

Исторические обзоры *Historical Reviews*

DOI: 10.31857/S0205960624040069

EDN: WGXFY

ИСТОРИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИНЦИПОВ ИТЕРАЦИИ И АДАПТАЦИИ В ПРИКЛАДНОМ ТЕЛЕВИДЕНИИ

ЛЫКОВА Евгения Михайловна — АО «НИИ телевидения»; Россия, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 22; эл. почта: museum@niitv.ru

ПОПОВ Василий Владимирович — АО «НИИ телевидения»; Россия, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 22; эл. почта: rubi74@mail.ru

БОБРОВСКИЙ Алексей Иванович — Государственный научно-исследовательский институт прикладных проблем; Россия, 191167, Санкт-Петербург, наб. Обводного канала, д. 29; эл. почта: albob@mail.ru

ЦЫЦУЛИН Александр Константинович — АО «НИИ телевидения»; Россия, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 22; эл. почта: tsytsulin@niitv.ru

© Е. М. Лыкова, В. В. Попов, А. И. Бобровский, А. К. Цыцулин

В статье рассмотрены исторические условия возникновения и развития принципов итерации и адаптации и проанализировано их применение в области научно-прикладного телевидения. Показано, что эти принципы, не будучи эквивалентными, взаимосвязаны, а цели их применения, используемые критерии, параметрические модели, алгоритмы и технологии в ходе развития техники постоянно совершенствовались. Отмечены факты использования принципов итерации и адаптации в ряде фундаментальных наук, что во многом стало предпосылкой для использования данных принципов в прикладном телевидении. Прослежено применение этих принципов на разных исторических этапах развития технологии телевидения, которые были связаны с использованием механической развертки, электронно-лучевых трубок и твердотельных матриц двух основных типов: приборов с зарядовой связью и с координатной адресацией, выполненных по комплементарной технологии металл — окисел — полупроводник, позволяющей реализовать и аналоговые, и цифровые устройства на одном кристалле. Показано, что в прикладном телевидении изобретения часто опережают возможность их практической реализации, а теория часто отстает от развития технологий. Отмечена связь нарастания сложности технологий с нарастанием сложности алгоритмов адаптации систем прикладного телевидения. Показана существенная роль научной школы АО «НИИ телевидения» в развитии теории и техники адаптивных систем прикладного телевидения на уровне технологий твердотельного телевидения для космических и морских применений.

Ключевые слова: итерация, адаптация, накопление, усиление, развертка, стробирование, сигнал, информация, телевидение.

Статья поступила в редакцию 20 сентября 2023 г.

Принято к печати 21 декабря 2023 г.

HISTORICAL ASPECTS OF UTILIZATION OF THE PRINCIPLES OF ITERATION AND ADAPTATION IN APPLIED TELEVISION

LYKOVA Evgeniya Mikhailovna – JSC “Scientific Research Institute of Television”;
Ul. Politekhnikeskaya, 22, St. Petersburg, 194021, Russia; E-mail: museum@niitv.ru

POPOV Vasilii Vladimirovich – JSC “Scientific Research Institute of Television”;
Ul. Politekhnikeskaya, 22, St. Petersburg, 194021, Russia; E-mail: rubi74@mail.ru

BOBROVSKII Aleksey Ivanovich – State Scientific Research Institute of Applied Problems;
Nab. Obvodnogo kanala, 29, St. Petersburg, 191167, Russia; E-mail: albob@mail.ru

TSYTSULIN Alexander Konstantinovich – JSC “Scientific Research Institute of Television”;
Ul. Politekhnikeskaya, 22, St. Petersburg, 194021, Russia; E-mail: tsytsulin@niitv.ru

© Е. М. Lykova, V. V. Popov, A. I. Bobrovskii, A. K. Tsytsulin

Abstract: The article examines the historical conditions for the emergence and development of the principles of iteration and adaptation, and analyzes their utilization in the field of applied television. These principles, while not being equivalent, are shown to be interrelated and the goals of their utilization, criteria, parametric models, algorithms, and technologies were constantly being refined in the course of development of technology. The facts of using the principles of iteration and adaptation in fundamental sciences, which in many respects preceded their utilization in applied television, are discussed. We have tracked down the use of these principles during different historical periods of the development of television technology, associated with the utilization of mechanical scanning, electron-beam tubes, and solid-state matrices of two main types: the charge-coupled devices and devices with coordinate addressing, built using complementary metal – oxide – semiconductor technology that allows to realize both the analog and digital devices in a single crystal. It is shown that in applied television inventions are often ahead of the possibilities for their practical realization while theory often lags behind the advancement of technologies. The escalation of complexity of technologies is shown to correlate with the escalation of complexity of adaptation algorithms for the systems of applied television. The article shows an important role of the scientific school of the Scientific Research Institute of Television (NIIT) in the development of the theory and technology of the adaptive systems of applied television at the level of solid-state television technologies for space and marine applications.

Keywords: iteration, adaptation, accumulation, amplification, scanning, gating, signal, information, television.

For citation: Lykova, E. M., Popov, V. V., Bobrovskii, A. I., and Tsytulin, A. K. (2024) Istoricheskie aspekty primeneniia printsipov iteratsii i adaptatsii v prikladnom televidenii [Historical Aspects of Utilization of the Principles of Iteration and Adaptation in Applied Television], *Voprosy istorii estestvoznaniia i tekhniki*, vol. 45, no. 4, pp. 779–801, DOI: 10.31857/S0205960624040069, EDN: WGXFY.

Введение

Принципы итерации и адаптации давно применяются в целом ряде точных, гуманитарных и естественных наук. Чаще всего к принципу итерации (индукции) относят последовательное повторение одного и того же действия (последовательности) с целью достижения конечного результата. В научном плане принцип итераций состоит в пошаговом повторении какого-либо типового действия с измененными (уточненными) данными для постепенного приближения к нужному результату. С принципом итерации напрямую соотносится принцип адаптации, заключающийся в изменении значений параметров и структуры системы (возможно, и формируемых управляющих воздействий) с целью ее приспособления к изменениям окружающей среды и в изменении элементов системы на основе информации, получаемой во время управления, с целью достижения оптимального по выбранному критерию состояния системы при начальной неопределенности и изменяющихся условиях работы.

Эти два важнейших принципа имеют как отличия, так и общие черты. Их семантическая и прагматическая близость заключается в первую очередь в близости цели их применения, которой является достижение определенного, с той или иной точки зрения оптимального состояния системы (результата процесса).

Кроме того, реализация адаптации в ряде случаев использует итерационные методы. Семантическое и прагматическое отличие этих понятий состоит в том, что принцип итерации предусматривает обязательное повторение операции (типового действия), а принцип адаптации предусматривает изменение параметров и / или структуры не обязательно за счет повторения определенной операции. Вместе с тем, учитывая, что определенные повторы действий (операций) при адаптации происходят или должны происходить вследствие периодических повторений условий функционирования, принцип итерации, как правило, должен использоваться в адаптивных системах. Ниже принципы итерации и адаптации как общенаучные методы рассматриваются в части их использования в технике телевидения в ходе его исторического развития в двух аспектах:

- как методы и методики *проектирования* телевизионных систем в условиях изменения применяемых технологий, элементной базы, назначения разрабатываемых изделий и требований к ним;

- как методы и алгоритмы, которые должны сохранять необходимый уровень качества *функционирования* в ходе изменения условий функционирования.

История развития прикладного телевидения — одна из наименее изученных областей истории науки и техники. В поле интересов историков науки и техники до сих пор находится телевизионное вещание; предложена периодизация его развития, рассмотрены основные вехи развития, начиная от механического телевидения и до систем высокой четкости. При изучении истории вещательного телевидения авторы используют годами апробированные методы исторического и источниковедческого исследования. Вместе с тем история телевизионного вещания составляет, вопреки общепринятому мнению, только малую видимую невооруженным глазом часть айсберга истории телевидения. Объяснить это можно гипертрофированным вниманием к распространению информации в ущерб вниманию к рождению информации. Наибольшее количество телевизионных систем относится к прикладному телевидению. Оно используется в наиболее значимых сферах нашей жизни — медицине, науке, технике, исследованиях космоса, обороне и т. д. Каждое направление требует особого изучения, однако на начальном этапе нужны обобщающие работы, призванные выявить основные тенденции развития разных направлений, определить методологию и научные подходы к их изучению.

Прикладное телевидение не дистанцируется от вещательного, это пересекающиеся, но не совпадающие области знания. Тенденции их развития во многом схожи, но в плане развития теории и техники имеют существенные отличия. Во-первых, в этих системах различны получатели: в прикладных системах это профессионалы в конкретной предметной области, в вещании — просто зритель. Во-вторых, прикладное телевидение свободно от оков стандартов телевизионного вещания и использует методы построения оптимальных систем.

Целью данной статьи является освещение ранее обычно остававшихся вне поля зрения закономерностей развития прикладного телевидения, связанных с влиянием на него принципов итерации и адаптации. В задачи статьи входит уточнение периодизации развития телевизионной техники.

Для лучшего понимания влияния принципов итерации и адаптации на телевизионную технику рассмотрим их применение в биологических, астрономических, математических и философских исследованиях.

