УДК 004.05 URL: https://ptsj.bmstu.ru/catalog/icec/inf_tech/1128.html

УРОВНИ АБСТРАКЦИИ В ЭЛЕКТРОННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

С.Е. Матушин matushinse@student.bmstu.ru
Е.В. Глинская glinskaya@bmstu.ru
SPIN-код: 5430-3023

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

В статье представлены информационные вычислительные системы и отмечены их особенности при проектировании на разных уровнях иерархической модели уровней абстракции — от физического до программного. Подробно описаны задачи каждого уровня и приведены примеры. Продемонстрировано распределение компетенций среди различных специалистов, рассмотрено взаимное влияние смежных уровней (например, взаимосвязь свойств электронных компонентов на аналоговом уровне и быстродействия логических схем), а также влияние согласования уровней модели на архитектурные решения. Показано, что максимальная эффективность всей системы достигается только при качественной и глубокой проработке (исследованиях и новых разработках) на всех ее уровнях.

Ключевые слова: уровни абстракции, вычислительная техника, электронные вычислительные системы, электроника, архитектура компьютера, КМОП-логика

Введение. Все системы (в том числе ЭВМ и компьютеры, которые и будут рассмотрены далее в качестве примеров) построены из блоков, модулей, которые, в свою очередь, также являются системами и состоят из каких-то элементов. На этом принципе основано разделение разработки электронных вычислительных систем (и не только их) по уровням абстракции: от разработки структуры программы и написания кода до проектирования схемы логического элемента и разработки более эффективного транзистора. С различными уровнями абстракций работают разные специалисты. Разработчик операционных систем не разрабатывает аналоговые устройства и транзисторы — это неэффективно: с компьютерными системами взаимодействуют математики, инженеры-электроники, программисты, с аналоговыми элементами — химики и физики. Обычно выделают следующие уровни: физический (самый низкий), уровень электронных компонентов, аналоговый, цифровой, логический, микроархитектурный, архитектурный уровни, уровень операционных систем и программный уровень [1]. Рассмотрим каждый из уровней абстракции (некоторые, как микроархитектурный и архитектурный, рассмотрим вместе),

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2026 ISSN 2541-8009

опишем задачи этих уровней относительно разработки электронных вычислительных систем и приведем примеры.

Физический уровень и уровень электронных компонентов. Физический уровень — самый низкий в проектировании вычислительных систем. В основном, на нем работают физики и химики над разработкой более эффективных, компактных, лучших по другим характеристикам компонентов. Именно достижения ученых и инженеров на физическом уровне обеспечивают рост эффективности компонентов электронных систем. Самые очевидные примеры — открытие p-перехода, благодаря которому были изобретены диоды и транзисторы — биполярные и полевые; изобретение интегральных микросхем; благодаря этим достижениям современные электронные средства существуют в том виде, в котором они нам знакомы [2]. На сегодняшний день многие ученые и предприятия занимаются разработкой более компактных и быстрых транзисторов; сейчас в промышленности распространены разные технологии: не самые передовые — 40, 28 нм (например, процессор Xtensa LX6, на котором базируется микроконтроллер ESP32), более продвинутые — 10, 3 нм (процессор Apple A19, использующийся в IPhone 17), а также другие, как более дорогие и новые, так и более старые и дешевые (чем и обусловлена их распространенность, несмотря на уже полученные более эффективные элементы) [3]. Одна из отечественных разработок — процессор Эльбрус-2С3, в котором используется 16-нанометровый технологический процесс [4].

Данные уровни, как было сказано, очень важны, но без работы на других потенциал этих разработок не будет полностью раскрыт и применен в современных электронных вычислительных системах.

Аналоговый уровень. На аналоговом уровне из уже имеющихся компонентов (диоды, транзисторы, конденсаторы и т. д.) инженеры-электроники проектируют аналоговые устройства. В современной вычислительной технике таковыми являются генераторы тактовой частоты, усилители, аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи, логические вентили — тоже аналоговые устройства. Каждый цифровой элемент может быть спроектирован по-разному даже в рамках одной логики, его реализация будет зависеть от требований к устройству. После изобретения интегральных микросхем, которые позволили создавать микропроцессоры на кристалле, появились различные логические семейства, каждое из которых имеет свои преимущества и недостатки [5]. Элементы эмиттерно-связанной логики (ЭСЛ) обеспечивают высокую скорость, но при этом занимают большую площадь и нуждаются в высоком энергопотреблении, стоимость их производства достаточно высока. Элементы КМОП-логики (комплементарная структура «металл — оксид — полупроводник») обладают довольно высокой скоростью благодаря компакт-

ному расположению элементов на кристалле (однако их скорость ниже, чем у ЭСЛ), имеют низкое энергопотребление. Элементы транзисторно-транзисторной логики (ТТЛ) имеют невысокую скорость, средние энергопотребление и занимают небольшую площадь. Поскольку КМОП уступает только немного по скорости ЭСЛ, а по другим показателям превосходит другие семейства, сейчас именно это логическое семейство распространено больше всего. По этой причине далее будем рассматривать схемы, построенные на КМОП.

