

ISSN 2312-4997

АВТОМАТИКА и ПРОГРАММНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ

2015 N 3(13)

Главный редактор д.т.н., доцент **В.А. Жмудь**, заведующий кафедрой автоматике
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет» (НГТУ), зам. директора
ПАО «Новосибирский институт программных систем» (НИПС), **Россия**
Ответственный секретарь д.т.н., доцент **Г.А. Французова**, НГТУ, **Россия**

Редакционная коллегия:

Александр Валерьевич Ляпидевский	Директор ПАО «Новосибирский институт программных систем» (ПАО «НИПС»), к.э.н., Россия
Анатолий Сергеевич Востриков	Профессор кафедры Автоматики НГТУ, д.т.н., Заслуженный преподаватель РФ, академик МАН ВШ, Россия
Евгений Борисович Цой	Проректор по международным связям НГТУ, профессор, д.т.н. Новосибирский государственный технический университет, Россия
Владимир Иванович Гужов	Профессор кафедры Вычислительной техники Новосибирский государственный технический университет, Россия
Shiva S. Mahapatra	Professor in the Department of Mechanical Engineering, NIT Rourkela, India
Hubert Roth	Head of the Department of Automatic Control Engineering of University if Siegen, Professor, Germany
You Bo	Director of Institute of Robotics and Automation Technology, Dean of School of Automation, Professor, Harbin University of Science and Technology, China
Любомир Ванков Димитров	Декан машиностроительного факультета Технического университета Софии, доктор, профессор, Болгария
Ярослав Носек	Профессор факультета мехатроники, информатики и междисциплинарного образования Технического университета г. Люберец, доктор, Чехия
Петр Тума	Профессор факультета мехатроники, информатики и междисциплинарного образования Технического университета г. Люберец, доктор, Чехия
Неъматжон Рахимович Рахимов	Руководитель лаборатории «Оптоэлектронного метода неразрушающего контроля» СГГА, профессор, д.т.н., Россия, Узбекистан
Геннадий Павлович Цапко	Профессор кафедры автоматике и компьютерных систем Национального исследовательского Томского политехнического университета (НИТПУ), директор Научно-образовательного центра CALS-технологий, профессор, д.т.н., академик Международной академии информатизации, Россия
Александр Максимович Малышенко	Профессор кафедры интегрированных компьютерных систем управления НИТПУ, д.т.н., академик МАН ВШ и Академии электротехнических наук РФ, Россия

Василий Васильевич Губарев	Заведующий кафедрой Вычислительной техники НГТУ, профессор, д.т.н., Заслуженный деятель науки, Заслуженный работник высшей школы РФ, академик РАЕН, академик МАИ, Россия
Александр Александрович Воевода	Профессор кафедры Автоматики НГТУ, д.т.н., академик МАН ВШ, Россия
Вадим Яковлевич Копп	Заведующий кафедрой автоматизированных приборных систем Севастопольского национального технического университета, Заслуженный деятель науки и техники Украины, д.т.н., профессор, Севастополь, Россия
Евгений Владимирович Рабинович	Профессор кафедры Вычислительной техники НГТУ, д.т.н., профессор, Россия
Михаил Геннадьевич Гриф	Заведующий кафедрой Автоматизированных систем управления НГТУ, д.т.н., профессор, Россия
Vimal J. Savsani	Associate Professor at V. N. Gardi college of engineering and technology, Surat, India
Борис Дмитриевич Борисов	Заведующий лабораторией Института Лазерной физики СО РАН (ИЛФ СО РАН), д.т.н., Россия
Сергей Леонидович Миньков	Заведующий кафедрой информационного обеспечения инновационной деятельности Национального исследовательского университета «Томский государственный университет», к.ф.-м.н., ст. н. сотр., чл.-корр. МАИ, Россия
Борис Викторович Поллер	Заведующий лабораторией Института Лазерной физики СО РАН (ИЛФ СО РАН), д.т.н., Россия
Татьяна Владимировна Авдеенко	Заведующий кафедрой Экономической информатики НГТУ, профессор, д.т.н., Россия
Баярын Бат-Эрдэнэ	Заместитель директора по научным исследованиям и инновациям Энергетического Института Монгольского государственного университета науки и технологии, к.т.н. асс. профессор. Монголия
Анатолий Михайлович Корилов	Зав. кафедрой автоматизированных систем управления и радиоэлектроники ТУСУРа, профессор, д.т.н., акад. МАН ВШ, специалист в области системного анализа и ТАУ. Россия
Виталий Сергеевич Щербаков	Декан факультета «Нефтегазовая и строительная техника», д.т.н., профессор СибАДИ, Омск, Россия
Алексей Александрович Руппель	И.о. зак. каф. АПП и Э, к.т.н., доцент СибАДИ, Омск, Россия
Сэнгэ Самбуевич Ямпиллов	Профессор каф. «Биомедицинская техника» ПАПП, д.т.н., Улан-Удэ, Россия

Владимир Иванович Гололобов	Руководитель лаборатории ПАО «НИПС», к.т.н., Россия
Михаил Витальевич Калинин	Руководитель отдела ПАО «НИПС», Россия
Константин Витальевич Змеу	Доцент, к.т.н., Заведующий кафедрой Технологий промышленного производства, Инженерной школы Федерального дальневосточного университета, Владивосток, Россия
Thierry Chateau	Head of Department, Professor, Institutute Pascal, Université Blaise Pascal, Clermont Ferrand, France .
Wolfram Hardt	Prodekan für Internationales, Direktor Universitätsrechenzentrum, Professor für Technische Informatik, Technische Universität Chemnitz, Germany
Виктор Петрович Мельчинов	К.ф.-м.н., доцент, заведующий кафедрой радиотехники и информационных технологий Северо-восточного федерального университета им. М.К. Аммосова, Якутск, Россия
Вячеслав Николаевич Федоров	К.т.н., доцент кафедры радиотехники и информационных технологий Северо-восточного федерального университета им. М.К. Аммосова, Якутск, Россия
Ульяна Анатольевна Михалёва	К.т.н., заведующий кафедрой «Многоканальные телекоммуникационные системы» Технологического института ФГАОУ ВПО «Северо-Восточный Федеральный Университет им. М.К. Аммосова, Якутск, Россия
Николай Дмитриевич Поляхов	Д.т.н., профессор, СПбГЭТУ, член редакционной коллегии журнала «Электричество», член экспертного совета ВАК РФ. Санкт-Петербург, Россия
Олег Владимирович Стукач	Д.т.н., профессор, Заведующий кафедрой Компьютерных измерительных систем и метрологии Национального исследовательского Томского политехнического университета, Томск, Россия
Алексей Дмитриевич Припадчев	Д.т.н., профессор, Заведующий кафедрой летательных аппаратов ФГБОУ ВПО «Ориенбургский государственный университет», Аэрокосмический институт, Оренбург, Россия
Анастасия Дмитриевна Стоцкая	К.т.н., доцент, зам. зав. кафедрой Систем автоматического управления, Санкт-Петербургский Электротехнический университет (ЭТУ ЛЭТИ), Санкт-Петербург, Россия

УДК 681.2; 681.3; 681.5; 681.7

Автоматика и программная инженерия (Automatics & Software Enginery) № 3(13), 2015, ISSN 2312-4997. Основан в июне 2012 г.

Учредитель журнала:

Открытое акционерное общество «Новосибирский институт программных систем»
Сайт организации: www.nips.ru

Свид. о регистрации ПИ № ФС77-55079

Адрес редакции:

630090, Россия, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 6/1,
ОАО «НИПС», заместителю директора по науке

e-mail: oao_nips@bk.ru
web: <http://www.jurnal.nips.ru/>

Подписано в печать 21 октября 2015 г.

Оглавление

I. Автоматика. Автоматизированные системы.....	7
Управление объектом с распределенными параметрами	9
Управление объектом в контуре с обратной связью при использовании неидеальных датчиков положения и ускорения	17
II. Робототехника. Программные средства и системы. Телемеханика и телеметрия.	27
Реализация программного обеспечения для цифровой голографии в среде CUDA.....	29
III. Инновационные технологии. Перспективные технологии. Моделирование систем. Численная оптимизация.....	41
Методы ускорения процесса сборки изделий из тканых материалов.....	43
IV. Измерительные средства и системы. Идентификация.....	49
Корректная идентификация объекта с запаздыванием для управления им.....	51
Модуль воспроизведения звуковых сигналов JQ6500-16P.....	58
V. Популярные статьи. Введение в специальность.	64
Сопоставление вклада погрешностей квантования по времени и по уровню в результат аналогоцифрового преобразования	66
Подавление обратного перерегулирования в системах автоматки.....	71
VI. Дискуссии. Форум. К сведению авторов.....	76
Встраиваемые системы управления. Специфика подготовки специалиста.....	78
Информационный подход к задачам метрологии и физики	80
Требования к публикациям в научном электронном журнале «Автоматика и программная инженерия»	110
Content	113

**I. Автоматика.
Автоматизированные системы.**

Содержание раздела:

- Б.И. Пякилля, В.А. Жмудь. Управление объектом с распределенными параметрами. ФГБОУ ВО НИ ТПУ (Томск, Россия), ФГБОУ ВО НГТУ (Новосибирск, Россия). Автоматика и программная инженерия. 2015. № 3 (13). С. 9–16.
- В.А. Жмудь, В.М. Семибаламут, О.Д. Ядрышников, В.Г. Трубин. Управление объектом в контуре с обратной связью при использовании неидеальных датчиков положения и ускорения. ФГБОУ ВО НГТУ (Новосибирск, Россия), Геофизическая служба СО РАН (Новосибирск, Россия). Автоматика и программная инженерия. 2015. № 3 (13). С. 17–26.

Управление объектом с распределенными параметрами

Б.И. Пякилла, В.А. Жмудь

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия,
Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

Аннотация: Объекты с распределенными параметрами отличаются от динамических объектов с сосредоточенными параметрами, прежде всего тем, что их математическая модель намного сложнее, и вместо дифференциальных уравнений они описываются уравнениями в частных производных. Такие объекты встречаются во множестве технологических процессов в промышленности, на транспорте, в науке и технике. Проектирование управляющих систем для таких объектов на основе принципа отрицательной обратной связи, так же, как и для объектов с распределенными параметрами, состоит в идентификации объекта, выборе структуры регулятора и расчета параметров этого регулятора. Методы аналитического расчета регуляторов могут оказаться чрезвычайно сложными для применения вследствие сложности модели объекта. В последнее время одним из широко применяемых методов анализа и синтеза регуляторов является численная оптимизация, осуществляемая при математическом моделировании системы [1]. В серии работ [1–10] разработан ряд мер по формированию целевой (стоимостной) функции для оптимизации регулятора, эти меры позволяют обеспечить эффективный поиск коэффициентов ПИД-регулятора. При этом разработаны рекомендации о том, как необходимо видоизменить стоимостную функцию, чтобы повысить запас устойчивости в системе, снизить статическую ошибку, уменьшить перерегулирование, устранить или уменьшить обратное перерегулирование, и так далее, включая обеспечение ресурсосбережения. Все эти меры были испробованы для обеспечения оптимизации регулятора, решающего задачу управления объектом с распределенными параметрами, но наилучший результат характеризуется перерегулированием около 22 %, что для многих практических задач может оказаться чрезмерно большим. В работе предложен новый метод управления, который состоит в специальной модификации стоимостной функции. Этот метод позволил снизить перерегулирование до величины около 11 %, что может оказаться предпочтительным для некоторых применений даже несмотря на то,

что длительность переходного процесса в системе при этом увеличилась. Предложенный метод пополняет арсенал методик управления сложными динамическими объектами.