Применение принципов итерации и адаптации в науке

В биологии выдвижение идеи адаптации и ее исследования (XIX в.) ведут начало от работ Г. Спенсера, который, отталкиваясь от введенного им закона *приспособляемости*, на семь лет раньше Ч. Дарвина выдвинул идею эволюции в биологическом мире как реакции на изменение условий существования (1857) ¹. Такое приспособление Спенсер подразделял на приспособление вида и индивида, отмечая: «*Что априорно для индивида, то апостериорно (возникает опытным путем) для вида*» (курсив о оригинале. — Е. Л., В. П.,

¹ Спенсер Г. Опыты научные, политические и философские. Минск: Современный литератор, 1999.

А. Б., А. Ц)². В соответствии с таким разделением исследования в офтальмологии Г. Р. Оберта (1865) по приспособлению индивида привели к введению специального термина «адаптация», который он определил как «способность органа, в данном случае чувств, приспосабливаться к внешнему раздражителю»³. Эти работы по приспособлению, эволюции и адаптации были продолжены Г. Гельмгольцем, И. М. Сеченовым, И. П. Павловым, А. А. Ухтомским и др.; в результате сложилась концепция приспособления, подразделяемого на адаптацию вида (эволюцию) и адаптацию индивида. Адаптация вида в контексте системы зрительного анализатора привела к приспособлению зрения человека к условиям освещения, определяемым интенсивностью и спектральным составом излучения Солнца, прошедшего через атмосферу Земли (их совместное влияние на свойства зрения подчеркнуто С. И. Вавиловым). К адаптации вида можно отнести также наличие в поле зрения двух различных зон — в центре высокая разрешающая способность по полю, на периферии пониженная разрешающая способность по полю, но зато повышенная чувствительность к подвижным объектам. Адаптация вида (эволюция) может трактоваться как *итерационный* процесс, включающий метод случайного поиска (мутации) в сочетании с естественным отбором. Многие параллели между биологической эволюцией и эволюцией технологий прослежены С. Лемом⁴. Применительно к прикладным телевизионным системам биологическая эволюция (адаптация вида) соответствует структурной и параметрической оптимизации. К адаптации индивида относятся изменение площади зрачка (соответствует изменению диафрагмы объектива), изменение спектральной чувствительности и квантовой эффективности при переходе от дневного зрения к ночному (соответствует управлению свойствами фотоприемной матрицы), аккомодация хрусталика глаза (соответствует наводке на резкость объектива) и изменение конвергенции глаз при бинокулярном зрении, позволяющем оценивать дистанцию до объектов. Все методы адаптации зрения индивида для прикладных телевизионных систем соответствуют параметрической адаптации.

В философии, конкретнее в теории познания, принцип итераций прослеживается в работах многих мыслителей (можно отметить Ф. Бэкона, А. Пуанкаре, Ж. Адамара; позже — Р. Пенроуза и А. Соломоника)⁵. Итерационный метод приближения к истине обсуждался и в концепции диалектического материализма. Прямым следствием приложения принципа итераций в теории познания является многошаговый метод обучения в педагогике.

² Там же. С. 9.

³ См.: Дениско Л. С. Формирование понятия «социально-психологическая адаптация» на основе теоретического анализа психолого-педагогической литературы в современной психологии // Молодой ученый. 2021. № 9 (351). С. 171.

⁴ Лем С. Сумма технологии. М.: Мир, 1968.

⁵ Бэкон Ф. Новый органон. М.: РИПОЛ классик, 2018. С. 24–26, 53, 140; Пуанкаре А. О науке. М.: Наука, 1983. С. 102, 312; Адамар Ж. Исследование психологии процесса изобретения в области математики. М.: Книга по требованию, 2013. С. 31–38; Пенроуз Р. Новый ум короля: о компьютерах, мышлении и законах физики. 4-е изд. М.: УРСС; Изд-во ЛКИ, 2011. С. 126; Соломоник А. Б. Опыт современной теории познания. СПб.: Алетейя. С. 122–145.

В математике итерационные методы известны с античных времен (алгоритм нахождения наибольшего общего делителя двух целых чисел — один из древнейших, носящий имя Евклида; алгоритм вычисления Архимедом длины окружности как предела периметров вписанных и описанных многоугольников). В новое время можно отметить разработку итерационных методов решения трансцендентных уравнений И. Ньютоном и выросшую из них теорию пределов. В XX в. метод итераций (последовательных приближений, повторных подстановок) развит Э. Пикаром⁶. Обсуждение математических понятий *итераций* или *последовательных приближений* в сочетании с биологическими по происхождению терминами эволюции и адаптации может показаться неправомерным, так как физика и биология относятся к естествознанию, а математика не относится, так как изучает не сами реальные объекты, а лишь их отношения. Вместе с тем, как отмечал Р. Фейнман, в том-то и вся беда с физикой, что она должна быть математической.

В технике принципы итерации и адаптации получили широкое распространение. Например, С. П. Королев в «Предложениях по созданию средств орбитальной сборки» (1962) отмечал, что «обслуживание постоянно действующих пилотируемых спутников <...> связано с регулярным использованием процессов сближения и стыковки на орбите»⁷. Подробно описывая каждый этап (итерацию), он разбивает процесс сборки на восемь этапов и использует итерационный принцип дважды: при последовательных посылках очередного ракетного блока на орбиту для наращивания орбитальной станции и внутри каждой операции. В обоих случаях Королев предполагал использовать аппаратуру радиопоиска и наведения, подразумевавшие в своем составе телевизионные камеры. Телевизионная аппаратура, вот уже более полувека размещаемая на борту космических аппаратов (КА), осуществляет контроль сближения, используя на различных дистанциях объективы с различными фокусными расстояниями, адаптируя телекамеру к размеру изображения. Таким образом, использование на различных дистанциях объективов с различными фокусными расстояниями относится к адаптации телекамеры к масштабу (размеру) изображения объекта и, в силу монотонности изменения дистанции и дискретности переключения фокусного расстояния объектива, к итерационному контролю сближения. В свою очередь, итерационный алгоритм фокусировки имеет целью достижение максимальной резкости изображений. Поиск этого максимума соответствует адаптации к дистанции до доминантного объекта; она осуществляется с помощью ряда итераций, в каждой из которых оценивается резкость (например, по максимуму энергии лапласиана внутри двумерного строка), которая сравнивается с результатом на предыдущей итерации, позволяя формировать команду на изменение расстояния между объективом и фотоприемной матрицей. Техника телевидения развивалась параллельно с теорией, постоянно адаптируясь к технологиям и запросам потребителей. Теория совершенствовалась

⁶ См.: Feagin T., Nacozy P. Matrix Formulation of the Picard Method for Parallel Computation // Celestial Mechanics. 1983. Vol. 29. No. 2. P. 107–115.

⁷ Творческое наследие Сергея Павловича Королева. Избранные труды и документы / Ред. М. В. Келдыш, сост. Ю. В. Бирюков, Н. А. Варваров. М.: Наука, 1980. С. 237.

итерационно, последовательно включая в свой арсенал описания физических процессов, понятий и методов теории решений и теории информации. Адаптация шла «естественно», в соответствии с философским законом отрицания отрицания, осуществлялась по диалектической спирали и вследствие наличия повторных интеллектуальных усилий (операций) имела итеративный характер. Адаптация (развитие теории), итерации (этапы) в теории телевидения наглядно проявляются в переосмыслении научных знаний о рождении телевизионного сигнала в фотоприемных устройствах: сначала говорили о накоплении заряда, затем о накоплении информации и, наконец, о накоплении качества информации.

Этапы применения принципов итерации и адаптации в прикладном телевидении

Этапы применения и развития принципов итерации и адаптации в прикладном телевидении коррелируют с этапами изменения технологий в вещательном телевидении, хотя и не совпадают с ними полностью. Этапы развития телевизионной техники определяются в зависимости от критериев, положенных в основу развития техники и технологий телевидения, развитие качественных характеристик телевидения — от черно-белого к цветному, развитие телевизионного вещания и т. д. Периодизация развития телевизионной техники может считаться итерационной в силу наличия у этого развития пусть и интуитивной, без формализации, основной *цели* — повышения качества видеoinформации и удельной производительности телекамер, т. е. количества информации в единицу времени на единицу массы. Именно наличие цели отличает развитие техники (в том числе телевидения) от, например, геологических эпох.

В литературе чаще всего выделяют пять основных периодов ⁸:

- до 1920 г. Зарождение основных идей и концепций, положенных в основу телевидения, «период размышления»;
- механическое телевидение (1920—1935). Развитие систем механического вещания, начало первой регулярной телевизионной трансляции;
- электронное черно-белое телевидение (1936—1966);
- электронное цветное телевидение (с 1967);
- цифровое телевидение высокой четкости (с 2000).

В этой классификации важны следующие особенности: границы деления в ней весьма условны, так как все технологические революции происходят не скачком, а новое постепенно вытесняет старое, и они долго сосуществуют вместе (например, на пароходах долго оставались паруса, первые автомобили имели вид карет). Классификация этапов истории вещательного телевидения важна, но не отражает историю развития прикладных систем. Кроме того, в ней поставлены жесткие рамки технологического

⁸ См.: *Урвалов В. А.* Очерки истории телевидения. М.: Наука, 1990; Телевизионная техника: справочник / Ред. Ю. Б. Зубарев, Г. Л. Глориозов. М.: Радио и связь, 1994; *Борисов В. П.* Владимир Козьмич Зворыкин. М.: Наука, 2004.

развития — от механического телевидения до телевидения высокой четкости. Развитие техники телевидения связано с ее элементной базой, которая совершенствуется не скачком. Поэтому широко известно, что анализ сложных технических систем с зарождающимися технологиями приводит к тому, что в начале своего развития они имеют низкие характеристики, но по мере их совершенствования и использования происходит существенное улучшение их технического уровня⁹.