Отметим разницу в быстродействии логических вентилей И (конъюнкция) и И–НЕ (штрих Шеффера), ИЛИ (дизъюнкция) и ИЛИ–НЕ (стрелка Пирса): И–НЕ имеет два параллельных p-МОП транзистора и два последовательных n-МОП; ИЛИ–НЕ — два параллельных n-МОП и два последовательных p-МОП транзистора. Дырки в p-канале перемещаются медленнее, чем электроны в n-канале [6]. Из этого следует, что И–НЕ имеет лучшее быстродействие, чем ИЛИ–НЕ. Элементы И и ИЛИ невозможно построить на четырех транзисторах в рамках КМОП, они строятся из И–НЕ и ИЛИ–НЕ с помощью инвертора (еще два транзистора) [7]. Поэтому, если важны скорость и занимаемая площадь, лучше использовать И–НЕ и ИЛИ–НЕ, чем И и ИЛИ.

Цифровой и логический уровни. На цифровом уровне происходит переход от аналоговой к цифровой электронике — это позволяет, по больше части, абстрагироваться от физических явлений и строения логических вентилей на следующих уровнях. Однако инженеры, работающие на более высоких уровнях, должны понимать принцип работы цифровых элементов, поскольку они все равно регулярно работают и с более низкими; в цифровой электронике применяется дискретная математике ввиду работы с дискретными сигналами, в отличие от аналоговой электроники. В этом и состоит принцип абстракций — при работе на определенном уровне концентрируются именно на нем и немного на соседних с ним, не уделяя излишнего внимания другим уровням, когда делать это нерационально.

Рассмотрим пример для структуры КМОП (по причине ее наибольшей распространенности): для построения синхронного RS-триггера можно использовать или асинхронный RS-триггер с двумя вентилями И (конъюнкция), или инвертирующий асинхронный RS-триггер с двумя вентилями И–НЕ (штрих Шеффера). При работе с данным уровнем нет необходимости задумываться над строением транзисторов и протекающими в них физическими процессами), но следует знать особенности строения логических элементов: инвертирующий асинхронный RS-триггер работает немного быстрее (он построен на И–НЕ, а не ИЛИ–НЕ, который работает медленнее, о чем было сказано выше). Добавляемые для синхронизации элементы И в первом варианте также работают медленнее, чем И–НЕ во втором. В сово-

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2026 ISSN 2541-8009

купности критический путь и занимаемая площадь получаются короче во втором случае.

В общем случае на указанных уровнях проектируются базовые логические элементы: триггеры, регистры, сумматоры, мультиплексоры, шифраторы и т. п. Если нет требований к скорости и площади или их улучшение незначительно при больших трудозатратах, опускаться на более низкие уровни нерационально. Поэтому при разработке электронных устройств (в том числе архитектуры электронных вычислительных систем) в качестве базовых применяют именно эти блоки, иногда прибегая к использованию логических вентилей и отдельных электронных компонентов.

Микроархитектурный и архитектурный уровни. Архитектура — это фундаментальное понятие, определяющее, как устроена вычислительная система, каковы ее основные составляющие, принципы взаимодействия элементов и набор команд. Архитектурный уровень связывает аппаратное и программное обеспечение. Микроархитектурный уровень служит связующим между архитектурным и логическим. На нем рассматривают функциональные блоки, состоящие из логических элементов: регистров, арифметико-логических устройств, блоков памяти и др. Микроархитектура описывает, как именно в процессоре расположены и соединены друг с другом эти блоки.

На архитектурном уровне происходит окончательное абстрагирование от аналоговой и цифровой электроники, здесь инженеры оперируют общими данными о функциональных устройствах. У каждой архитектуры может быть много различных микроархитектур, обеспечивающих разное соотношение производительности, цены и энергопотребления, так же, как и в программировании: одну и ту же задачу можно решить разными способами. Архитектура определяется набором инструкций (языком программирования) и расположением блоков (операндов). Программист взаимодействует с функциональными блоками системы, задавая последовательность команд (инструкций).