Ключевые слова: регулирование, запаздывание, объект с распределенными параметрами, настройка регулятора, моделирование, симуляция

ВВЕДЕНИЕ

Управление объектом в контуре с отрицательной обратной связью практикуется давно и успешно, развитие теории такого управления идет по пути решения этой задачи для все более сложных объектов.

Традиционно объект управления описывается передаточной функцией, то есть отношением преобразований Лапласа от сигналов на его выходе к сигналам на его входе. Кроме того, на объект воздействуют неизвестные внешние возмущения, которые приводят к тому, что выходной сигнал объекта определяется не только его входными сигналами, но и еще некоторым неизвестным слагаемым, обобщенно называемым помехой. Контур отрицательной обратной связи должен подавить влияние этой помехи, что осуществляется успешно, если система остается устойчивой и коэффициент усиления в контуре достаточно велик. Ошибка управления обратно пропорциональна коэффициенту усиления, поэтому для того, чтобы статическая ошибка была равной нулю, коэффициент статического усиления устремляют к бесконечности за счет интегратора. Также интегратор может содержаться в самом объекте.

Наиболее часто встречающиеся модели объектов имеют вид:

$$W_1(s) = \frac{k}{N(s)}, \quad (1)$$

где k – коэффициент передачи; $N(s)$ – полином от аргумента s , являющегося аргументом преобразования Лапласа (некоторые авторы в ряде работ трактуют его как символическую запись операции дифференцирования, что не далеко от истины). Указанный полином в знаменателе описывает интегрирующие свойства объекта, чем выше степень этого полинома, тем выше порядок соответствующего ему (по математической модели) фильтра низких частот.

Также встречаются объекты с математической моделью вида:

$$W_2(s) = \frac{M(s)k}{N(s)}, \quad (2)$$

где $M(s)$ – также полином от аргумента s , но его степень должна быть ниже, чем степень полинома $N(s)$, чтобы обеспечить возможность физической реализации объекта по соотношению (2). Полином $M(s)$ описывает местные дифференцирующие свойства объекта.

Если в объекте имеется запаздывание, то его передаточная функция дополняется экспоненциальным множителем:

$$W_3(s) = \frac{M(s)}{N(s)} \cdot e^{-\tau s}, \quad (3)$$

где τ – время запаздывания. Если же в объекте присутствует еще и интегратор, то в знаменателе добавляется множитель s .

Объект с распределенными параметрами можно приближенно смоделировать передаточной функцией вида (3), в которой полиномы в числителе и знаменателе имеют высокий порядок, а их коэффициенты таковы, что интегрирующие и дифференцирующие свойства этих полиномов находятся как бы в постоянной конкуренции. Например, передаточная функция такого объекта может быть записана в следующем виде:

$$W_4(s) = \frac{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)(\tau_3 s + 1) \dots (\tau_m s + 1)k}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)(T_3 s + 1) \dots (T_n s + 1)s} \cdot e^{-\tau s}, \quad (4)$$

Здесь значения постоянных времени числителя и знаменателя чередуются по величине, например,

$$T_1 > \tau_1 > T_2 > \tau_2 > T_3 > \tau_3 > \dots > T_n > \tau_m. \quad (5)$$

Как правило, регулятор включается на входе объекта, выход объекта соединен с отрицательным входом вычитающего элемента, а на положительный вход вычитающего элемента подается задание, то есть предписанная величина. Если регулятор рассчитан правильно, то выходная величина объекта стремится стать равной предписанной величине по прошествии некоторого небольшого для данного объекта времени. Ход изменения выходной величины называется переходным процессом, в этом процессе нежелательны слишком большие перерегулирования и излишне длительные или большие по величине колебания. Выходной сигнал вычитающего элемента называется ошибкой управления и обозначается $e(t)$.

Ставится задача всеми возможными методами

численной оптимизации рассчитать регулятор для объекта вида (4), обеспечивающий требуемые качества замкнутой системы.

Поскольку система линейна, наиболее эффективно исследовать ее по отклику на единичное ступенчатое воздействие. При этом ошибка сначала скачком становится равной единице, далее должна плавно снизиться до нулевого значения.

1. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЕ ОБЪЕКТОМ

Поскольку предложено решение задачи методом численной оптимизации, зададим конкретные численные значения параметров в передаточной функции (4), например, следующего вида:

$$W_4(s) = \frac{(100s + 1)(10s + 1)(s + 1)(0,1s + 1)k}{(300s + 1)(30s + 1)(3s + 1)(0,3s + 1)s} \cdot e^{-s}. \quad (6)$$

Для моделирования такой системы создадим структуру, моделирующую объект по соотношению (6), структура такой модели показана на Рис. 1. Структура модели ПИД-регулятора для этого случая показана на Рис. 2. Структура блока для оптимизации должна содержать столько блоков *ParameterUnknown*,

сколько имеется переменных, которые требуется оптимизировать в результате процедуры оптимизации. Вид этой модели показан на Рис. 3, где в указанные блоки заведены начальные значения для оптимизации, соответствующие значениям $k_p = 1$, $k_i = 0$ и $k_d = 0$, соответственно.

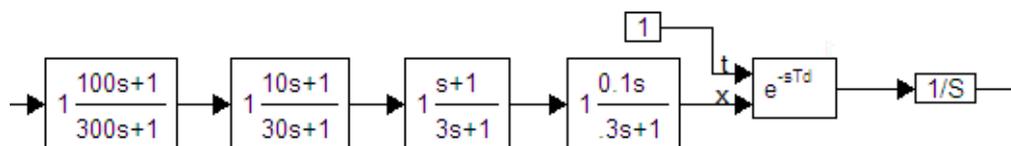


Рис. 1. Модель объекта

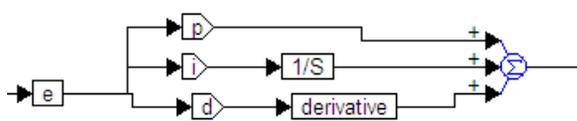


Рис. 2. Модель регулятора

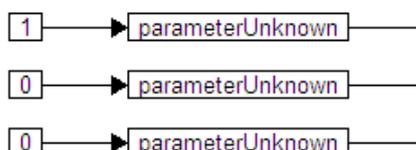


Рис. 3. Модель блока оптимизации

Также в модели должен присутствовать блок *Cost*, то есть блок для анализа стоимостной функции и вычисления новых значений оптимизируемых параметров, а также необходима структура для вычисления собственно стоимостной функции, результат которой должен быть заведен на вход этого блока *Cost*.

Стоимостная функция в общем виде может вычисляться по следующему соотношению:

$$\Psi(\Theta) = \int_{t=0}^{\Theta} w_q \sum_{q=1}^Q \psi_q dt . \quad (7)$$

Здесь стоимостная функция определена как

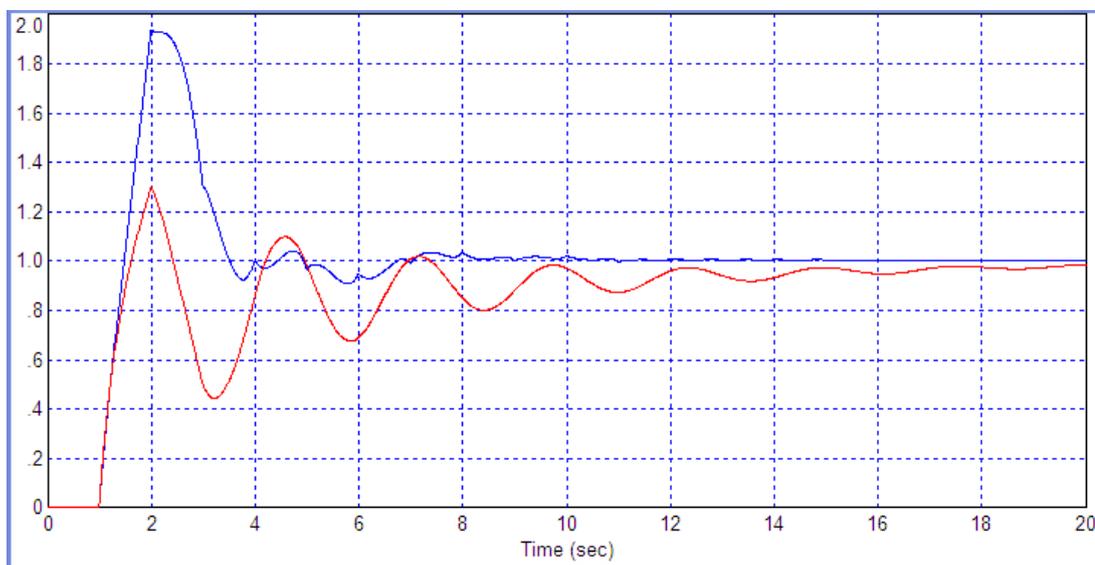


Рис. 4. Вид переходных процессов, которые получаются с различными стоимостными функциями: красная линия при использовании только (8) в (7), синяя линия при использовании также (9)

Один из эффективных способов подавить колебания в переходном процессе состоит в использовании детектора роста ошибки [2]:

$$\psi_2(t) = \max\left\{0, e(t) \frac{de(t)}{dt}\right\} . \quad (9)$$

Здесь вычисляется наибольшая величина из двух, первая из которых равна нулю, а вторая – произведение ошибки на ее производную по времени. Если ошибка и ее производная имеют

интеграл по времени от начала переходного процесса $t=0$ до его окончания $t=\Theta$ от положительно определенных функций ψ_q . Если слагаемых функций ψ_q в (7) более одной, то следует использовать весовые коэффициенты, которые устанавливают значимость вклада каждой такой функции.

Одной из очевидных функций для (7) является модуль ошибки $e(t)$, умноженный на время t от начала переходного процесса [1]:

$$\psi_1(t) = |e(t)| t . \quad (8)$$

Это обеспечивает снижение модуля ошибки управления, а также более интенсивное снижение этой величины по мере развития процесса, поскольку время играет роль весового коэффициента, который непрерывно линейно возрастает.

Если использовать только функцию вида (8) в стоимостной функции (7), то в получаемом переходном процессе имеется множество колебаний, а начальное перерегулирование достигает 30%. Соответствующий вид переходного процесса показан красной линией на графике на Рис. 4.

разные знаки, то ошибка по мере развития процесса уменьшается по величине. Произведение ошибки и ее производной в этом случае будет отрицательным, функция (9) будет равна нулю, ее вклад в целевую функцию (7) также будет равным нулю. Эта ситуация соответствует желаемому развитию процесса. Если же ошибка и ее производная имеют одинаковый знак, то ошибка по величине на этом участке процесса возрастает, произведение

ошибки и ее производной будет больше нуля, вклад функции (9) в стоимостную функцию будет существенным вследствие интегрирования этой положительной функции. Поэтому процедура оптимизации будет стремиться отыскивать такие значения коэффициентов регулятора, которые будут минимизировать (9), следовательно, минимизировать участки переходного процесса, на которых произведение ошибки на ее производную будет давать большую положительную величину. Если ошибка растет медленно, или если ее величина не велика, то функция (9) будет не слишком велика, поэтому данное слагаемое не обеспечивает полное отсутствие участков переходного процесса, на которых ошибка растет или сохраняет свое значение, а лишь подавляет наличие таких участков, на которых эта ошибка растет быстро и длительно, либо растет, когда ее значение само по себе уже велико.