Классификация этапов развития техники телевидения нуждается в дополнении и уточнении; следует учесть не только технологический уровень, но и то, что границы этапов условны, многие этапы будут иметь пересечения. Таким образом, в истории телевидения можно выделить шесть основных этапов:

— *зарождение и накопление идей* из смежных областей знания (оптики, проводной и радиосвязи, вакуумной и твердотельной светоизмерительной техники), т. е. предыстория (ориентировочно до 1900 г.); назначение и технологии не совпадают, хотя частично могут быть связаны, — например, ночное видение ведет к инфракрасной технике или к усилителям яркости (фотоэлектрическим умножителям);

— *механическое телевидение* (термин «телевидение» предложен К. Д. Перским в 1900 г.¹⁰), рождение которого часто связывают с изобретением развертки изображения с помощью диска П. Нипкова со спирально расположенными отверстиями (1884, реализовано заметно позже). Вместе с тем методологически механическое телевидение в виде фототелеграфа изобретено А. Бейном в 1843 г. и реализовано в 1846 г.¹¹ Первые попытки демонстрации механического телевидения для передачи динамических изображений связывают с именами Ж. Рину, А. Фурнье (1909), Б. Л. Розинга и его ученика В. К. Зворыкина (1911), А. Лоу (1914)¹². Первая станция для передачи радиосигналов механического телевидения была основана в США в 1928 г. Последний телевизионный центр, построенный на основе механической системы, был открыт в СССР в 1940 г., что и определяет датировку этого этапа: 1900—1940 гг.;

— *электронное черно-белое телевидение*, историю которого в части приемных телевизионных трубок связывают с именем Розинга (1907—1911)¹³. Передающие телевизионные трубки изобретали и пытались реализовать, отталкиваясь от изобретения К. Брауна (1897)¹⁴, многие, наиболее активно в 1920-х гг. (Дж. Джонсон, Г. Вайнхарт, П. В. Шмаков, С. И. Катаев), и

⁹ См.: Сагдуллаев Ю. С., Ковин С. Д. Спектральная селекция объектов в системах технического зрения. М.: Спутник+, 2023. С. 390.

¹⁰ Перский К. Д. Современное состояние вопроса об электровидении на расстояние (телевизиование) // Труды Первого Всероссийского электротехнического съезда 1899—1900 в С.-Петербурге / Ред. А. И. Смирнов, Н. Н. Георгиевский. СПб.: Тип. П. В. Мартынова, 1901. Т. 2. С. 346—362.

¹¹ См.: Борисов В. П. Рождение телевидения в Стране Советов (к 75-летию отечественного телевидения) // Вопросы истории естествознания и техники. 2007. № 1. С. 109—131.

¹² См.: Меркулов Д. Телевидению — 80 лет // Наука и жизнь. 2006. № 1. С. 76—80.

¹³ См.: Блинов В. И., Урвалов В. А. Б. Л. Розинг. М.: Просвещение, 1991. С. 3—15.

¹⁴ См.: Браун Карл Фердинанд // Храмов Ю. А. Физики: биографический справочник. 2-е изд. М.: Наука, 1983. С. 45.

первым реализовал на практике и продемонстрировал свое изобретение Зворыкин (1933) ¹⁵. Первая в мире телевизионная служба с полностью электронным телевидением (Германия) начала работу в 1935 г. Такая размытость границ приводит к ориентировочной датировке этого этапа 1930–1966 гг. (в отдельных системах прикладного телевидения черно-белое зрение сохранилось до 1990-х гг.);

– *цветное телевидение*, историю которого ведут от идеи системы цветного телевидения на основе призмы Ньютона (М. Леблан, 1880) ¹⁶ и первых проектов системы цветного механического телевидения (Полумордвинов, 1899; Адамиан, 1908) ¹⁷. Первая демонстрация цветной телевизионной передачи с электронно-лучевым сканированием и механическим цветоделением состоялась в 1940 г. (Голдмарк) ¹⁸, телецентры цветного телевидения появились в США и СССР в 1954 г., массовый парк телевизоров – в 1960-х гг. (1950 г. – по настоящее время);

– *цифровое телевидение*, историю которого можно начать с отечественной космической высокоорбитальной телевизионной системы обнаружения с цифровым каналом связи (П. Ф. Брацлавец, 1974) ¹⁹. Цифровое телевизионное вещание опиралось на цифровые методы кодирования источника (сжатие сигнала) и кодирование канала (повышение помехоустойчивости, стандартизированное для наземного, спутникового и кабельного вещания на основе стандартов кодирования JPEG и MPEG (с 1980-х гг.);

– *твердотельное телевидение*, предысторию которого можно связать с именами Ж. Рину и А. Фурнье (1909) ²⁰, использовавших матрицу из 8×8 селеновых ячеек, и С. И. Кочергина (1963) ²¹, создавшего образцы безвакуумных телевизионных фотоэлектрических преобразователей. Массово твердотельные фотоприемники стали применяться в 1980-х гг. после освоения технологии приборов с зарядовой связью (ПЗС, изобретены У. Бойлом и Дж. Смитом в 1971 г. ²², Нобелевская премия за 2009 г.). Спустя двадцать лет технология фотоприемных матриц изменилась, перейдя, благодаря изобретению активного пиксела Э. Фоссамом (введение в каждый пиксел усилителя, что в терминологии электронно-лучевого телевидения соответствует

¹⁵ См.: Борисов В. П. Владимир Козьмич Зворыкин, 1889–1982. М.: Наука, 2002. С. 56–62.

¹⁶ См.: Урвалов В. А. Очерки истории телевидения. М.: Наука, 1990. С. 53.

¹⁷ См.: Рохлин А. М. Так рождалось дальновидение. М.: Институт повышения квалификации работников телевидения и радиовещания, 2000. Ч. 1. С. 20–25.

¹⁸ См.: Урвалов В. А. Очерки истории телевидения. М.: Наука, 1990. С. 164.

¹⁹ См.: Теория и практика космического телевидения / Ред. А. А. Умбиталиев, А. К. Цыцулин. СПб.: АО «НИИ телевидения», 2017. С. 39–61.

²⁰ См.: Горохов П. К. История развития телевидения // Радиоэлектроника. 1960. № 5. С. 22–35.

²¹ См.: Иванов В. Г. Твердотельная революция в телевидении. К истории начального этапа // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2007. Вып. 1. С. 130–137.

²² См.: Цыцулин А. К., Адамов Д. Ю., Манцетов А. А., Зубакин И. А. Твердотельные телекамеры: накопление качества информации. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. С. 20.

докоммутационному усилению), к технологии комплементарных структур металл — окисел — полупроводник (КМОП). Эта технология открыла путь к созданию телекамер на одном кристалле, доводя до предела производительность видеоинформации на единицу массы.

Перекрытие рассмотренных этапов хорошо видно на примере использования в экспериментах Розинга и Зворыкина (1911) ²³ механического телевидения на передающей стороне и электронно-лучевого на приемной стороне. Кроме того, здесь механическое телевидение датируется первой половиной XX в., хотя оно в 1960-х гг. возродилось в космосе с применением одноэлементных фотоприемников, а в 1980-х гг. — с применением строчных, где использовалась «даровая развертка» движения спутника Земли.

Рассмотрим эти шесть этапов подробнее в контексте применения принципов итерации и адаптации с акцентом на научно-прикладное телевидение, которое понимается значительно шире, чем телевизионное вещание ²⁴.

Первый этап: механическая развертка, одноэлементные фотоприемники

В механическом телевидении (основанном на использовании вращающегося диска с расположенными по спирали отверстиями, создатель — П. Нипков, 1884 ²⁵) главным приложением метода итераций стала развертка изображения, т. е. пошаговый перебор элементов разложения. Такой переход от элемента к элементу, от строки к строке, от кадра к кадру имеет целью согласование многомерного изображения (функции пространства, длины волны и времени) с одномерным каналом связи (функции времени). Скачки от строки к строке и от кадра к кадру являются следствием невозможности отображения сигнала большей размерности сигналом меньшей размерности без разрывов (отмечено К. Шенноном, 1948) ²⁶. Идея развертки имеет очень важное для науки и техники значение, и Н. Винер даже считал (1948), что «процесс развертки, применяемый в телевидении, принесет технике больше пользы именно созданием таких новых процессов, чем само по себе, как особая отрасль» ²⁷, и приводил примеры такого применения из биологии и математического обеспечения компьютерной техники.

В эпоху механического телевидения Г. Уилером (1925) и К. Купфмюллером (1928) была изобретена автоматическая регулировка усиления (АРУ), которая стала первой реализацией метода адаптации в телевидении, войдя

²³ См.: Самохин В. Борис Розинг, Владимир Зворыкин и телевидение // 625 (научно-технический журнал). 2009. № 10. С. 23–27.

²⁴ Аванесов Г. А. Звездные датчики ориентации космических аппаратов. Еще одна профессия современного телевидения // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2019. Вып. 3. С. 5–14.

²⁵ См.: Архангельский В. И. Телевидение. М.: Государственное издательство по вопросам радио, 1936. С. 18–20.

²⁶ Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. М.: Иностранная литература, 1963. С. 33–34.

²⁷ Винер Н. Кибернетика, или управление и связь в животном и машине. М.: Советское радио, 1968. С. 46.