Существует множество различных моделей архитектур (фон Неймана, гарвардская и другие) и микроархитектурных реализаций для каждой из них; большое распространение получили архитектуры x86 (на ней основана в том числе операционная система Windows), ARM, RISC-V, «Эльбрус» (архитектура отечественной разработки), а также их комбинации и др. [8].

Уровень операционных систем и программный уровень. Операционная система — это программа, которая добавляет ряд команд и особенностей к тем, которые обеспечиваются уровнем команд [9]. Операционная система управляет операциями (инструкциями) архитектуры. Сейчас наиболее используемыми операционными системами являются Windows, MacOS, различные дистрибутивы Linux (Ubuntu, Kali, Debian и др.).

 © МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2026

Выше уровня операционных систем находится программный уровень — на данном уровне работают программисты, описывая действия, которые должна выполнить система. Компьютер выполняет инструкции, представляющих собой последовательности нулей и единиц, поэтому для упрощения существуют языки ассемблера. Для еще большего удобства создаются различные языки программирования, каждая команда в которой объединяет несколько ассемблерных команд, что уменьшает сложность разработки больших вычислительных систем [10]. Языки программирования подразделяются на высокоуровневые и низкоуровневые (самый низкоуровневый язык, не считая машинного кода — ассемблер). Для разработки эффективных программ необходимо не только знать программный уровень, но и разбираться в работе операционных систем и архитектуре ЭВМ, поскольку программное обеспечение использует ресурсы операционной системы.

Заключение. Современные электронные вычислительные системы имеют несколько уровней абстракции, некоторые из них — все уровни, описанные в статье, а некоторые — только часть. Для максимально эффективной работы всей системы необходима качественная проработка ее составляющих на всех уровнях. На сегодняшний день, несмотря на достижение больших результатов в создании таких систем, продолжается исследование и усовершенствование каждого из уровней. Существует вероятность, что в будущем иерархия уровней дополнится (как это было и раньше) благодаря усовершенствованию технологий и разработке новых инструментов. Однако на сегодняшний день она представлена таким образом, и создание электронных вычислительных систем основывается именно на данной модели.

Литература

[1] Харрис Д.М., Харрис С.Л. *Цифровая схемотехника и архитектура компьютера.* Москва, ДМК Пресс, 2017, 792 с.

[2] Даниленко Д.С. История развития интегральных микросхем. *Актуальные проблемы авиации и космонавтики. VIII Междунар. науч.-практ. конф., посв. Дню космонавтики: сб. матер.* Красноярск, СибГУ им. академика М.Ф. Решетнева, 2022, т. 3, с. 1200–1202.

[3] *ESP32 Series. Datasheet. Version 4.9. Espressif Systems*. URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf (accessed 02.03.2026).

[4] *«Автоматика» представила первый бюджетный компьютер на базе процессора «Эльбрус-2С3»*. URL: https://rostec.ru/media/news/avtomatika-predstavila-pervyy-byudzhetnyy-kompyuter-na-baze-protsessora-elbrus-2s3-/ (дата обращения 02.03.2026).

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2026 ISSN 2541-8009

[5] Мещерякова Р.И. *Семейства стандартных логических интегральных микросхем. Электрические характеристики и особенности применения*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010, 40 с.

[6] Винтайкин Б.Е. *Физика твердого тела*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006, 358 с.

[7] Кириченко П. *Собираем элементы цифровой логики. Истовый инженер*. URL: https://engineer.yadro.com/article/digital-logic-elements/ (дата обращения 02.03.2026).

[8] Виды популярных архитектур процессоров и их отличия. URL: https://tproger.ru/articles/processors-architectures-review (дата обращения 02.03.2026).

[9] Таненбаум Э. *Архитектура компьютера*. Санкт-Петербург, Питер, 2003, 698 с.

[10] Баула В.Г. *Введение в архитектуру ЭВМ и системы программирования*. Москва, Издательский отдел факультета ВМиК МГУ, 2005, 363 с.