В результате совместного применения функций (8) и (9) в стоимостной функции (7) получается регулятор, с которым в системе переходный процесс имеет вид, показанный синей линией на *Рис. 4*.

Как видим, вследствие внесения функции (9) колебания в системе существенно подавляются. Однако, при этом возрастает перерегулирование, которое в этом случае достигает 90 %, что никак нельзя признать удовлетворительным.

Для уменьшения величины перерегулирования можно предложить ограничить значение ошибки. Например, можно ввести функцию, пропорциональную квадрату ошибки:

$$\psi_3(t) = [e(t)]^2. \quad (10)$$

Моделирование и оптимизация показали, что ввод функции (10) в стоимостную функцию (7) недостаточно эффективен. Предположительно это может быть связано с тем, что на начальном этапе процесса ошибка равна единице, а на последующих этапах она намного меньше единицы, поэтому вклад начального этапа наиболее велик, а снижение ошибки на начальном этапе невозможно принципиально, поскольку переходный процесс должен занимать некоторое время, и стартует он с единичного отклонения.

Для того, чтобы отсечь начальную ошибку и ввести резкую зависимость целевой функции от перерегулирования, можно использовать только отрицательного знака. Для этой цели можно ввести в (10) ограничение сверху и получить модифицированную компоненту слагаемого для введения его под интеграл стоимостной функции (7), а именно:

$$\psi_4(t) = [\max\{0, e(t)\}]^2. \quad (11)$$

Слагаемое вида (11) позволяет снизить перерегулирование в переходном процессе до величины около 20 %. Полученный процесс показан на *Рис. 5*. Этот процесс если и лучше, чем

процесс, показанный красной линией на *Рис. 4*, то лишь в силу возможной специфики требований к системе. Действительно, длительность в обоих случаях составляет около 20 с, но в процессе на *Рис. 4* перерегулирование, достигая уровня 30 %, практически сразу же снижается, а в процессе на *Рис. 5* оно достигает примерно уровня 21 %, и остается на этом уровне около 3 с. В разных случаях предпочтение может быть отдано тому или иному варианту. Переходный процесс, показанный красной линией на *Рис. 4*, может показаться любому инженеру заведомо худшим, однако, если, например, требуется как можно быстрее завершить процесс с максимальным приближением к требуемому значению, то данный переходный процесс обладает лучшими параметрами по быстрдействию, а именно: он почти полностью завершается по прошествии 4–7 с, тогда как длительность красного процесса на *Рис. 4* составляет около 18–20 с, а длительность процесса на *Рис. 5* составляет 10–12 с.

2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭТАЛОННОГО ПРОЦЕССА ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ РЕГУЛЯТОРА

Можно приблизительно предложить идеальный вид переходного процесса. В идеальном случае он должен начинаться там же, где начинаются все процессы на предыдущих графиках, поскольку запаздывание преодолеть невозможно. Далее желательно, чтобы форма графика была близка к экспоненциальной зависимости. Постоянную времени этой экспоненты можно подобрать, исходя из возможностей системы в плане ее быстрдействия. Экспериментальным путем было установлено, что постоянная времени, равная 10 с, наиболее соответствует возможностям данной системы при отсутствии большого перерегулирования.

Далее на основании этой модели «идеального объекта» можно сформировать вид идеального изменения ошибки управления в таком объекте. Вычтя из фактической ошибки значение «идеальной» ошибки, рассчитанной в форме функции времени (то есть также как переходный процесс), возведем остаток в квадрат и подадим на вход блока Cost через сумматор. Тем самым реализуется метод отыскания минимального интеграла от квадрата отклонения фактической ошибки от ее идеального вида.

Пусть передаточная функция блока формирования идеальной ошибки имеет вид:

$$W_Q(s) = 1 - \frac{\exp(-s)}{10s + 1}. \quad (12)$$

На выходе этого блока получим сигнал $q(t)$. Тогда очередное слагаемое в целевую функцию (7) может быть рассчитано по соотношению:

$$\psi_5(t) = [e(t) - q(t)]^2. \quad (13)$$

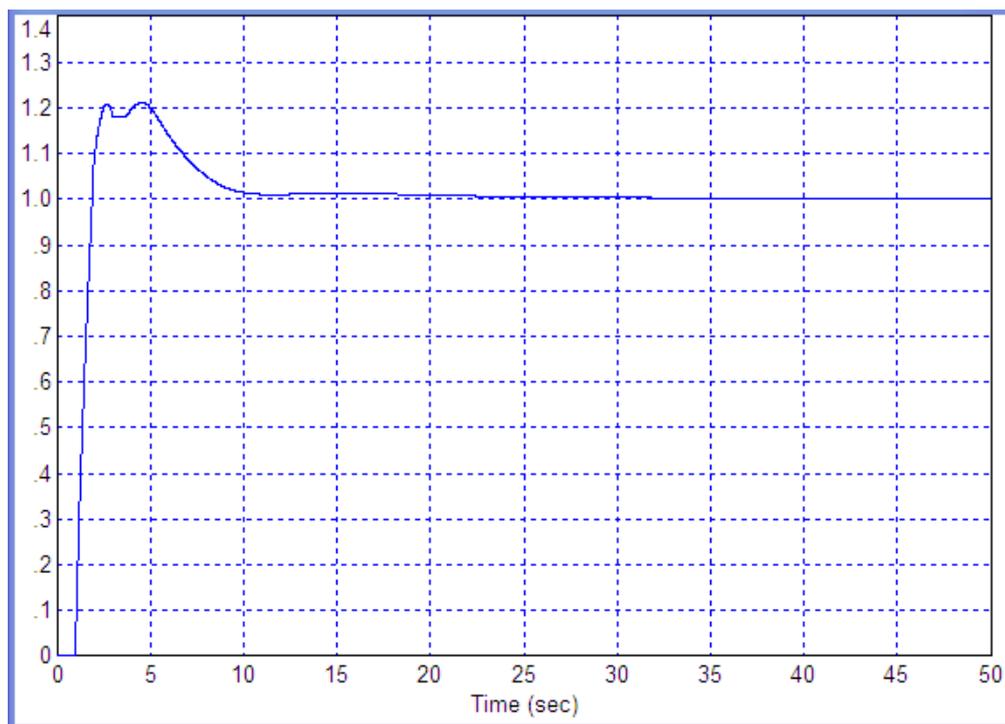


Рис. 5. Наилучший вид переходного процесса, который удалось получить в итоге численной оптимизации при использовании всех мер, описанных в [1]

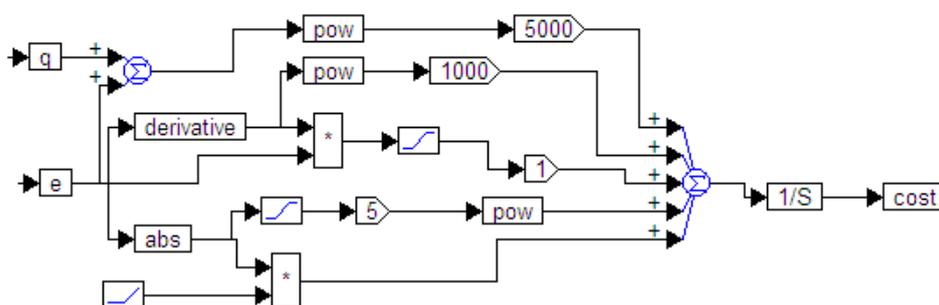


Рис. 6. Модель блока вычисления целевых функций

На Рис. 6 показана структура для расчета целевой функции (7), включающей слагаемые (8), (9), (10), (11) и (13) с различными весовыми коэффициентами. Эти коэффициенты могут быть подобраны эмпирически на основании анализа получаемых переходных процессов. На Рис. 7 показана структура для оптимизации регулятора, в которой используются все описанные выше блоки. На этом же рисунке показан результат оптимизации в виде трех полученных коэффициентов ПИД-регулятора, а именно: $k_p = 60,26$; $k_i = 7,35$ и $k_d = 76,24$. Полученные значения могут быть округлены до двух значащих цифр. Полученный переходный процесс показан на Рис. 8 синей линией. Для сравнения там же красной линией показан процесс, соответствующий идеальному виду ошибки (12). Полученный переходный процесс в сравнении с процессами на Рис. 4 и 5 обладает как достоинствами, так и недостатками.

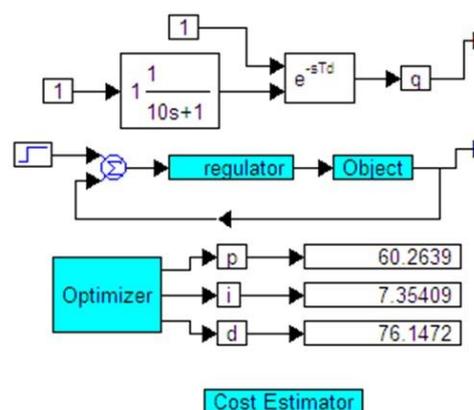


Рис. 7. Модель системы для оптимизации и результат ее использования

Очевидным достоинством является наименьшее значение перерегулирования, а именно: 11 % в сравнении с 90 %, 30 % и 22 %. Другим достоинством является относительно плавный вид, если не считать небольших колебаний на начальном этапе, когда не достигнута и половина

предписанной величины. Если системе противопоказано большое перерегулирование, то этот процесс следует предпочесть в сравнении с

предыдущими, и для дальнейшего снижения перерегуливания, вероятно, предложенный путь может оказаться наиболее эффективным.

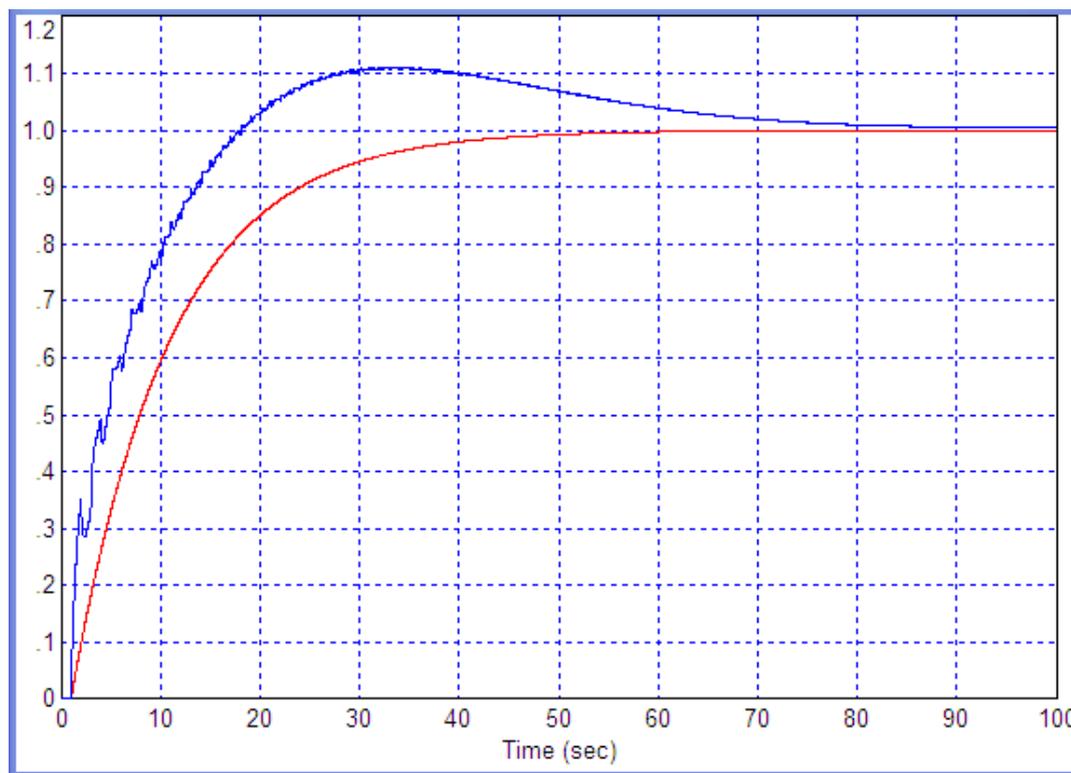


Рис. 8. Вид опорной функции (красная линия) и полученный переходный процесс (синяя линия) в системе в итоге оптимизации с опорной функцией

В отношении длительности переходного процесса данный процесс существенно уступает ранее полученным процессам.