в состав видеотракта как передающей, так и приемной системы. Адаптация фотоприемника в механическом телевидении не использовалась, лишь вручную регулировали освещенность сцены.

Второй этап: электронно-лучевые фотоприемники

Чувствительность электронно-лучевых передающих трубок благодаря переходу от одноэлементного к многоэлементному накоплению сигнала (В. К. Зворыкин, 1933) ²⁸ возросла, и адаптация телевизионных камер стала востребованной. Уже освоенная в период механического телевидения АРУ дополняется адаптацией обработки электрических сигналов изображений (апертурная и противошумовая коррекция, Г. В. Брауде, конец 1930-х — 1960 гг.) ²⁹. При этом апертурная коррекция, согласно концепции линейной фильтрации Колмогорова — Винера, делается адаптивно к отношению сигнал / шум, обеспечивая различный подъем частотной характеристики в области высоких частот введением производных видеосигнала все более высоких порядков (Л. И. Хромов, 1969) ³⁰.

Этап электронно-лучевого телевидения в XX в. совпал с развитием математической теории связи, в рамках которой, кроме подробно исследованных итерационных методов оптимизации, начала разрабатываться теория адаптации как следствия оптимизации систем в условиях априорной неопределенности и нестационарности сигналов. Ключевой идеей в теории адаптации стало введенное Винером понятие обратной связи, благодаря которому разрабатывалась теория управления, в том числе адаптивного к изменению свойств сигналов (Р. Беллман, Я. З. Цыпкин, Б. Н. Петров) ³¹. Разделение сигналов на обучающую и контрольную выборки для преодоления априорной неопределенности введено как в математической статистике (Р. Фишер) ³², так и в теории оптимального (адаптивного) приема сигналов, где были введены меры нестационарности сигналов (В. Г. Репин, Г. П. Тартаковский, Р. Л. Стратонович) ³³. Методы последовательного анализа (А. Вальд,

²⁸ Борисов В. П. Владимир Козьмич Зворыкин. М.: Молодая гвардия, 2013. С. 53.

²⁹ Брауде Г. В. Коррекция телевизионных импульсных сигналов: сб. статей. М.: Связь, 1967. С. 99–220.

³⁰ Хромов Л. И., Ковригин А. Б., Мартынихин А. В. Принцип двойственности в теории информации // Техника средств связи. Серия: Техника телевидения. 1991. Вып. 3. С. 3–11.

³¹ Беллман Р. Введение в теорию матриц. М.: Наука, 1969. С. 121; Цыпкин Я. З. Адаптация и обучение в автоматических системах. М.: Наука, 1968. С. 84–87; Петров Б. Н., Рутковский В. Ю., Крутова И. Н., Земляков С. Д. Принципы построения и проектирования самонастраивающихся систем управления. М.: Машиностроение, 1972. С. 64–68.

³² Фишер Р. Статистические методы для исследователей. М.: Госстатиздат, 1958. С. 67.

³³ Репин В. Г. Обнаружение сигнала с неизвестными моментами появления и исчезновения // Проблемы передачи информации. 1991. Т. 27. Вып. 1. С. 61–72; Тартаковский А. Г. Обнаружение сигналов со случайными моментами появления и исчезновения // Проблемы передачи информации. 1988. Т. 24. Вып. 2. С. 39–50; Стратонович Р. Л. Избранные вопросы теории флуктуаций в радиотехнике. М.: Советское радио, 1961.

А. Н. Ширяев)³⁴ стали ярким приложением принципа итераций к обработке наблюдений.

Основной вид адаптации телекамер в эпоху электронно-лучевых трубок — изменение параметров камеры при изменении освещенности сцены. Главными инструментами стала автоматическая регулировка диафрагмы объектива, дополняемая управлением напряжения на сигнальной пластине видикона и времени накопления (прореживание считывания кадров для увеличения времени накопления и предварительное считывание для уменьшения времени накопления). Дополнительными инструментами стали импульсная засветка и использование турели со сменными светофильтрами различной оптической плотности.

Адаптация к уровню принимаемого сигнала в телевизионных приемниках, кроме АРУ, применялась для обеспечения устойчивости синхронизации кадров и строк. Обсуждая «приспособляемость» телевизионной аппаратуры к трудным условиям (без использования термина «адаптация») С. И. Катаев отмечал:

...среди различных средств защиты от помех особого внимания заслуживает применение в приемниках новых саморегулирующихся систем синхронизации. Известно много схем, действующих по принципу саморегулирования, или автоподстройки, частоты синхронизации³⁵.

Существенно опережая время, Катаев в ходе изложения принципов малокадрового телевидения отметил полезность использования низкой кадровой частоты на большом поле кадра и высокой в выбранном окне³⁶. К таким же декларированным (изобретенным), но далеким от внедрения способам адаптации относится сжатие информации с помощью автоматического управления скоростью развертки в передающей электронно-лучевой трубке в зависимости от изменения зарядового изображения по полю (Д. А. Новик, В. П. Мандражи, 1960-е гг.; У. Прэтт, 1970-е гг.)³⁷.

Перестройка параметров телевизионной системы для согласования с изменяющимися объектами для достижения оптимальности была декларирована как метод проектирования прикладных систем, не связанных требованиями стандартов телевизионного вещания³⁸. Основные принципы адаптации как двустороннего согласования с источником (сценой) и с каналом связи были предложены и апробированы во Всесоюзном научно-исследовательском

³⁴ Вальд А. Последовательный анализ. М.: Физматгиз, 1960. С. 31–44; Ширяев А. Н. Статистический последовательный анализ: оптимальные правила остановки. 2-е изд. М.: Наука, 1976. С. 21–36.

³⁵ Катаев С. И. Современные проблемы телевидения. М.: Знание, 1953. С. 27–28.

³⁶ Катаев С. И. Возможность передачи телевизионной картины с помощью узкой полосы частот // Радиотехника. 1937. № 2. С. 71–80.

³⁷ Новик Д. А. К вопросу о средней составляющей телевизионного сигнала и методах ее получения // Радиотехника. 1958. Т. 13. № 7. С. 63–67; Мандражи В. П., Новик Д. А. Некоторые свойства цифровых телевизионных систем с непостоянной частотой строк и кадров // Радиотехника. 1962. Т. 17. № 10. С. 35–44; Прэтт У. Цифровая обработка изображений. М.: Мир, 1982. Кн. 2. С. 115–125.

³⁸ См.: Гуревич С. Б. Теория и расчет не вещательных систем телевидения. Л.: Энергия, 1970.

институте телевидения (ВНИИТ) ³⁹. Согласование с каналом опиралось на теорию связи (К. Шеннон, 1948, 1959; А. Н. Колмогоров, 1956) ⁴⁰ и предписывало усечение полосы частот по пороговому отношению сигнал / шум. Такое согласование предполагает изменение кадровой и строчной частоты. Эта идея была экспериментально подтверждена в ходе НИР «Исследование чувствительности телевизионной системы с переменными параметрами» («Ласточка», ВНИИТ, 1972, научный руководитель Г. А. Суцев) ⁴¹. Однако эта НИР хотя и показала возможность адаптации, но и выявила ее чрезмерную громоздкость. Реализовать перестройку видеотракта и синхрогенератора оказалось не очень сложно, но трудности реализации разверток были велики.

Тупик сложности привел к тому, что был сделан акцент на перестройке параметров, методы извлечения управляющих сигналов и методы реализации управления оставлены «на потом». К этому направлению относится локально-адаптивная перестройка формы и размеров считывающего электронного пучка, декларативность которой отмечена самими авторами (Л. П. Ярославский, С. Л. Горелик, 1980-е гг.) ⁴².

Используемая на этом этапе компьютерная техника — в основном достаточно большие («комнатные») ЭВМ, обрабатывающие зарегистрированные телевизионные изображения не в реальном масштабе времени. С этого периода начинается адаптация архитектуры ЭВМ к специфике обрабатываемых данных — матрицы, вектора, спектры.

Третий этап: цветное телевидение

Принцип итераций при передаче цвета просматривается с самых первых изобретений. В силу отмечавшейся неизбежности разрывов при снижении размерности сигнала, кроме скачков от элемента к элементу, от строки к строке, от кадра к кадру, появляются скачки при передаче информации о цвете. Причем не важно, в какой последовательности будут скачки. Например, использовалась последовательная передача кадров: «синий» — «зеленый» — «красный» ⁴³. При наблюдении Земли из космоса используются группы линейных фотоприемников с разными спектральными фильтрами, и при накоплении сигнала идут скачки («синяя» строка — «зеленая»

³⁹ Бордуков Г. С., Брацлавец П. Ф., Ресин В. И., Хромов Л. И. Телевизионные системы с перестраиваемыми параметрами // Техника кино и телевидения. 1971. № 4. С. 50–56.

⁴⁰ Шеннон. Работы по теории информации и кибернетике... С. 28; Колмогоров А. Н. Теория информации и теория алгоритмов. М.: Наука, 1987. С. 56.

⁴¹ Исследование чувствительности телевизионных систем с изменяемыми параметрами: отчет по НИР «Ласточка». М.: НИИЭИР, 1972. Гос. рег. № 71024799. С. 70.

⁴² Адаптивные методы обработки изображений: сборник научных трудов / Ред. В. И. Сифоров, Л. П. Ярославский. М.: Наука, 1988.

