.Е.* Приближенные методы исследования динамики показателей рыночной структуры//Компьютерные исследования и моделирование. 2012. Т. 4, №1. С. 219-229.
19. *Варшавский Л.Е.* Использование методов теории управления для формирования рыночных структур // Компьютерные исследования и моделирование 2014. Т. 6. № 5. С. 839-859.
20. *Gordon S.* Costs of Adjustment, the Aggregation problem and Investment// The Review of Economics and Statistics. 1992. Vol.74. No3. P. 422–429.
21. *Basar T., Olsder G.J.* Dynamic Noncooperative Game Theory. – London/New York: Academic Press. – 1995.
22. *Dockner E.J., Jorgenson S. et. al.* Differential Games in Economics and Management Science. – Cambridge: Cambridge University Press. – 2000.
23. *Кузин Л.Т.* Расчет и проектирование дискретных систем управления. М.: Машгиз, 1962.
24. *Jury E.I.* Theory and Applications of the Z-Transform Method. John Wiley, NY, 1964.
25. *Варшавский Л.Е.* Методы расчета оптимальных по Нэшу стратегий участников динамических игр на основе электронных таблиц //Анализ и моделирование экономических и социальных процессов / Математика. Компьютер. Образование: Сб. научных трудов. Выпуск 22. №3.–М. Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2015. С. 84–96.

Варшавский Леонид Евгеньевич. Заведующий лабораторией ИСА ФИЦ ИУ РАН. Главный научный сотрудник ЦЭМИ РАН. Д.э.н. Окончил МИФИ в 1970 г. Количество печатных работ: 120. Область научных интересов: математическое моделирование рыночных процессов и прогнозирование показателей рынков высокотехнологичной и капиталоемкой продукции, математическое моделирование инвестиционных и инновационных стратегий промышленных фирм, математическое моделирование макроэкономических процессов, методы управления динамическими системами, экономика науки. E– mail: hodvar@mail.ru

Modeling dynamics of key market indicators of components of hpc systems

L.E. Varshavsky

Abstract. Techno-economic analysis of market of high performance computing (HPC) systems components is carried out. Economic modeling dynamic processes in the leading microelectronic companies-manufactures of microprocessors and microschemes are constructed. With the help of the approach based on dynamical games, scenarios of change of key indicators of the market of x86 and ARM microprocessors over the middle-range perios are studied.

Keywords: HPC, microelectronics, microprocessor, server, economic modeling, scenarios.