построения адаптивных систем управления и регулирования».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ЛИТЕРАТУРА

На основании выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Стоимостную функцию вида (7) можно успешно пополнять новыми слагаемыми.

2. В статье впервые предложено, обосновано и использовано слагаемое вида (13) в стоимостную функцию вида (7); результаты испытаний методом моделирования и оптимизации показали полезность эффективности этого слагаемого для снижения перерегулирования и обеспечения в целом плавности переходного процесса.

3. Показано, что объект с распределенными параметрами может оказаться достаточно сложным объектом для оптимизации регулятора, однако методы численной оптимизации позволяют решать задачу проектирования регулятора для системы с таким объектом.

Работа выполнена при поддержке фондом РФФИ, проект № 15-38-50594 «Разработка и исследование алгоритмов идентификации объектов управления с сосредоточенными и распределенными параметрами, с целью

[1] Жмудь В. А. Моделирование, исследование и оптимизация замкнутых систем автоматического управления. Монография. Новосибирск, Изд-во НГТУ, 2012. – 335 с.

[2] Жмудь В.А., Загорин А.Н. Структура модели для оптимизации системы с обратной связью. Патент РФ RU 2554291 C1. Опубл. 27.06.2015. Бюлл. № 18.

[3] V. A. Zhmud. The Use of the Feedback Control Systems in Laser Physics Researching Experiments. // Proceedings of RFBR and DST Sponsored “The 2-nd Russian-Indian Joint Workshop on Computational Intelligence and Modern Heuristics in Automation and Robotics”, 10 – 13 September, 2011, Additional volume, pp.40–43.

[4] В.А. Жмудь, А.Н. Загорин. Метод проектирования энергосберегающих регуляторов для сложных объектов с частично неизвестной моделью. В кн.: Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XVI Международной конференции 30 июня – 03 июля 2014 г., Самара. Россия. С. 557–567.

[5] The modeling tests of the new PID-regulators structures. Voevoda, A.A., Zhmud, V.A., Ishimtsev, R.Y., Semibalamut, V.M. 2009. Proceedings of the IASTED International Conference on Applied Simulation and Modelling, ASM 2009. P.165 – 168.

- [6] Modern key technologies in automatics: Structures and numerical optimization of regulators. Zhmud, V., Yadrishnikov, O., Poloshchuk, A., Zavorin, A. 2012. Proceedings - 2012 7th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2012.
- [7] The design of the feedback systems by means of the modeling and optimization in the program VisSim 5.0/6. Zhmud, V., Liapidevskiy, A., Prokhorenko, E. 2010. Proceedings of the IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control. PP. 27–32.
- [8] V. Zhmud, O. Yadrishnikov. Numerical optimization of PID-regulators using the improper moving detector in cost function. Proceedings of the 8-th International Forum on Strategic Technology 2013 (IFOST-2013), vol. II, 28 June – 1 July. Mongolian University of Science and Technology, Ulaanbaator, Mongolia. IEEE organized. 2013. P. 265–270. <http://www.must.edu.mn/IFOST2013/>
- [9] V. Zhmud, A. Polishchuk, A. Voevoda, R. V. Rao. The Tuning of the PID-Regulator for Automatic Control System of Thermo Energetic Equipment // Proceedings of the Fifth International Conference on Advances in Mechanical Engineering (ICAME-2011), June 06-08, 2011. Surat – 395 007, Gujarat, India. pp. 254-263.
- [10] Zhmud V.A., Zavorin A.N. Metodi di ottimizzazione del controllo numerico su una modelli troncati. Italian Science Review. 2014; 4(13). PP. 686-689. Available at URL: <http://www.ias-journal.org/archive/2014/april/Zhmud.pdf> и <http://www.ias-journal.org/archives/april-2014>



Вадим Аркадьевич Жмуд – заведующий кафедрой Автоматики НГТУ, профессор, доктор технических наук.
E-mail: oaonips@bk.ru



Борис Иванович Пякилля – ассистент кафедры компьютерных интегрированных систем Института Кибернетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.
E-mail: pakillaboris@gmail.com

Control of Object with Distributed Parameters

Boris Pyakillya, Vadim Zhmud

Abstract. Objects with distributed parameters differ from dynamic objects with distributed parameters by the fact that their mathematical model is much more complex. These models instead differential equations are partial differential equations. These objects are found in a variety of processes in industry, transport, science and technology. Design of control systems for such objects based on the principle of negative feedback, as well as for objects with distributed parameters,

consist in three steps. These steps are the identification of the object, selection of structure of the regulator and the calculation of the parameters for it. Methods of analytical calculation of regulators parameters may be extremely difficult to apply due to the complexity of the object model. Recently, one of the widely used methods of analysis and synthesis of regulators is a numerical optimization. It is carried out in the mathematical modeling of the system [1]. In a series of papers [1-10] a number of measures have been developed to create a target (cost) function to optimize control. These measures allow an effective search for the PID coefficients. At that, recommendations are developed about ways how to modify the cost function to increase the stability margin in the system, to reduce the static error, to reduce overshoot, to eliminate or reduce the reverse overshoot and so on, including resource saving. All these measures have been tried for controller optimization, solving the problem of the control of object with distributed parameters, but the best result is characterized by overshooting about 22%, that for many practical problems may be too large. This paper proposes a new method of control, which is a special modification of a cost function. This method reduced the overshooting to a value of about 11%, which may be preferred for some applications, even despite the fact that the duration of the transient system increased. The proposed method adds an arsenal of techniques of control of complex dynamic objects.

Key words: regulation, delay, object with distributed parameters, control, modeling, simulation

REFERENCES

- [1] Zhmud V. A. Modelirovanie, issledovanie i optimizacija zamknytyh sistem avtomaticheskogo upravleniya. Monografija. Novosibirsk, Izd-vo NGTU, 2012. – 335 s. (Zhmud V.A. Simulation study and optimization of locked systems of automatic control. Monograph. Novosibirsk, Publishing House of the NSTU, 2012. - 335 p.)
- [2] Zhmud V.A., Zavorin A.N. Struktura modeli dlja optimizacii sistemy s obratnoj svjaz'ju. Patent RF RU 2554291 C1. Opubl. 27.06.2015. Bjull. № 18.
- [3] V. A. Zhmud. The Use of the Feedback Control Systems in Laser Physics Researching Experiments. // Proceedings of RFBR and DST Sponsored “The 2-nd Russian-Indian Joint Workshop on Computational Intelligence and Modern Heuristics in Automation and Robotics”, 10–13 September, 2011, Additional volume, pp.40–43.
- [4] Zhmud V.A., Zavorin A.N. Method of designing energy-efficient regulators for complex objects with partially unknown model. Proc.: The control and modeling in complex systems. Proceedings of the XVI International Conference June 30-July 3, 2014, Samara. Russia. p. 557-567.
- [5] The modeling tests of the new PID-regulators structures. Voevoda, A.A., Zhmud, V.A., Ishimtsev, R.Y., Semibalamut, V.M. 2009. Proceedings of the IASTED International Conference on Applied Simulation and Modelling, ASM 2009. P.165 – 168.
- [6] Modern key technologies in automatics: Structures and numerical optimization of regulators. Zhmud, V.,

- Yadrishnikov, O., Poloshchuk, A., Zavorin, A. 2012. Proceedings - 2012 7th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2012.
- [7] The design of the feedback systems by means of the modeling and optimization in the program VisSim 5.0/6. Zhmud, V., Liapidevskiy, A., Prokhorenko, E. 2010. Proceedings of the IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control. PP. 27–32.
- [8] V. Zhmud, O. Yadrishnikov. Numerical optimization of PID-regulators using the improper moving detector in cost function. Proceedings of the 8-th International Forum on Strategic Technology 2013 (IFOST-2013), vol. II, 28 June – 1 July. Mongolian University of Science and Technology, Ulaanbaator, Mongolia. IEEE organized. 2013. P. 265 – 270. <http://www.must.edu.mn/IFOST2013/>
- [9] V. Zhmud, A. Polishchuk, A. Voevoda, R. V. Rao. The Tuning of the PID-Regulator for Automatic Control System of Thermo Energetic Equipment // Proceedings of the Fifth International Conference on Advances in Mechanical Engineering (ICAME-2011), June 06-08, 2011. Surat – 395 007, Gujarat, India. pp. 254-263.
- Zhmud V.A., Zavorin A.N. Metodi di ottimizzazione del controllo numerico su una modelli troncati. Italian Science Review. 2014; 4(13). PP. 686-689. Available at URL: <http://www.ias-journal.org/archive/2014/april/Zhmud.pdf> and <http://www.ias-journal.org/archives/april-2014>

Управление объектом в контуре с обратной связью при использовании неидеальных датчиков положения и ускорения

*В.А. Жмудь, В.М. Семибаламут, О.Д. Ядрышников, В.Г. Трубин
Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия
ФГБУН «Геофизическая служба СО РАН»*

Аннотация: Рассматривается задача управления балансирующим роботом в контуре с отрицательной обратной связью. Регулятор может быть рассчитан методом численной оптимизации. Датчики контролируемой величины несовершенны. Датчик угла ориентации (гироскоп) обладает ограниченным быстродействием, а также бинарным шумом квантования. Датчик ускорения (акселерометр) обладает дрейфом среднего значения, а также гауссовым шумом. Ни один из этих датчиков не достаточен для эффективной стабилизации балансирующего робота, но использование их обоих в единственной петле управления позволяет достичь требуемой точности управления, статической и динамической. Методика совместного использования двух датчиков для более точного определения единственной величины, разработанная ранее теоретически, апробирована моделированием. Кроме того, результаты подтверждаются практическим их использованием с положительным эффектом.

Ключевые слова: автоматика, управление, переходный процесс, устойчивость, качество управления, замкнутая система, точность, датчики, балансирующий робот, гироскоп, акселерометр

ВВЕДЕНИЕ

Разработка роботов, работающих в реальном времени, целесообразно не только с научно-исследовательскими целями, но также и для целей обучения студентов. Основные проблемы проектирования и отладки при этом отрабатываются самими студентами под руководством преподавателей на малоразмерных и маломощных моделях. Достоинства такой разработки состоят в том, что каждый элемент таких роботов может быть исследован и модифицирован до мельчайших подробностей самостоятельно, технология остается в распоряжении разработчика, поэтому вся разработка может быть повторена, в том числе в увеличенных размерах и (или) в более мощной версии изделия. Действительно, основные проблемы организации такой системы не зависят от размеров, тогда как отладка малогабаритного изделия безопасна, более дешева и в некоторых

случаях даже более сложна, что в данном случае является достоинством, поскольку при обучении на более сложном оборудовании обучающийся получает более высокую квалификацию. Более высокая сложность состоит, прежде всего в большем быстродействии маломощного робота (что требует большего быстродействия управляющей электронной части), а также в необходимости максимального стремиться к уменьшению веса и снижению габаритов всех компонент системы.