⁴³ Иванов В. Б. Работа ВНИИТ в международном проекте ЭПАС — экспериментальный полет космических кораблей «АПОЛЛОН» и «СОЮЗ-19» // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2009. Вып. 1. С. 94–101.

строка — «красная» строка) ⁴⁴. В современных матричных фотоприемниках с помощью спектральных фильтров организуется попиксельное чередование цвета. Использование принципа итераций при создании систем цветного телевидения видно и в совмещении растров в трехтрубчатых (трехматричных) телекамерах. Принцип адаптации в цветном телевидении на этом этапе во многом соответствует адаптации черно-белых телекамер и дополняется автоматической цветокоррекцией.

Четвертый этап: цифровое телевидение

Сначала цифровое телевидение было гибридом старого аналогового способа формирования телевизионного сигнала и нового способа его передачи.

Первой практически реализованной отечественной телевизионной системой с цифровым каналом связи стала космическая высокоорбитальная система обнаружения (П. Ф. Брацлавец, 1974) ⁴⁵, в которой кодирование источника (сжатие видеосигнала) осуществлялось в аналоговой форме, а кодирование канала — в цифровой, обеспечивающей защиту от несанкционированного доступа ⁴⁶. Первым этапом перехода к цифровому телевидению стала разработка аналого-цифровых преобразователей (АЦП) для ввода цифрового сигнала в ЭВМ или дискретный канал связи. Применение на этом этапе методов итераций привело к разработке компромиссного по сложности и быстродействию АЦП поразрядного уравнивания на основе дихотомии.

Вторым важным этапом исследований цифровой обработки телевизионных сигналов стало кодирование с преобразованием к двумерному спектру (Р. Блейхут, Л. Рабинер, У. Прэтт, И. И. Цуккерман) ⁴⁷ с помощью так называемых быстрых преобразований, основанных на минимизации вычислительной сложности и на распараллеливании вычислений. Со временем эти усилия привели к разработке стандартов кодирования *JPEG* и *MPEG*, а также кодеров на основе трехмерного дискретного косинусного преобразования (ДКП). Методы итераций проявляются в кодировании спектрального представления сигнала изображения в последовательном вычислении спектральных коэффициентов с оценкой среднеквадратической ошибки восстановления сигнала после вычисления коэффициента каждой гармоники дискретного косинусного преобразования. Методы адаптации в цифровом кодировании видеосигналов включали выбор порогов передачи интенсивности сигналов и их пространственной дискретизации на основе анализа

⁴⁴ Селиванов А. С. Вклад Российского НИИ космического приборостроения в развитие космического телевидения // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2009. Вып. 1. С. 38–47.

⁴⁵ См.: Цыцулин А. К. Телевидение и космос. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014.

⁴⁶ См.: Теория и практика космического телевидения...

⁴⁷ Блейхут Р. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов. М.: Мир, 1989; Рабинер Л., Голд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. М.: Мир, 1978; Прэтт. Цифровая обработка изображений... Кн. 1–2; Цифровое кодирование телевизионных изображений / Ред. И. И. Цуккерман. М.: Радио и связь, 1981.

гистограмм видеосигнала и скорости изменения сигнала по полю. Согласование с каналом в соответствии с теорией связи (К. Шеннон) обусловило использование адаптивного выбора участков спектра с учетом отношения сигнал / шум, что привело к появлению крупного направления в технике связи — программной перестройке радиочастот.

Цифровое прикладное телевидение, лишь иногда обращаясь к стандартам вещательного телевидения семейства *DVB*, широко использует интерфейсы *USB*, *Ethernet*, *SpaceWare*. Реализуемые на ЭВМ алгоритмы обработки изображений имеют итеративный по пространству и времени характер. Миниатюризация элементной базы и применение ЭВМ создали предпосылки для встраивания в телекамеры сначала простейших вычислительных устройств для фильтрации и конвертации видеоданных, а затем и полноценных контроллеров для реализации алгоритмов адаптации (изменения) некоторых параметров камеры к условиям съемки и потребностям оператора. Персональные компьютеры (ПК) широко используются для постобработки изображений в лабораторных условиях.

Пятый этап: твердотельное телевидение — приборы с зарядовой связью

В оптической астрономии идея адаптации связана в первую очередь с потребностью преодоления случайных искажений изображения атмосферой Земли: мерцание звезд восхищает поэтов, но раздражает астрономов. Это породило крупное научное направление адаптивной оптики, главной идеей которого стала «преддетекторная» обработка оптических сигналов для парирования искажений волнового фронта управляемыми сегментами главного зеркала телескопа ⁴⁸.

Требуемые для этого скорости и точности ⁴⁹ стали возможны только в эпоху твердотельного телевидения, в котором реализуется адаптация кадровой частоты ⁵⁰. Об адаптации в телевидении впервые заявлено во весь голос, когда «флаг» переменности параметров разложения сразу был вынесен в название книги ⁵¹.

Эта тема продолжена в ряде последующих книг научной школы НИИ телевидения. Первый этап твердотельного телевидения в силу «самосканирования» изображения и отсутствия остаточных сигналов после считывания (безынерционность) сразу открыл возможность перестройки множества

⁴⁸ См.: Воронцов М. А., Корябин А. В., Шмальгаузен В. И. Эффективность адаптивных оптических систем в условиях турбулентной атмосферы // Известия вузов. Радиофизика. 1984. Т. 27. № 3. С. 284–293.

⁴⁹ См.: Лукин В. П. Применение технологий адаптивной оптики для расширения возможностей оптико-электронных систем // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XV Международный научный конгресс, 24–26 апреля 2019 г., Новосибирск: сб. материалов в 9 т. Ред. А. В. Шабурова, П. С. Завьялов, Ю. В. Чугуй. Новосибирск: СГУГиТ, 2019. Т. 8: Национальная конференция с международным участием «СибОптика-2019». С. 115–138.

⁵⁰ См.: Цыцулин. Телевидение и космос...

⁵¹ Хромов Л. И., Лебедев Н. В., Цыцулин А. К., Куликов А. Н. Твердотельное телевидение. М.: Радио и связь, 1986.

параметров телекамер, хотя и получил в наследство от электронно-лучевого телевидения акцент на перестройку, а не адаптацию. Вместе с тем линейность свет-сигнальной характеристики, безынерционность и простота реализации «электронного затвора», позволяющего сделать время накопления меньшим времени кадра, открыли возможность построения телекамер с автоматической регулировкой чувствительности⁵². Такая регулировка при использовании различных эмпирических критериев даже при фиксированных кадровой частоте и четкости позволяет обеспечить работу телекамеры при изменении освещенности более чем в миллион раз, а при снижении кадровой частоты и четкости расширить этот диапазон еще на несколько порядков. В дополнение к методам изменения времени накопления при фиксированной кадровой частоте в прикладных цветных телекамерах на ПЗС широко используется переход от дневного режима передачи цветного изображения к ночному режиму передачи черно-белого изображения.

Возможности твердотельной технологии позволили изобрести великое множество методов адаптации, принципиально недоступных в электронно-лучевом телевидении. Так, впервые в мире научной школе ВНИИТ удалось реализовать переменную по полю четкость непосредственно в фотоприемной матрице, а не во внешней ЭВМ (1989). Такое адаптивное к координатам исследуемого объекта стробирование («окно интереса») впоследствии было повторено за рубежом и получило название по аналогии со свойствами сетчатки глаза *foveal vision*. На этом же этапе был проработан вариант адаптивного считывания с разными частотами считывания на фоновом поле и в строке интереса для снижения шума считывания. Другими яркими примерами являются организация ряда дополнительных каналов считывания для формирования сигналов управления накоплением⁵³ и специальная матрица ПЗС с двумя ячейками памяти на каждый накопительный фотодиод, работающими с разным временем накопления.

Принцип итераций стал важной составной частью теоретического синтеза прикладных телевизионных систем на основе формализованных априорной информации, критериев качества и ограничений⁵⁴. В частности, концепция перестройки параметров распространена на этапы наблюдения. На первой итерации наблюдения объекта обеспечивается максимум отношения сигнал / шум, на второй – минимум ошибки оценки координат обнаруженных объектов⁵⁵.

⁵² См.: *Cvetkovic S., Jellema H., With N. H. P., de. Automatic Level Control for Video Cameras towards HDR Techniques // EURASIP Journal on Image and Video Processing. 2010. ID 197194. P. 1–30; Лебедев Н. В., Куликов А. Н. Высокочувствительные и мегапиксельные телекамеры НПФ «ЭВС» для систем безопасности // https://www.evs.ru/publ_1.php?st=11; Цыцулин А. К., Лысенко Н. В., Манцетов А. А., Баранов П. С., Бобровский А. И. Автоматическое управление чувствительностью в телевизионных системах // Оптический журнал. 2019. Т. 86. Вып. 9. С. 30–37.*

⁵³ См.: *Хромов Л. И., Цыцулин А. К., Куликов А. Н. Видеоинформатика. М.: Радио и связь, 1991.*

⁵⁴ См.: *Цыцулин, А. К., Бобровский А. И. К столетию принципа доминанты // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2022. Вып. 2. С. 84–93.*

⁵⁵ См.: *Твердотельная революция в телевидении: телевизионные системы на основе приборов с зарядовой связью, систем на кристалле и видеосистем на кристалле / Ред.*

Этот этап характеризуется внедрением микроЭВМ в создание бортовых систем прикладного телевидения (значение ПК для исследований и разработок увеличивается).