Поступила в редакцию 24.03.2026

Матушин Савва Евгеньевич — студент кафедры «Информационная безопасность», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Глинская Елена Вячеславовна — старший преподаватель кафедры «Информационная безопасность», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — М.А. Басараб, д-р физ.-мат. наук, заведующий кафедрой «Информационная безопасность», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:
Матушин С.Е., Глинская Е.В. Уровни абстракции в электронных вычислительных системах. *Политехнический молодежный журнал*, 2026, № 5 (106). URL: https://ptsj.bmstu.ru/catalog/icec/inf_tech/1128.html

 © МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2026

ABSTRACTION LEVELS IN ELECTRONIC COMPUTING SYSTEMS

S.E. Matushin matushinse@student.bmstu.ru
E.V. Glinskaya glinskaya@bmstu.ru
SPIN-code: 5430-3023

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

The article presents information-processing computing systems and highlights their specific characteristics regarding design across the various levels of the hierarchical abstraction model-ranging from the physical to the software level. The tasks associated with each level are described in detail, accompanied by illustrative examples. The distribution of responsibilities among different specialists is demonstrated, and the mutual influence of adjacent levels is examined (for example, the relationship between the properties of electronic components at the analog level and the speed of logic circuits), along with the impact of level alignment on architectural decisions. It is shown that maximum system-wide efficiency is achieved only through high-quality, in-depth analysis and development across all levels of the system

Keywords: abstraction levels, computing technology, electronic computing systems, electronics, computer architecture, CMOS logic

References

[1] Harris D.M., Harris S.L. *Tsifrovaya skhemotekhnika i arkhitektura komp'yutera* [Digital Design and Computer Architecture]. Moscow, DMK Press Publ., 2017, 792 p. (In Russ.).

[2] Danilenko D.S. Istoriya razvitiya integral'nykh mikroskhem [History of the development of integrated circuits]. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavtiki. VIII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya, posvyashchennaya Dnyu kosmonavtiki: sbornik materialov* [Current problems of aviation and cosmonautics. VIII International Scientific and Practical Conference dedicated to Cosmonautics Day: proceedings]. Krasnoyarsk, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology Publ., 2022, vol. 3, pp. 1200–1202. (In Russ.).

[3] *ESP32 Series. Datasheet. Version 4.9. Espressif Systems*. Available at: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf (accessed October 2, 2026).

[4] *"Avtomatika" predstavila pervyy byudzhetnyy komp'yuter na baze protsessora "El'brus-2S3"* [Avtomatika presented the first budget computer based on the Elbrus-2S3 processor]. Available at: https://rostec.ru/media/news/avtomatika-predstavila-pervyy-byudzhetnyy-kompyuter-na-baze-protsessora-elbrus-2s3-/ (accessed October 2, 2026). (In Russ.).

© BMSTU, 2026

[5] Meshcheryakova R.I. *Semeystva standartnykh logicheskikh integral'nykh mikroskhem. Elektricheskie kharakteristiki i osobennosti primeneniya* [Families of standard logic integrated circuits. Electrical characteristics and application features]. Moscow, BMSTU Publ., 2010, 40 p. (In Russ.).

[6] Vintaykin B.E. *Fizika tverdogo tela* [Solid State Physics]. Moscow, BMSTU Publ., 2006, 358 p. (In Russ.).

[7] Kirichenko P. Sobiraem elementy tsifrovoy logiki [Building digital logic elements]. *Istovyy inzhener*. Available at: https://engineer.yadro.com/article/digital-logic-elements/ (accessed March 2, 2026). (In Russ.).

[8] [*Vidy populyarnykh arkhitektur protsessorov i ikh otlichiya* [Popular processor architectures and their differences]. Available at: https://tproger.ru/articles/processors-architectures-review (accessed March 2, 2026). (In Russ.).

[9] Tanenbaum A.S. *Arkhitektura komp'yutera* [Structured Computer Organization]. St. Petersburg, Piter Publ., 2003, 698 p. (In Russ.).

[10] Baula V.G. *Vvedenie v arkhitekturu EVM i sistemy programmirovaniya* [Introduction to Computer Architecture and Programming Systems]. Moscow, Publishing Department of the Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, Moscow State University Publ., 2005, 363 p. (In Russ.).

Received 24.03.2026

Matushin S.E. — Student, Department of Information Security, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Glinskaya E.V. — Senior Lecturer, Department of Information Security, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — M.A. Basarab, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Head of the Department of Information Security, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:
Matushin S.E., Glinskaya E.V. Abstraction levels in electronic computing systems. *Politekhnicheskiy molodezhnyy zhurnal*, 2026, no. 5 (106). (In Russ.). URL: https://ptsj.bmstu.ru/catalog/icec/inf_tech/1128.html

 © BMSTU, 2026