Сложные задачи проектирования, компоновки элементов, согласования их по электрическим сигналам, идентификации объекта и настройки регуляторов могут быть отработаны на дешевых моделях и наглядно продемонстрированы студентам. Кроме того, при решении задач управления могут возникать новые (научные) проблемы, которые не столь остры при управлении объектом больших габаритов и большей инерционности.

Примером такого малогабаритного робота может служить двухколесный балансирующий робот, поддерживающий равновесие при действии неконтролируемых внешних помех.

Одна из острейших проблем отладки такого робота – это обеспечение требуемой точности управления в реальном времени. Эта задача решается применением систем с обратной связью, основными элементами которой являются объект, датчик его выходной величины и регулятор. Эти три элемента включены последовательно в управляющий контур (то есть в петлю).

Объектом управления в этом случае является электромеханическая часть, включающая электропривод, приводящий в действие колеса, и механическая часть робота. Центр его масс следует поддерживать в равновесии. Особенностью объекта является тот факт, что центр масс расположен намного выше оси вращения колес, поэтому робот без действия обратной связи неустойчив и может сохранять равновесие только в случае эффективной работы обратной связи.

Типовая структура любой **электромеханической** системы с отрицательной обратной связью показана на *Рис. 1*.

Типичная модель системы задается системой уравнений в области преобразований Лапласа. Модель объекта задается следующим уравнением:

$$X(s) = W(s)U(s) + H(s). \quad (1)$$

Здесь каждая функция от аргумента s , кроме $W(s)$ – это преобразование по Лапласу от соответствующей функции времени, $X(s)$ соответствует выходной величине $x(t)$, $U(s)$

соответствует управляющему сигналу $u(t)$, поступающему на вход объекта, $H(s)$ – неизвестному возмущению $h(t)$, которое система должна подавить за счет действия обратной связи, $W(s)$ – передаточная функция объекта.

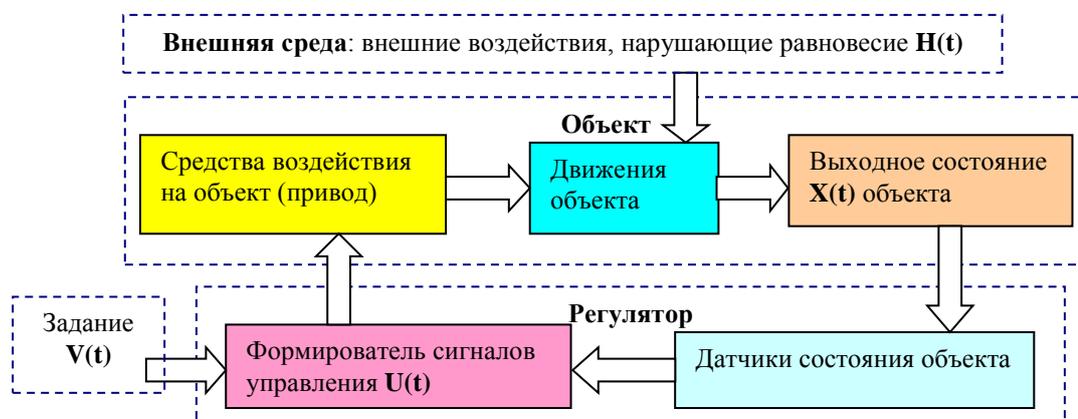


Рис. 1. Типичная структура с обратной связью в автоматических устройствах

Модель действия регулятора задается следующим уравнением:

$$U(s) = W_R(s)E(s). \quad (2)$$

Здесь $W_R(s)$ – передаточная функция регулятора, $E(s)$ – преобразование по Лапласу от ошибки управления $e(t)$. В системах стабилизации, как правило, ошибка приравнивается к выходной величине $x(t)$ с отрицательным знаком, поскольку требуется, чтобы выходная величина (отклонение от равновесного состояния) была равна нулю. В системах управления (регулирования) имеется предписанное значение (задание) $v(t)$, которое прибавляется к выходной величине через сумматор, а уравнение сумматора имеет вид:

$$E(s) = V(s) - X(s) \Leftrightarrow e(t) = v(t) - x(t). \quad (3)$$

Динамическая и статическая ошибка системы при обработке изменений задания идентична ошибке при идентичных изменениях помехи, поэтому, как правило, качество и точность системы исследуется именно по ошибке обработки задания. Чаще всего считают, что выходная величина доступна для измерения. На практике это всегда не так. Поэтому для реализации системы используется датчик выходной величины с соответствующей передаточной функцией $W_c(s)$, а соотношение (3) в этом случае принимает вид:

$$E(s) = V(s) - W_c(s)X(s). \quad (4)$$

Задача проектирования системы усложняется, если невозможно выбрать датчик, который позволяет обеспечить требуемую статическую и динамическую точность. В этом случае приходится применять два или более датчиков. Например, для обеспечения статической точности

используется датчик с малой статической погрешностью (но недостаточной динамической точностью), а для обеспечения динамической точности используется другой датчик, с высокой динамической точностью, то есть с широкой полосой пропускания и малыми шумами в области этой полосы, хотя, возможно, при этом и с недостаточной статической точностью. Задача использования двух или более датчиков для управления единственной величиной рассмотрена в работе [1]. В данной статье исследуются особенности практических проблем при решении задач этого класса, которые состоят в том, что даже при идеальных датчиках управление системы представляет собой не простую задачу. В этих условиях отличие датчиков от идеала крайне затрудняет проектирование системы.

Подобные проблемы невозможности использования одного датчика и необходимости совмещения положительных свойств нескольких датчиков возникают также во многих других задачах управления в контуре с отрицательной обратной связью. Особенно трудно их решить в том случае, когда даже при использовании идеального датчика управление объектом не является простой задачей вследствие специфических свойств его математической модели. Одним из таких свойств является склонность к колебаниям. Эта склонность может зачастую привести к тому, что в системе имеет место чрезвычайно большое перерегулирование, или даже обратное перерегулирование, то есть движение в ошибочном направлении на первоначальной стадии переходного процесса. Методы проектирования регулятора исследуются моделированием.

1. ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИ ОБЪЕКТА

Модель объекта не линейна, но вблизи

равновесного состояния ее можно считать линейной. Передаточная функция объекта содержит запаздывание и фильтр второго порядка. Совместные свойства этого фильтра и запаздывания приводят к тому, что объект обладает склонностью к колебаниям.

Пусть, например, модель объекта определена в следующем виде:

$$X(s) = \frac{\exp(-0.2s)}{s^3 + s^2 + s + 1} U(s) \quad (5)$$

Здесь использован масштаб времени 1:10, то есть время дано в десятых долях секунды.

Воспользуемся методом численной

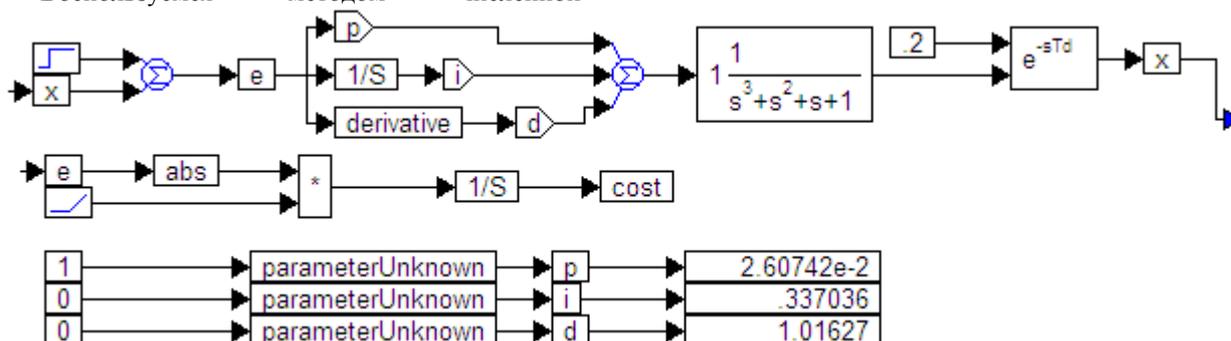


Рис. 1. Структурная схема для моделирования и оптимизации регулятора в системе с объектом (5)

Этот объект обладает параметрами на грани между простыми и сложными, оптимизация регулятора для него дает положительный результат, но в системе имеет место значительное перерегулирование. При этом используется целевая функция для оптимизации вида:

$$\Psi = \int_0^T t |e(t)| dt \quad (7)$$

Здесь T – время моделирования переходного процесса, t – время (как аргумент при моделировании), $e(t)$ – ошибка управления как функция времени. На Рис. 1 шины с одинаковыми наименованиями соединены (таковы особенности программы VisSim). Блоки “parameterUnknown” и “cost” обеспечивают оптимизацию коэффициентов регулятора. Полученные в итоге оптимизации коэффициенты равны, соответственно: $K_P = 0,02607$, $K_I = 0,337$ и $K_D = 1,016$. Полученный переходный процесс показан на Рис. 2.

Видно, что статическая ошибка в системе равна нулю, поскольку выходная величина стремится к заданию, равному единице. Но качество системы не слишком высокое, так как перерегулирование составляет около 17%, а также в процессе имеется больше пяти колебаний.

оптимизации для проектирования ПИД-регулятора в предположении идеального датчика выходной величины, то есть в предположении $W_S(s) = 1$. Передаточная функция ПИД-регулятора имеет вид:

$$W_R(s) = K_P + K_I / s + sK_D \quad (6)$$

Здесь коэффициенты K_P , K_I и K_D требуется определить в процедуре численной оптимизации. На Рис. 1 показана структура для моделирования и численной оптимизации регулятора в программе VisSim.

Чтобы убедиться, что объект представляет большую сложность, увеличим время запаздывания в пять раз. Результат моделирования показан на Рис. 3. Видно, что в результате два коэффициента регулятора становятся отрицательными, и только коэффициент интегрального канала остается положительным. Полученные коэффициенты равны соответственно: $K_P = -0,253$, $K_I = 0,1541$ и $K_D = -0,127$. На переходном процессе в этой системе, показанной на Рис. 4, в начале процесса имеет место обратное перерегулирование на величину около -17%.

Таким образом, видно, что управление объектом требует тщательной настройки регулятора, поскольку при небольших изменениях параметров модели даже при оптимальном регуляторе система склонна к обратному перерегулированию, что характерно для системы, находящейся вблизи границы устойчивости. Если в такой системе регулятор рассчитан недостаточно правильно, она потеряет устойчивость. Также об этом свидетельствуют отрицательные коэффициенты пропорционального и дифференцирующего каналов регулятора.