Шестой этап: КМОП фотоприемные матрицы и видеосистемы на кристалле

Эта итерация в дополнение ко всем преимуществам ПЗС открыла возможности реализации рядом с фоточувствительным массивом множества АЦП и устройств параллельной обработки сигналов до считывания информации с кристалла, что существенно повышает чувствительность и быстродействие телевизионно-вычислительных систем. Понимание революционности такого изменения не только технологии, но и способов функционирования КМОП фотоприемников и видеосистем на кристалле на их основе, позволила изобретателю активного пиксела Фоссаму еще в 1993 г. назвать матрицы ПЗС динозаврами ⁵⁶.

Многие методы адаптации, изобретенные на этапе ПЗС-фотоприемников, реализованы в КМОП СБИС. Такая реализация стимулировала ряд изобретений, которые еще ждут своего внедрения в практику прикладного телевидения. Например, идея адаптации кадровой частоты, выдвинутая в XX в., получила свою практическую реализацию (именно адаптации, а не просто программной или ручной перестройки) в XXI в. ⁵⁷ Многоликая адаптация может быть охарактеризована следующими результатами:

- предложена адаптация четкости с помощью управляемого группирования сигналов соседних пикселей в КМОП фотоприемных матрицах, которая может быть реализована с помощью специальной последовательности (петлевая, или Z-развертка, Э. Фоссам, 1996) ⁵⁸;

- предложены КМОП фотоприемная матрица с двумя группами АЦП разного быстродействия и разрядности для расширения диапазона реализуемых кадровых частот и предсказанная Катаевым передача телевизионных сигналов с разными кадровыми частотами в выделенном окне интереса и на остальном фоне, которая нашла свое воплощение в КМОП фотоприемных матрицах с возможностью многооконной системы считывания сигнала для обнаружения — сопровождения группы объектов ⁵⁹;

- предложена видеосистема на кристалле на основе фотоприемной матрицы с глубинным цветоделением для адаптации спектральной характеристики телевизионной системы обнаружения объектов к изменениям спектральных характеристик объекта и фона (2013), а также видеосистема на кристалле для автоматической стабилизации изображений, включающая два дополнительных скоростных линейных фотоприемника (2010) ⁶⁰;

А. А. Умбиталиев, А. К. Цыцулин. М.: Радио и связь, 2006.

⁵⁶ Fossum E. R. Active Pixel Sensor — Are CCD's Dinosaurs? Charge-Coupled Devices and Optical Sensors III // Proceedings of SPIE. 1993. Vol. 1900. P. 2—14.

⁵⁷ См.: Твердотельная революция в телевидении... С. 229—235.

⁵⁸ Fossum. Active Pixel Sensor...

⁵⁹ См.: Теория и практика космического телевидения...

⁶⁰ См.: Цыцулин, Адамов, Манцетов, Зубакин. Твердотельные телекамеры...

– реализована система с переменной по полю четкостью, включающая нейросетевой обнаружитель подвижного объекта, дополненная фильтрами коррекции смаза с различными параметрами для автоматически выделенного окна интереса и фона⁶¹. Исследована адаптация кадровой частоты в интересах увеличения горизонта обнаружения кооперируемых КА телевизионной системой контроля сближения, формализованы критерии и уравнения управления кадровой частотой и состояния системы. Реализована адаптация кадровой частоты с ее повышением сверх возможной при предельной четкости с ее снижением бинарированием; формализованы критерии (2012) и уравнения управления кадровой частотой и состояния системы (2017)⁶²;

– предложена и реализована адаптация кадровой частоты и времени накопления к скорости движения автономного необитаемого подводного аппарата, к дистанции съемки и к прозрачности воды, а также мощности осветителя⁶³ и спектрального состава излучения осветителя⁶⁴.

На этом этапе внедрение микроЭВМ, сделавшихся неотъемлемой частью бортовых систем прикладного телевидения, дополняется видеосистемами на кристалле. Как на более ранних этапах в обработку изображений внедрялись компьютеры, так на этом этапе широко внедряются нейросетевые методы и технологии. Реализация «дообучения» или переобучения (обучения с «нуля») нейросетевого распознавателя изображений объектов для новых условий эксплуатации является одним из примеров использования принципа адаптации. Очевидно, что обучение нейросетевых вычислителей является не только примером процесса адаптации (настройки) параметров сети, но и примером итерационного процесса.

⁶¹ См.: Цыцулин А. К., Павлов В. А., Бобровский А. И., Морозов А. В., Зубакин И. А. Адаптивное кодирование изображений, делимых на доминантный объект и фон // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2019. Вып. 3. С. 75–85.

⁶² См.: Цыцулин А. К., Девяткин А. В., Бобровский А. И., Морозов А. В., Горшанов Д. Л., Павлов В. А. Адаптация кадровой частоты к этапам наблюдения в системе контроля сближения космических аппаратов // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2019. Вып. 1. С. 31–38; Цыцулин А. К., Бобровский А. И., Морозов А. В. Синтез космической системы наблюдения при широком диапазоне изменения дальности до объекта // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2020. Вып. 2. С. 19–37; Бобровский А. И. Уравнения управления параметрами работы фотоприемной матрицы в прикладных телевизионных системах, адаптивных к динамике наблюдаемой сцены // 21-я Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA-2019», Москва, Россия, доклады. В 2 кн. М.: Московское НТО радиотехники, электроники и связи им. А. С. Попова, 2019. Кн. 2. С. 463–466; Цыцулин А. К., Бобровский А. И., Морозов А. В., Пятков В. В., Лыкова Е. М. Итерационный принцип видеоконтроля сближения космических аппаратов // Труды XVI Всероссийских научных чтений «Научно-технические проблемы в промышленности: будущее сильной России – в высоких технологиях» / Ред.-сост. В. М. Балашов. СПб., 2022. С. 192–214.

⁶³ См.: Сергеев В. В., Карнов В. Н., Прибылов Ю. С., Пшеничная О. К., Соколов В. А. Современные технологии подводного видения. Адаптивная система фото и видео регистрации для автономных необитаемых подводных аппаратов // Деловой журнал Neftegaz.RU. 2020. № 8 (104). С. 40–45.

⁶⁴ Попов В. В. Априорная неопределенность и адаптация освещения при подводном наблюдении // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2023. Вып. 1. С. 9–22.

Заключение

Проведенный обзор является первым систематическим изложением применения принципов и методов итерации и адаптации в технике телевидения, охватывающим весь полуторавековой период ее развития. Обзор показал, что при абстрагировании от «пересечений» этапов развития техники их можно трактовать как итерации повышения качества видеoinформации и повышения производительности создания видеoinформации телекамерами на единицу их массы в единицу времени.

Анализ приложения обсужденных принципов подчеркнул их глубокие философские корни, относящиеся к целенаправленным действиям, и выявил множество пересечений при их реализации в прикладном телевидении. Например, автоматическое изменение параметров телевизионной системы на разных этапах сближения наблюдателя с объектом имеет полезные трактовки с позиций принципов и адаптации, и итераций.

Итерационные изменения технологий и теорий прослеживаются на всех этапах развития прикладного телевидения и сопровождаются постоянным наращиванием арсенала взаимопроникающих итерационных и адаптивных методов — в эпохи механического, электронного и твердотельного телевидения. Периодизация развития техники телевидения выше уточнена, в частности, путем обоснованного выделения в самостоятельный этап периода сложных аналого-цифровых КМОП фотоприемников, открывших путь к созданию видеосистем на кристалле.

Важно, что развитие техники телевидения характеризуется как освоением соответствующих новых технологий, так и повышением уровня теоретического осмысления функционирования систем прикладного телевидения. Ярким примером взаимосвязи технологий и теорий является соответствие переходов механическое телевидение — электронное телевидение — твердотельное телевидение (подразделенное на этапы ПЗС и КМОП) с совершенствованием теоретического понимания сути преобразований сигналов в фотоприемниках: сначала их трактовали как накопление заряда, затем — накопление сигнала, затем — накопление информации и, наконец, — накопление качества информации.

В развитие методов адаптации прикладных телевизионных систем на всех этапах его развития заметный вклад внесла научная школа НИИ телевидения (в свое время Всесоюзного) — ею был теоретически обоснован и запатентован широкий ряд решений в части методов адаптации телевизионных систем (фотоприемников, видеотракта, компьютерной обработки).

Перспективы расширения применения методов итераций и адаптации в прикладном телевидении связаны с усилением роли видеосистем на кристалле, а также с расширением методов, критериев и приложений адаптации в направлении внедрения и развития методов искусственного интеллекта и, в частности, нейросетевых методов обработки телевизионных сигналов как в системах кодирования и передачи, так и принятия решений.

References

- Adamar, Zh. (Hadamard, J.) (2013) *Issledovanie psikhologii protsessa izobretenii v oblasti matematiki [The Psychology of Invention in the Mathematical Field]*. Moskva: Kniga po trebovaniu.