References

1. *Varshavskii L.E.* Issledovanie dinamiki pokazatelej rynkov naukoemkoj produkcii (na primere rynkov komponentov personal'nyh komp'yutero) [Studying dynamics of market indicators of science-intensive products (the case of markets of PC components)] *Jekonomika i matematicheskie metody=*Economics and mathematical methods. 2004, vol. 40, no 1, pp. 101–116.
2. *Aizcorbe, A. and Kortum, S.* Moores Law and the Semiconductor Industry: A Vintage Model/ *Scandinavian Journal of Economics*, 2005.– Volume 107.–Issue 4.–pp. 603–630.
3. *Pillai U.* A Model of Technological Progress in the Microprocessor Industry// *The Journal Of Industrial Economics*, 2010.– Vol.LXI.–No. 4.– pp. 877–912.
4. *Goettler, R. L., and Gordon, B. R.* Does AMD Spur Intel to Innovate More?// *Journal of Political Economy*, 2011.– Vol. 119.–No. 6.– pp. 1141–1200.
5. *Macieira J.* Extending the Frontier: A Structural Model of Investment and Technological Competition in the Supercomputer Industry. 2008. Available at: ftp://repec.econ.vt.edu/Papers/Macieira/macieira_superc_jan22.pdf/(accessed April 17, 2011).
6. *Macieira J.* A Dynamic Model of Innovation and Technological Competition in the Supercomputer Industry. 2009. Available at: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.517.9875&rep=rep1&type=pdf>/(accessed April 17, 2011).
7. *Malashevich B.M., Malashevich D.B.* Mikroelektronika. Kratkie osnovy i istoriya razvitiya// *Bazovye lektsii po elektronike. Tom II. Tverdotel'naya elektronika* [Foundations and History of Development //Basic Lectures on Electronics. Vol. II. Solidstate Electronics] /Pod obshch. red. V.M.Proleiko. Moscow: Tekhnosfera, 2009, pp. 96–170.
8. *Kvamme E.F.* Life in Silicon Valley: A first-hand view of the region growth/*The Silicon Valley Edge: a habitat for innovation and entrepreneurship*/ed. By Chong-Moon Lee et al. Stanford University Press. Stanford. 2000. pp. 59–80.
9. *Lecuyer C.* Fairchild Semiconductor and its influence/*The Silicon Valley Edge: a habitat for innovation and entrepreneurship*/ed. By Chong-Moon Lee et al. Stanford University Press. Stanford. 2000. pp.158–183.
10. *Grouv A.* Vyzhivayut tol'ko paranoiiki [Only the Paranoid Survive]. Moscow: Al'pina Biznes Buks, 2004, 200 p.
11. *Gordon Moore.* Progress in Digital Integrated Electronics. Available at: http://download.intel.com/museum/Moores_Law/Articles-Press_Releases/Gordon_Moore_1975_Speech.pdf/ (accessed February 7, 2015).
12. *Dennard R. H., Gaensslen F. H., Yu H-N, Rideout V.I., Bassous E., and LeBlanc A. R.,* Design of ion-implanted MOSFET's with very small physical dimensions// *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. 1974. SC-9, pp. 256–268.
13. *Varshavskii L.E.* Problemy povysheniya energoeffektivnosti apparatnykh sredstv v oblasti informatsionnykh tekhnologii [Problems of Energy Efficiency Increase of Information Technologies Equipment Infrastructure]. *Trudy ISA RAN=Proceedings of ISA RAS*, 2013, vol. 63, no. 3, pp. 3-19.
14. *Mitropol'skij Ju.I.* Jelementnaja baza i arhitektura budushhih superkomp'yutero [The element base and architecture of future supercomputers]. *Mik rojelektronika=Microelectronics*. 2015, vol 44, no 3, pp. 163–179.
15. *Shchuka A.A.* *Nanoelektronika* [Nanoelectronics]. Moscow, Fizmatkniga, 2007.
16. *Rudometov E.* Materinskie platy i chipsety. 4-e izd. *Anatomiya PK* [Motherboards and Chipsets. 4th ed. *Anatomy of PC*]. Sankt-Peterburg, Piter, 2007, 368 pp.
17. *Perry T.S.* Morris Chang: Foundry Father. Available at: <http://spectrum.ieee.org/at-work/tech-careers/morris-chang-foundry-father> / (accessed 19 Apr 2011).

18. *Varshavskii L.E.* Priblizhennye metody issledovaniya dinamiki pokazatelej rynochnoj struktury [Approximate Methods of Studying Dynamics of Market Structure]. *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie= Computer Research and Modeling*, 2012. vol. 4, no 1. pp.219-229.
19. *Varshavskii L.E.* Ispol'zovanie metodov teorii upravleniya dlya formirovaniya rynochnykh struktur [Control theory methods for creating market structures]. *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie= Computer Research and Modeling*, 2014, vol. 6, no. 5, pp. 839–859.
20. *Gordon S.* Costs of Adjustment, the Aggregation problem and Investment// *The Review of Economics and Statistics*. 1992. Vol.74. No3. P. 422–429.
21. *Basar T., Olsder G.J.* *Dynamic Noncooperative Game Theory*. – London/New York: Academic Press. – 1995.
22. *Dockner E.J., Jorgenson S.* et. al. *Differential Games in Economics and Management Science*. – Cambridge: Cambridge University Press. – 2000.
23. *Kuzin L.T.* *Raschet i proektirovanie diskretnykh sistem upravleniya [Projecting Discrete Control Systems]*. Moscow: Mashgiz, 1962.
24. *Jury E.I.* *Theory and Applications of the Z-Transform Method*. John Wiley, NY, 1964.
25. *Varshavskii L.E.* *Metody rascheta optimal'nyh po Njeshu strategij uchastnikov dinamicheskikh igr na osnove jelektronnyh tablic [Methods of computing optimal Nash strategies in dynamical with the help of spreadsheets]. Analiz i modelirovanie jekonomicheskikh i social'nyh processov /Matematika. Komp'yuter. Obrazovanie: Sb. nauchnyh trudov. Vypusk 22. №3. M. – Izhevsk: Institut komp'yuternykh issledovaniy, 2015. pp. 84–96.*

Varshavsky Leonid. Head of the laboratory of the ISA RAS, chief scientist of the CEMI RAS. Graduated from MEPhi in 1970. Author of 120 articles and monographs. Fields of scientific interests: mathematical modeling of market processes and forecasting market indicators of high technology and capital intensive products, mathematical modeling of investment and innovative strategies of firms, mathematical modeling of macroeconomic processes, methods of control theory, economics of science. E– mail: hodvar@mail.ru