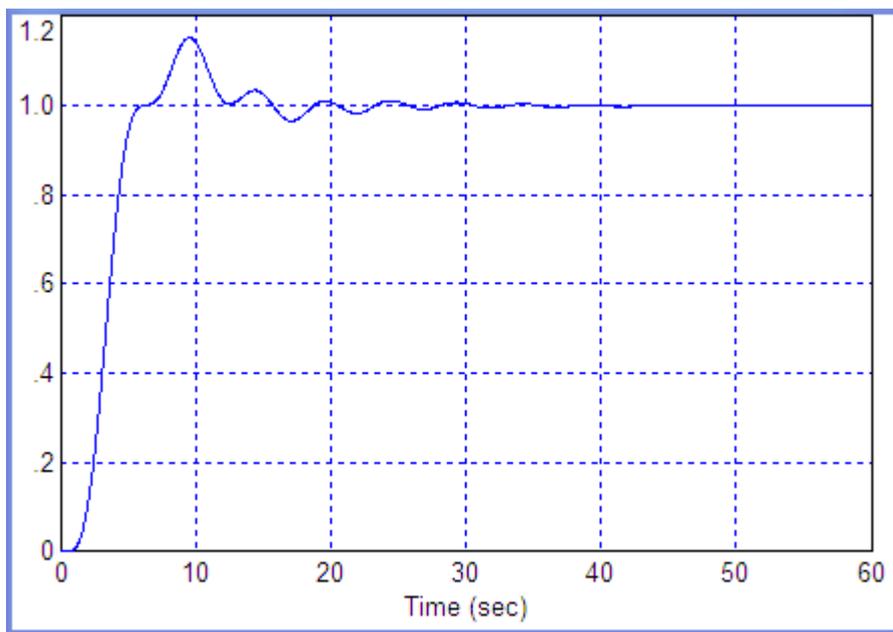


Рис. 2. Переходный процесс, получаемый в системе по Рис. 1

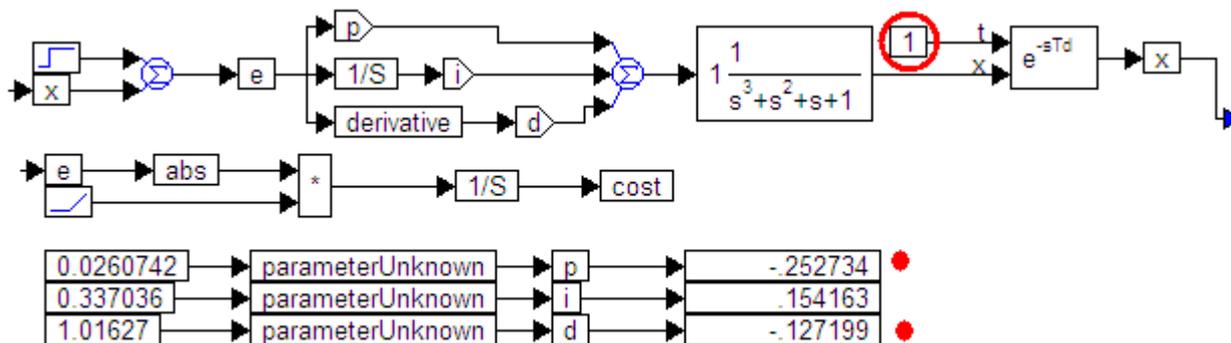


Рис. 3. Результат моделирования после увеличения запаздывания до величины 1 с: получены два отрицательных коэффициента (отмечены красными точками)

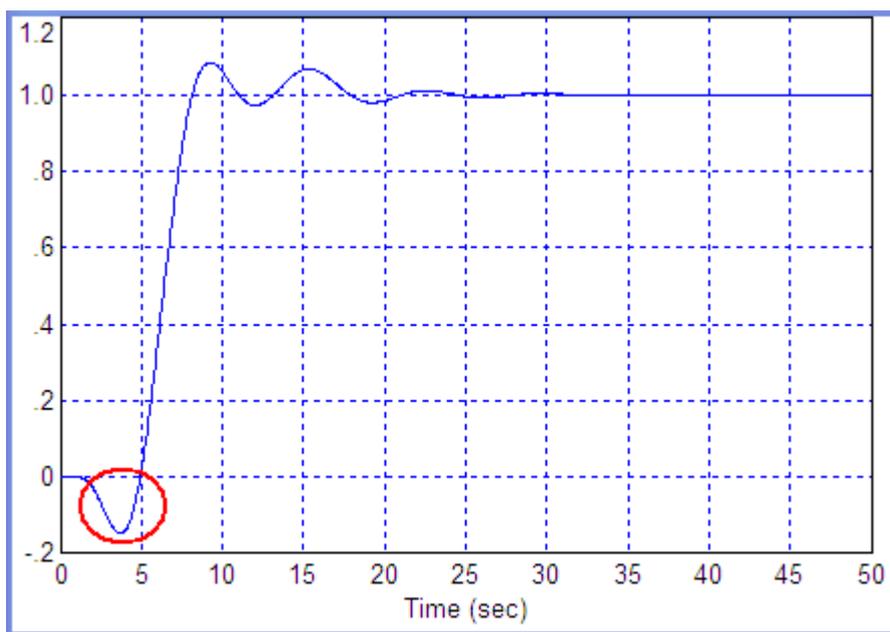


Рис. 4. Переходный процесс в системе по Рис. 3 приобретает обратное перерегулирование (отмечено красным эллипсом)

2. ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛЕЙ ДАТЧИКОВ

Для определения угла отклонения балансирующего робота от вертикальной линии могут использоваться различные по природе датчики, но все они далеки от идеала.

Так, например, для определения угла отклонения может использоваться гироскоп. Однако его быстродействие ограничено, кроме того, он обладает шумом квантования. На *Рис. 5* показан характерный вид сигнала на выходе с гироскопа (синяя линия), когда на его входе сигнал имеет вид черной линией. Модель

гироскопа может в этом случае быть представлена передаточной функцией в виде фильтра с постоянной времени $0,1\text{ с}$ (то есть 1 единица в выбранном масштабе времени) с добавлением источника бинарного шума. При этом заданы следующие параметры генератора бинарного шума: длина регистра равна 6, амплитуда равна $0,01$, период обновления равен $0,5$. В данном случае шумы гироскопа заведомо несколько преувеличены для повышения уверенности в работоспособности системы в реальной ситуации.

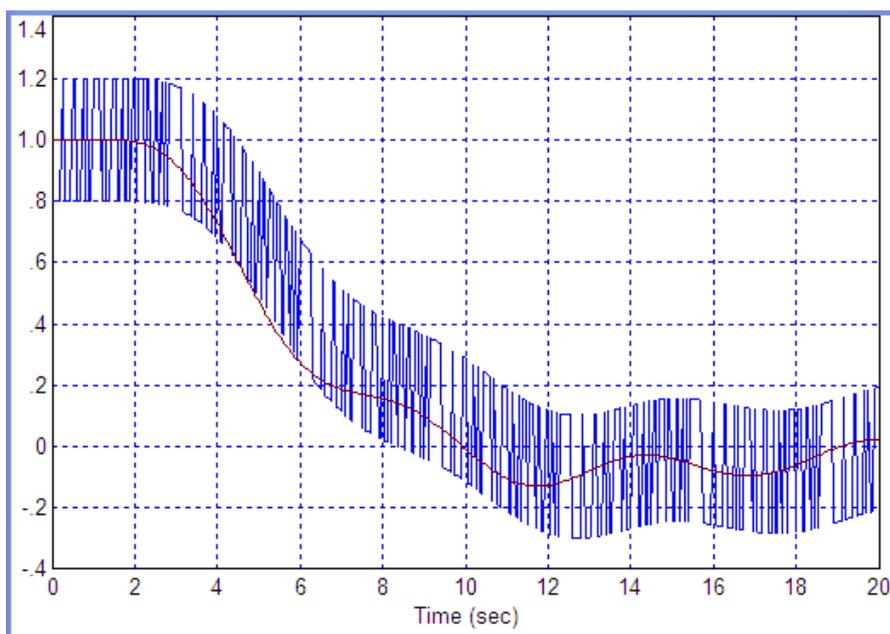


Рис. 5. Выход сигнала гироскопа (модель)

Как мы видели из предыдущего раздела, требования к датчикам чрезвычайно высоки. Если использовать гироскоп для управления, в сигнале производной присутствуют чрезмерно большие шумы. Это приводит к заметным колебаниям в установившемся состоянии, величина которых составляет около 5%. Поэтому для дифференцирующего канала целесообразно использовать акселерометр, который доступен в виде специализированной микросхемы. В модели акселерометра следует предусмотреть два отличия от идеального датчика: высокочастотный гауссов шум и низкочастотный дрейф. Высокочастотный шум несущественно сказывается вследствие его высокой частоты и малой величины, этот шум не дает смещения нуля. Низкочастотный дрейф дает смещение нуля, но оно не должно проявляться при использовании сигнала с выхода этого датчика для формирования сигнала ошибки в дифференцирующем тракте. Однако этот сигнал нельзя использовать для формирования сигналов в других трактах регулятора, особенно, в интегрирующем тракте, поскольку дрейф нуля слишком велик, и его

интегрирование привело бы к возникновению линейно нарастающей ошибки.

Для моделирования дрейфа акселерометра можно использовать сигнал с выхода низкочастотного генератора с малой амплитудой. На *Рис. 6* показан выходной сигнал акселерометра (синяя линия) в сравнении с фактическим сигналом производной выходного сигнала робота (красная линия). Параметры генератора, имитирующего дрейф акселерометра таковы: частота равна $0,0314$ (то есть половина периода этого сигнала равна 100 единиц), амплитуда равна $0,1$. Можно было бы предложить низкочастотный фильтр для устранения дрейфа, например, такой фильтр, как показан на *Рис. 7*. Однако такой фильтр хотя и удаляет эффективно низкочастотный дрейф, искажает также и высокочастотный сигнал, вводя как бы дополнительное дифференцирование. Для наглядности на *Рис. 8* показан сигнал на выходе этого фильтра (синяя линия) в сравнении с истинным сигналом производной (красная линия). На этом основании предлагается отказаться от применения фильтра и подавать сигнал с выхода акселерометра

непосредственно в дифференцирующий канал ПИД-регулятора. Также предлагается в этом тракте не использовать сигнала задания, то есть

сигнал обратной связи по скорости будет поступать на объект, минуя сумматор.