- Arkhangel'skii, V. I. (1936) *Televidenie [Television]*. Moskva: Gosudarstvennoe izdatel'stvo po voprosam radio.
- Avanesov, G. A. (2019) Zvezdnye datchiki orientatsii kosmicheskikh apparatov. Eshche odna professiia sovremennogo televideniia [Star Sensors for Spacecraft Orientation. Another Profession of Modern Television], *Voprosy radioelektroniki, seriia: Tekhnika televideniia*, no. 3, pp. 5–14.
- Bekon, F. (Bacon, F.) (2018) *Novyi organon [The New Organon]*. Moskva: RIPOL klassik.
- Bellman, R. (Bellman, R.) (1969) *Vvedenie v teoriu matrits [Introduction to Matrix Analysis]*. Moskva: Nauka.
- Bleikhut, R. (Blahut, R.) (1989) *Bystrie algoritmy tsifrovoy obrabotki signalov [Fast Algorithms for Digital Signal Processing]*. Moskva: Mir.
- Blinov, V. I., and Urvalov, V. A. (1991) B. L. Rozing [B. L. Rosing]. Moskva: Prosveshchenie.
- Bobrovskii, A. I. (2019) Uravneniia upravleniia parametrami raboty fotopriemnoi matritsy v prikladnykh televizionnykh sistemakh, adaptivnykh k dinamike nabludaemoi tseny [The Equations of the Control Parameters of the Photodetector Matrix in the Applied Television Systems, Adaptive to the Dynamics in the Scene], in: *21-ia Mezhdunarodnaia konferentsiia "Tsifrovaia obrabotka signalov i ee primenenie – DSPA-2019"*, Moskva, Rossiia, doklady. V 2 kn. [21st International Conference "Digital Signal Processing and Its Application – DSPA-2019", Moscow, Russia, Reports. In 2 books]. Moskva: Moskovskoe NTO radiotekhniki, elektroniki i sviazi im. A. S. Popova, book 2, pp. 463–466.
- Bordukov, G. S., Bratslavets, P. F., Resin, V. I., and Khromov, L. I. (1971) Televizionnye sistemy s perestraivaimymi parametrami [Television Systems with Tunable Parameters], *Tekhnika kino i televideniia*, no. 4, pp. 50–56.
- Borisov, V. P. (2002) *Vladimir Koz'mich Zvorykin, 1889–1982 [Vladimir Kosma Zworykin, 1889–1982]*. Moskva: Nauka.
- Borisov, V. P. (2004) *Vladimir Koz'mich Zvorykin [Vladimir Kosma Zworykin]*. Moskva: Nauka.
- Borisov, V. P. (2007) Rozhdenie televideniia v Strane Sovetov (k 75-letiiu otechestvennogo televeshchaniia) [The Birth of Television in the Soviet Country (On the 75th Anniversary of Television Broadcasting)], *Voprosy istorii estestvoznaniia i tekhniki*, no. 1, pp. 109–131.
- Borisov, V. P. (2013) *Vladimir Koz'mich Zvorykin [Vladimir Kosma Zworykin]*. Moskva: Molodaia gvardiia.
- Braude, G. V. (1967) Korrektsiia televizionnykh impul'snykh signalov: sb. statei [Correction of Television Pulse Signals. A Collection of Articles]. Moskva: Sviaz', pp. 99–220.
- Braun Karl Ferdinand [Braun Karl Ferdinand] (1983), in: Khramov, Iu. A. *Fiziki: biograficheskii spravochnik [Physicists: A Biographical Reference Book]*. Moskva: Nauka.
- Cvetkovic, S., Jellema, H., and With, N. H. P., de (2010) Automatic Level Control for Video Cameras towards HDR Techniques, *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, ID 197194, pp. 1–30.
- Denisko, L. S. (2021) Formirovanie poniatiiia "sotsial'no-psikhologicheskaiia adaptatsiia" na osnove teoreticheskogo analiza psikhologo-pedagogicheskoi literatury v sovremennoi psikhologii [Formation of the Concept of "Social and Psychological Adaptation," Based on the Theoretical Analysis of Psychological and Pedagogical Literature in Modern Psychology], *Molodoi uchenyi*, no. 9 (351), pp. 171–173.
- Feagin, T., and Nacozy, P. (1983) Matrix Formulation of the Picard Method for Parallel Computation, *Celestial Mechanics*, vol. 29, no. 2, pp. 107–115.
- Fisher, R. (1958) *Statisticheskie metody dlia issledovatelei [Statistical Methods for Researchers]*. Moskva: Gosstatizdat.
- Fossum, E. R. (1993) Active Pixel Sensor – Are CCD's Dinosaurs? Charge-Coupled Devices and Optical Sensors III, *Proceedings of SPIE*, vol. 1900, pp. 2–14.
- Gorokhov, P. K. (1960) Istoriia razvitiia televideniia [History of Television Development], *Radioelektronika*, no. 5, pp. 22–35.
- Gurevich, S. B. (1970) Teoriia i raschet neveshchatel'nykh sistem televideniia [Theory and Calculation of Non-Broadcasting Television Systems]. Leningrad: Energiia.
- Ivanov, V. B. (2009) Rabota VNIIT v mezhdunarodnom proekte EPAS – eksperimental'nyi polet kosmicheskikh korablei «APOLLON» i «SOIUZ-19» [The Work of the All-Union Research

- Institute of Television in the ASTP International Project (Apollo-Soyuz Text Project)], *Voprosy radioelektroniki, seriia: Tekhnika televideniia*, no. 1, pp. 94–101.
- Ivanov, V. G. (2007) Tverdotel'naia revoliutsiia v televidenii. K istorii nachal'nogo etapa [Solid-State Revolution in Television. On the History of the Inception Stage], *Voprosy radioelektroniki, seriia: Tekhnika televideniia*, no. 1, pp. 130–137.
- Kataev, S. I. (1937) Vozmozhnost' peredachi televizionnoi kartiny s pomoshch'iu uzkoj polosy chastot [The Possibility for Television Picture Transmission Using Narrow Frequency Band], *Radiotekhnika*, no. 2, pp. 71–80.
- Kataev, S. I. (1953) *Sovremennnye problemy televideniia [Current Problems of Television]*. Moskva: Znanie.
- Keldysh, M. V. (1980) *Tvorcheskoe nasledie Sergeia Pavlovicha Koroleva. Izbrannye trudy i dokumenty [The Creative Legacy of Sergei Pavlovich Korolev. Selected Works and Documents]*. Moskva: Nauka.
- Khromov, L. I., Kovrigin, A. B., and Martynikhin, A. V. (1991) Printsip dvoistvennosti v teorii informatsii [Duality Principle in Information Theory], *Tekhnika sredstv svyazi, seriia: Tekhnika televideniia*, no. 3, pp. 3–11.
- Khromov, L. I., Lebedev, N. V., Tsytulin A. K., and Kulikov, A. N. (1986) *Tverdotel'noe televidenie [Solid-State Television]*. Moskva: Radio i svyaz'.
- Khromov, L. I., Tsytulin, A. K., and Kulikov, A. N. (1991) *Videoinformatika [Videoinformatics]*. Moskva: Radio i svyaz'.
- Kolmogorov, A. N. (1987) *Teoriia informatsii i teoriia algoritmov [Information Theory and the Theory of Algorithms]*. Moskva: Nauka.
- Lebedev, N. V., and Kulikov, A. N. Vysokochuvstvitel'nye i megapiksel'nye telekamery NPF “EVS” dlia sistem bezopasnosti [NPF EVS' High-Sensitivity and Megapixel Television Cameras for Security Systems], https://www.evs.ru/publ_1.php?st=11.
- Lem, S. [Lem, S.] (1968) *Summa tekhnologii [Summa Technologies]*. Moskva: Mir.
- Lukin, V. P. (2019) Primenenie tekhnologii adaptivnoi optiki dlia rasshireniia vozmozhnostei optiko-elektronnykh sistem [Application of Adaptive Optics Technologies for Expanding the Capabilities of Optical-Electronic Systems], in: Shaburova, A. V., Zav'ialov, P. S., and Chugui, Iu. V. (eds.) *Interesko GEO-Sibir'. XV Mezhdunarodnyi nauchnyi kongress, 24–26 apreliia 2019 g., Novosibirsk: sb. materialov v 9 t. [Interexpo GEO-Siberia. 15th International Scientific Congress, April 24–26, 2019, Novosibirsk: Collection of Materials in 9 vols.]*. Novosibirsk: SGUGiT, vol. 8: Natsional'naia konferentsiia s mezhdunarodnym uchastiem “SibOptika-2019” [National Conference with International Participation “SibOptika-2019”], pp. 115–138.
- Mandrazhi, V. P., and Novik, D. A. (1962) Nekotorye svoistva tsifrovyykh televizionnykh sistem s nepostoiannoi chastotoi strok i kadrov [Some Properties of Digital Television Systems with Variable Line and Frame Rates], *Radiotekhnika*, vol. 17, no. 10, pp. 35–44.
- Merkulov, D. (2006) Televideniiu — 80 let [80 Years of Television], *Nauka i zhizn*, no. 1, pp. 76–80.
- Novik, D. A. (1958) K voprosu o srednei sostavliaiushchei televizionnogo signala i metodakh ee polucheniia [On the Central Component of Television Signal and the Methods for Obtaining It], *Radiotekhnika*, vol. 13, no. 7, pp. 63–67.
- Penrouz, V. (Penrose, R.) (2011) *Novyi um korolia: o komp'iuterakh, myshlenii i zakonakh fiziki [The Emperor's New Mind: Concerning Computers, Thinking, and the Laws of Physics]*. Moskva: URSS and Izdatel'stvo LKI.
- Perskii, K. D. (1901) Sovremennoe sostoianie voprosa ob elektrovidenii na rasstoianie (televizirovanie) [Current State of the Problem of Remote Electrovision (Television)], in: Smirnov, A. I., and Georgievskii, N. N. (eds.) *Trudy Pervogo Vserossiiskogo elektrotekhnicheskogo s"ezda [Proceedings of the First All-Russian Electrotechnical Congress]*. Sankt-Peterburg: Tipografiia P. V. Martynova, vol. 2, pp. 346–362.
- Petrov, B. N., Rutkovskii, V. Iu., Krutova, I. N., and Zemliakov, S. D. (1972) *Printsipy postroeniia i proektirovaniia samonastraiavaiushchikhsia sistem upravleniia [Principles of Construction and Design of Self-Adjusting Control Systems]*. Moskva: Mashinostroenie.
- Popov, V. V. (2023) Apriornaia neopredelennost' i adaptatsiia osveshcheniia pri podvodnom nabludenii [A Priori Uncertainty and Adaptation of Illumination in Underwater Observations], *Voprosy radioelektroniki, seriia: Tekhnika televideniia*, no. 1, pp. 9–22.