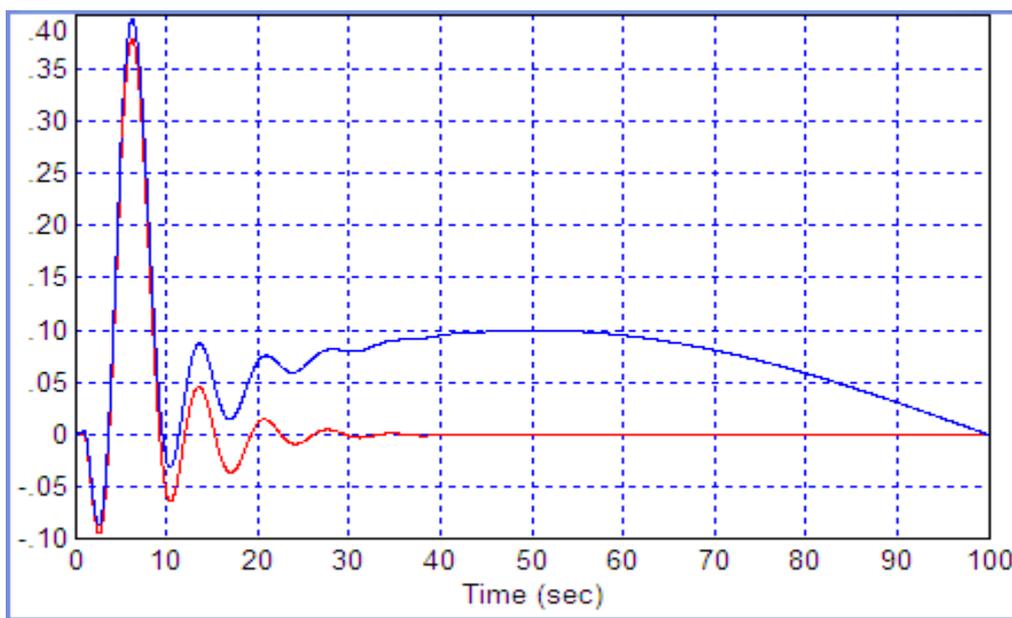


Рис. 6. Выход датчика акселерометра (модель) с помехой (синяя линия) и истинная скорость объекта (красная линия)



Рис. 7. Без окна настройки

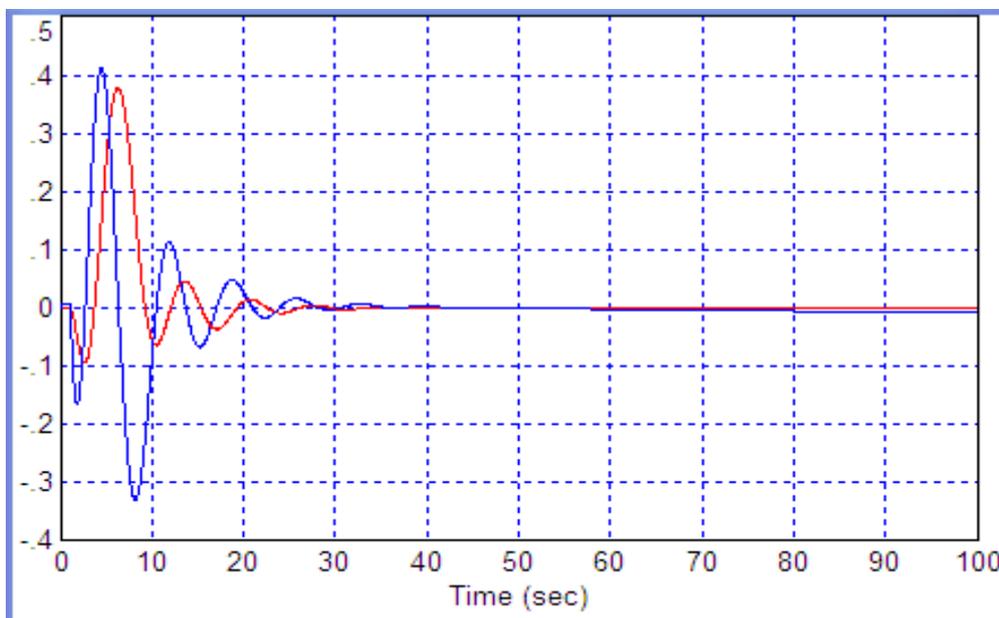


Рис. 8. Выход фильтрованного сигнала от акселерометра (синяя линия) и истинное ускорение объекта (красная линия)

3. ПРЕДЛАГАЕМЫЕ РЕШЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Особенность предлагаемого решения состоит в том, чтобы использовать не те результаты настройки регулятора, которые получены при моделировании системы с идеальным датчиком,

согласно Рис. 1, а осуществить оптимизацию в системе, где учтены все особенности моделей обоих датчиков. В соответствии с рекомендациями, данными в работе [2], при оптимизации используем увеличенное запаздывание в модели объекта, чтобы получить робастную систему. Такая система будет обладать

достаточно большим запасом устойчивости, и даже если некоторые коэффициенты модели объекта или регулятора будут отличаться от расчетных, система останется устойчивой.

На *Рис. 9* показана соответствующая структура для моделирования и оптимизации, а

также результаты оптимизации. При этом в результате также получено два отрицательных коэффициента, а именно: $K_P = -0,04766$, $K_I = 0,173667$ и $K_D = -0,418727$. Полученный переходный процесс показан на *Рис. 10*.

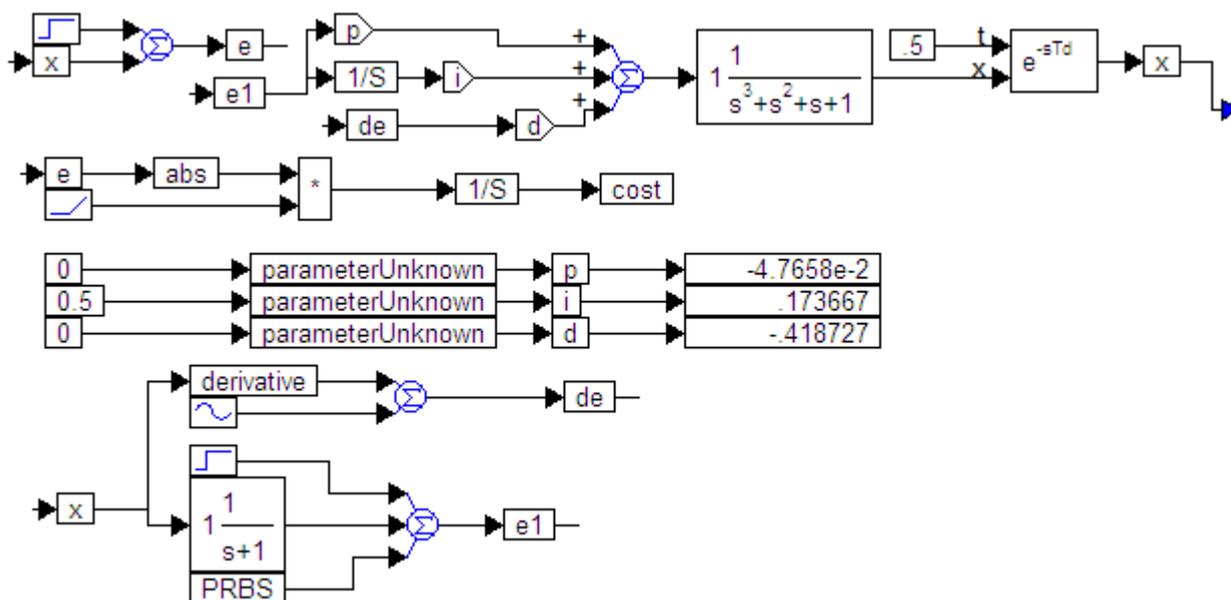


Рис. 9. Структурная схема для оптимизации регулятора с реальными моделями датчиков

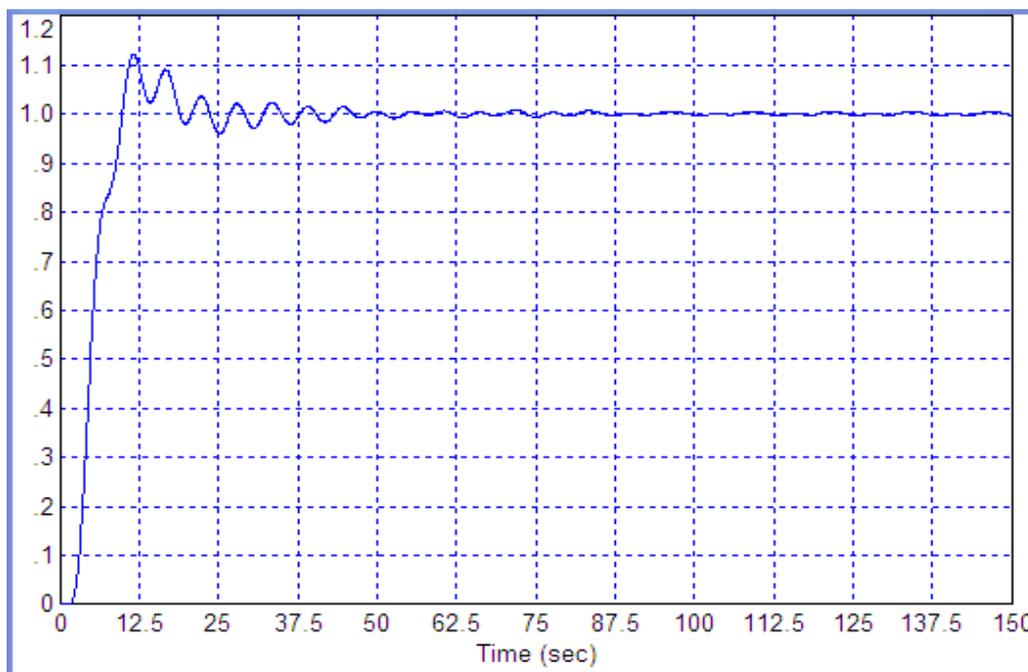


Рис. 10. Переходный процесс в системе по структуре, показанной на *Рис. 9*

Продемонстрируем робастность полученной системы. Для начала увеличим амплитуду обоих видов шумов датчика в 10 раз. Результат работы такой системы показан в виде переходного процесса на *Рис. 11* (синяя линия), для сравнения там же красной линией показан график с исходным процессом, соответствующий *Рис. 10*.

Видим, что в системе возникают колебания, амплитуда которых составляет около 6 %, но система остается устойчивой. Перерегулирование в системе не возрастает.

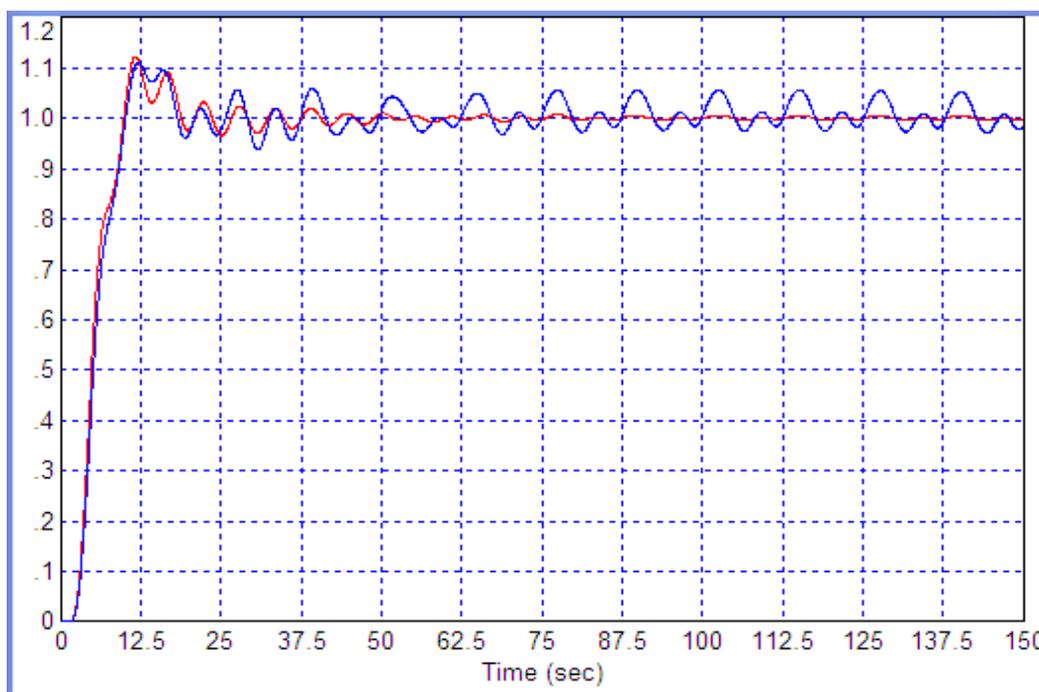


Рис. 11. Переходный процесс в случае, когда оба вида шумов увеличены по амплитуде в 10 раз (синяя линия), красной линией показан исходный график

4. ВОЗМОЖНОСТИ МЕТОДА ПРИ УХУДШЕНИИ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ ОБЪЕКТА И ДАТЧИКА

Вернем исходные значения шумов и увеличим постоянную времени фильтра в модели гироскопа в 10 раз, а также увеличим в 2,5 раза (до значения 5) запаздывание в модели объекта. Осуществим повторную оптимизацию регулятора. Получим значения его коэффициентов $K_p = -0,121$, $K_I = 0,05$

и $K_D = -0,315$. Результат работы такой системы показан в виде переходного процесса на Рис. 12. Видим, что в системе увеличиваются колебания, амплитуда которых сначала составляет около 5%, но постепенно затухает до пренебрежимо малой величины около 1%, система остается устойчивой. Перерегулирование в системе также не возрастает, хотя длительность переходного процесса увеличивается.