- Prett, U. (Pratt, W.) (1982) *Tsifrovaia obrabotka izobrazheniy [Digital Image Processing]*. Moskva: Mir, books 1–2.
- Sagdullaev, Iu. S., and Kovin, S. D. (2023) *Spektral'naiia selektsiia ob"ektov v sistemakh tekhnicheskogo zreniia [Spectral Selection of Objects in Machine Vision Systems]*. Moskva: Sputnik+.
- Samokhin, V. (2009) Boris Rosing, Vladimir Zvorykin i televidenie [Boris Rosing, Vladimir Zvorykin and Television], *625 (journal)*, no. 10, pp. 23–27.
- Selivanov, A. S. (2009) Vklad Rossiiskogo NII kosmicheskogo priborostroeniia v razvitie kosmicheskogo televideniia [Contribution of the Russian Research Institute of Space Instrumentation to the Development of Space Television], *Voprosy radioelektroniki, seriia: Tekhnika televideniia*, vol. 1, pp. 38–47.
- Sergeev, V. V., Karpov, V. N., Pribylov, Iu. S., Pshenichnaia, O. K., and Sokolov, V. A. (2020) Sovremennye tekhnologii podvodnogo videniia. Adaptivnaia sistema foto i video registratsii dlia avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov [Modern Underwater Vision Technologies. Adaptive Photo and Video Recording System for Autonomous Unmanned Underwater Vehicles], *Delovoi zhurnal Neftegaz.RU*, no. 8 (104), pp. 40–45.
- Shannon, K. (Shannon, C.) (1963) *Raboty po teorii informatsii i kibernetike [Works on Information Theory and Cybernetics]*. Moskva: Inostrannaia literatura.
- Shiriaev, A. N. (1976) *Statisticheskii posledovatel'nyi analiz: optimal'nye pravila ostanovki. 2-e izd. [Statistical Sequential Analysis: Optimal Stopping Rules. 2nd ed.]*. Moskva: Nauka.
- Siforov, V. I., and Iaroslavskii, L. P. (1988) *Adaptivnye metody obrabotki izobrazhenii: sbornik nauchnykh trudov [Adaptive Methods of Image Processing. A Collection of Scientific Papers]*. Moskva: Nauka.
- Solomonik, A. B. (2014) *Opyt sovremennoi teorii poznaniia [Experience of the Modern Theory of Knowledge]*. Sankt-Peterburg: Aleteiia, pp. 122–145.
- Spenser, G. (Spencer, H.) (1999) *Opyty nauchnye, politicheskie i filosofskie [Essays: Scientific, Political, and Speculative]*. Minsk: Sovremennyi literator.
- Stratonovich, R. L. (1960) *Izbrannye voprosy teorii fluktuatsii v radiotekhnike [Selected Issues of Fluctuation Theory in Radio Engineering]*. Moskva: Sovetskoe radio.
- Tartakovskii, A. G. (1988) Obnaruzhenie signalov so sluchainymi momentami poiaivleniia i ischeznoventiia [Detection of Signals with Random Moments of Appearance and Disappearance], *Problemy peredachi informatsii*, vol. 24, no. 2, pp. 39–50.
- Tsukkerman, I. I. (ed.) (1981) *Tsifrovoe kodirovanie televizionnykh izobrazhenii [Digital Coding of Television Images]*. Moskva: Radio i sviaź.
- Tsyppin, Ia. Z. (1968) *Adaptatsiia i obuchenie v avtomaticheskikh sistemakh [Adaptation and Training in Automatic Systems]*. Moskva: Nauka.
- Tsytsulin, A. K. (2014) *Televidenie i kosmos [Television and Space]*. Sankt-Peterburg: Izdatel'stvo SPBGETU "LETI", 2014.
- Tsytsulin, A. K., Adamov, D. Iu., Mancvetov, A. A., and Zubakin, I. A. (2014) *Tverdotel'nye telekamery: nakoplenie kachestva informatsii [Solid-State Television Cameras: Accumulation of Information Quality]*. Sankt-Peterburg: Izdatel'stvo SPBGETU "LETI".
- Tsytsulin, A. K., and Bobrovskii, A. I. (2022) K stoletiiu printsipa dominanty [Towards the Centenary of the Principle of Dominance], *Voprosy radioelektroniki, seriia: Tekhnika televideniia*, no. 2, pp. 84–93.
- Tsytsulin, A. K., Bobrovskii, A. I., and Morozov, A. V. (2020) Sintez kosmicheskoi sistemy nabludeniia pri shirokom diapazone izmeneniia dal'nosti do ob"ekta [Synthesis of a Space Surveillance System for a Wide Range of Changes in the Distance to an Object], *Voprosy radioelektroniki, seriia: Tekhnika televideniia*, no. 2, pp. 19–37.
- Tsytsulin, A. K., Bobrovskii, A. I., Morozov, A. V., Piatkov, V. V., and Lykova, E. M. (2022) Iteratsionnyi printsip videokontrolia sblizheniia kosmicheskikh apparatov [Iterative Principle of Video Monitoring of Spacecraft Rendezvous], in: Balashov, V. M. (ed.) *Trudy XVI Vserossiiskikh nauchnykh chtenii "Nauchno-tekhnicheskie problemy v promyshlennosti: budushchee sil'noi Rossii – v vysokikh tekhnologiakh" [Proceedings of the 16th All-Russian Scientific Readings "Scientific and Technical Problems in Industry: The Future of a Strong Russia Is in High Technologies"]*. Sankt-Peterburg, pp. 192–214.

- Tsytsulin, A. K., Deviatkin, A. V., Bobrovskii, A. I., Morozov, A. V., Gorshnov, D. L., and Pavlov, V. A. (2019) Adaptatsiia kadrovoi chastoty k etapam nabliudeniia v sisteme kontrolya sblizheniia kosmicheskikh apparatov [Frame Rate Adaptation to Observation Stages in Spacecraft Rendezvous Control System], *Voprosy radioelektroniki, seriia: Tekhnika televideniia*, no. 1, pp. 31–38.
- Tsytsulin, A. K., Lysenko, N. V., Mantsvetov, A. A., Baranov, P. S., and Bobrovskii, A. I. (2019) Avtomaticheskoe upravlenie chuvstvitel'nost'iu v televizionnykh sistemakh [Automatic Sensitivity Control in Television Systems], *Opticheskii zhurnal*, vol. 86, no. 9, pp. 30–37.
- Tsytsulin, A. K., Pavlov, V. A., and Bobrovskii, A. I. (2019) Adaptivnoe kodirovanie izobrazhenii, razdelimyykh na dominantnyi ob"ekt i fon [Adaptive Coding of Images Separable into a Dominant Object and a Background], *Voprosy radioelektroniki, seriia: Tekhnika televideniia*, no. 3, pp. 75–85.
- Umbitaliev, A. A., and Tsytsulin, A. K. (2006) *Tverdotel'naiia revoliutsiia v televidenii: televizionnye sistemy na osnove priborov s zariadovoi svyaz'iu, sistem na kristalle i videosistem na kristalle* [Solid-State Revolution in Television: Television Systems Based on Charge Coupling Devices, Crystal-Based Systems and Crystal-Based Video Systems]. Moskva: Radio i svyaz'.
- Umbitaliev, A. A., Tsytsulin, A. K., and Piatkov, V. V. (2017) *Teoriia i praktika kosmicheskogo televideniia* [Theory and Practice of Space Television]. Moskva. Radio i svyaz', 2017.
- Urvalov, V. A. (1990) *Ocherki istorii televideniia* [Essays on the History of Television]. Moskva: Nauka.
- Val'd, A. (Wald, A.) (1960) *Posledovatel'nyi analiz* [Sequential Analysis]. Moskva: Fizmatgiz.
- Viner, N. (Wiener, N.) (1968) *Kibernetika, ili upravlenie i svyaz' v zhivotnom i mashine* [Cybernetics: Or Control and Communication in the Animal and the Machine]. Moskva: Sovetskoe radio.
- Vorontsov, M. A., Koriabin, A. V., and Shmal'gauzen, V. I. (1984) Effektivnost' adaptivnykh opticheskikh sistem v usloviakh turbulentnoi atmosfery [Efficiency of Adaptive Optical Systems in a Turbulent Atmosphere], *Izvestiia vuzov. Radiofizika*, vol. 27, no. 3, pp. 284–293.
- Zubarev, Iu. B., and Gloriov, G. L. (1994) *Televizionnaia tekhnika: spravochnik* [Television Technology: A Reference Book]. Moskva: Radio i svyaz'.

Received: September 20, 2023.

Accepted: December 21, 2023.