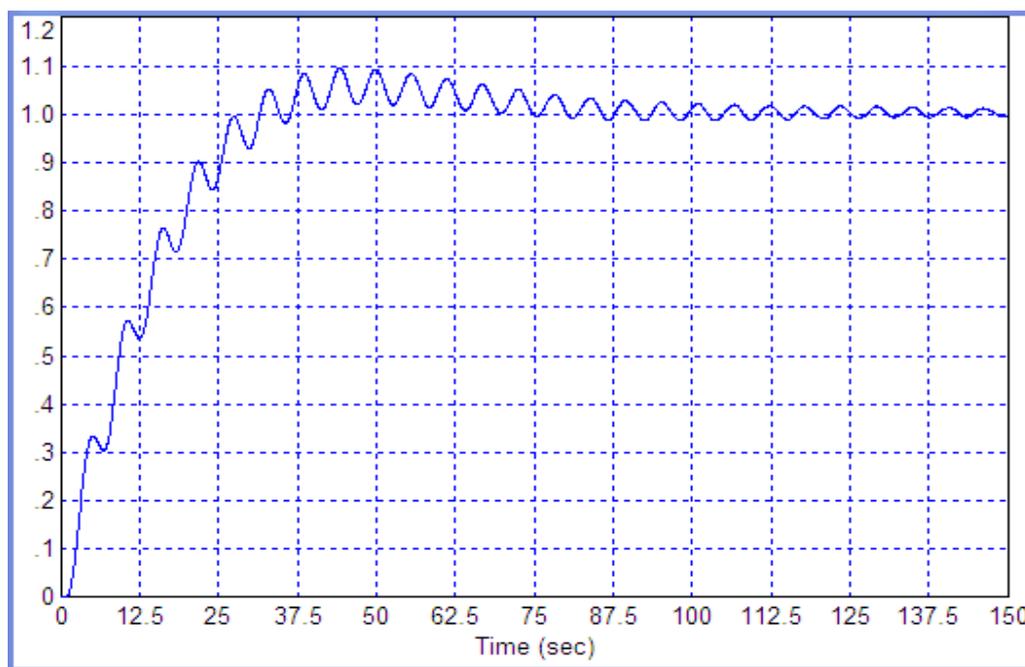


Рис. 12. Переходный процесс в системе с уменьшенным быстродействием объекта и датчика (гироскопа)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная работа продолжает серию исследований по методам расчета регуляторов с помощью численной оптимизации [3–10].

В результате проделанных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Совмещение двух датчиков может позволить соединить их достоинства, устраняя их недостатки. Этот вывод можно распространить на большее количество датчиков. В данной работе при отсутствии широкополосного датчика положения (то есть датчика выходной величины с малой динамической ошибкой) используется датчик ускорения. Интегрирование ускорения дает скорость. Поэтому хотя в системе нет датчика непосредственно этой величины, можно условно считать, что имеется датчик скорости, как последовательное соединение датчика ускорения и интегратора. Другой способ вычисления скорости через дифференцирование сигнала с выхода датчика положения менее привлекателен, поскольку при дифференцировании высокочастотные шумы возрастают, тогда как при интегрировании они уменьшаются.

2. Датчик скорости, состоящий из датчика ускорения и интегратора, целесообразно замыкать с регулятором напрямую, минуя вычитающее устройство, вычисляющее ошибку управления. Ранее в литературе такой подход не встречался.

3. Расчет регулятора следует осуществлять с учетом всех отличий датчиков от их идеальной модели, кроме того, целесообразно ввести искусственное дополнительное увеличение запаздывание в объекте, что позволит обеспечить робастные свойства системы.

4. Приведенный пример показал эффективность предложенных решений.

Полученные результаты использованы в разрабатываемом роботе.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России по государственному заданию №2014/138, тема проекта «Новые структуры, модели и алгоритмы для прорывных методов управления техническими системами на основе наукоемких результатов интеллектуальной деятельности», проект № 471.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Жмудь В. А. Моделирование, исследование и оптимизация замкнутых систем автоматического управления. Монография. Новосибирск, Изд-во НГТУ, 2012. – 335 с.
- [2] Жмудь В.А., Заворин А.Н. Структура модели для оптимизации системы с обратной связью. Патент РФ RU 2554291 С1. Опубл. 27.06.2015. Бюлл. № 18.
- [3] V. A. Zhmud. The Use of the Feedback Control Systems in Laser Physics Researching Experiments. // Proceedings of RFBR and DST Sponsored “The 2-nd

Russian-Indian Joint Workshop on Computational Intelligence and Modern Heuristics in Automation and Robotics”, 10 – 13 September, 2011, Additional volume, pp.40–43.

- [4] В.А. Жмудь, А.Н. Заворин. Метод проектирования энергосберегающих регуляторов для сложных объектов с частично неизвестной моделью. В кн.: Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XVI Международной конференции 30 июня – 03 июля 2014 г., Самара. Россия. С. 557–567.
- [5] The modeling tests of the new PID-regulators structures. Voevoda, A.A., Zhmud, V.A., Ishimtsev, R.Y., Semibalamut, V.M. 2009. Proceedings of the IASTED International Conference on Applied Simulation and Modelling, ASM 2009. P.165 – 168.
- [6] Modern key technologies in automatics: Structures and numerical optimization of regulators. Zhmud, V., Yadrishnikov, O., Poloshchuk, A., Zavorin, A. 2012. Proceedings - 2012 7th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2012.
- [7] The design of the feedback systems by means of the modeling and optimization in the program VisSim 5.0/6. Zhmud, V., Liapidevskiy, A., Prokhorenko, E. 2010. Proceedings of the IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control. PP. 27–32.
- [8] V. Zhmud, O. Yadrishnikov. Numerical optimization of PID-regulators using the improper moving detector in cost function. Proceedings of the 8-th International Forum on Strategic Technology 2013 (IFOST-2013), vol. II, 28 June – 1 July. Mongolian University of Science and Technology, Ulaanbaator, Mongolia. IEEE organized. 2013. P. 265–270. <http://www.must.edu.mn/IFOST2013/>
- [9] V. Zhmud, A. Polishchuk, A. Voevoda, R. V. Rao. The Tuning of the PID-Regulator for Automatic Control System of Thermo Energetic Equipment // Proceedings of the Fifth International Conference on Advances in Mechanical Engineering (ICAME-2011), June 06-08, 2011. Surat – 395 007, Gujarat, India. pp. 254-263.
- [10] Zhmud V.A., Zavorin A.N. Metodi di ottimizzazione del controllo numerico su una modelli troncati. Italian Science Review. 2014; 4(13). PP. 686-689. Available at URL: <http://www.ias-journal.org/archive/2014/april/Zhmud.pdf> и <http://www.ias-journal.org/archives/april-2014>



Вадим Аркадьевич Жмудь – заведующий кафедрой Автоматики НГТУ, профессор, доктор технических наук.
E-mail: oa0_nips@bk.ru



Олег Дмитриевич Ядрышников – аспирант кафедры Автоматики НГТУ, автор более 10 научных статей. Область научных интересов и компетенций – теория автоматического управления, оптимальные и адаптивные системы, оптимизация, многоканальные системы.
E-mail: oleg_yadr@mail.ru



Владимир Михайлович Семибаламут – директор ФГБУН «Геофизическая служба СО РАН». Область научных интересов и компетенций: автоматизация научного эксперимента, лазерная физика, геофизика, программное обеспечение, оптимизация.
E-mail: vladim28@yandex.ru



Виталий Геннадьевич Трубин - зав. лаб. кафедры Автоматики НГТУ, директор ООО «КБ Автоматика».
E-mail: trubin@ngs.ru

Control of Object with Feedback Loop Using Imperfect Position and Acceleration Sensors

Vadim Zhmud, Vladimir Semibalamut, Oleg Yadrishnikov, Vitaly Trubin

Abstract. The paper discusses the problem of balancing robot control loop with negative feedback. The controller (regulator) can be calculated by numerical optimization. Sensors of the controlled value are imperfect. Orientation angle sensor (gyroscope) has a limited speed, as well as binary quantization noise. An acceleration sensor (accelerometer) has the average drift value and Gaussian noise. None of these sensors is not sufficient to stabilize balancing of the robot effectively, but using of them both in a single control loop can achieve the required accuracy of control in static and dynamic. Method of sharing the two sensors to determine more accurately the single value, previously developed in theory, has been tested with simulation. Furthermore, the results are confirmed with their practical use with good effect.

Key words: automation, control, transient process, stability, quality of control, closed-loop system, the accuracy of the sensors, balancing robot, gyroscope, accelerometer

REFERENCES

- [1] Zhmud V. A. Modelirovanie, issledovanie i optimizatsiya zamknytyh sistem avtomaticheskogo upravleniya. Monografija. Novosibirsk, Izd-vo NGTU, 2012. – 335 s. (Zhmud V.A. Simulation study and optimization of locked systems of automatic control. Monograph. Novosibirsk, Publishing House of the NSTU, 2012. - 335 p.)
- [2] Zhmud V.A., Zavorin A.N. Struktura modeli dlja optimizatsii sistemy s obratnoj svyaz'ju. Patent RF RU 2554291 C1. Opubl. 27.06.2015. Bjull. № 18.
- [3] V. A. Zhmud. The Use of the Feedback Control Systems in Laser Physics Researching Experiments. // Proceedings of RFBR and DST Sponsored “The 2-nd Russian-Indian Joint Workshop on Computational Intelligence and Modern Heuristics in Automation and Robotics”, 10–13 September, 2011, Additional volume, pp.40–43.
- [4] Zhmud V.A., Zavorin A.N. Method of designing energy-efficient regulators for complex objects with partially unknown model. Proc.: The control and modeling in complex systems. Proceedings of the XVI International Conference June 30-July 3, 2014, Samara. Russia. p. 557-567.
- [5] The modeling tests of the new PID-regulators structures. Voevoda, A.A., Zhmud, V.A., Ishimtsev, R.Y., Semibalamut, V.M. 2009. Proceedings of the IASTED International Conference on Applied Simulation and Modelling, ASM 2009. P.165 – 168.
- [6] Modern key technologies in automatics: Structures and numerical optimization of regulators. Zhmud, V., Yadrishnikov, O., Poloshchuk, A., Zavorin, A. 2012. Proceedings - 2012 7th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2012.
- [7] The design of the feedback systems by means of the modeling and optimization in the program VisSim 5.0/6. Zhmud, V., Liapidevskiy, A., Prokhorenko, E. 2010. Proceedings of the IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control. PP. 27–32.
- [8] V. Zhmud, O. Yadrishnikov. Numerical optimization of PID-regulators using the improper moving detector in cost function. Proceedings of the 8-th International Forum on Strategic Technology 2013 (IFOST-2013), vol. II, 28 June – 1 July. Mongolian University of Science and Technology, Ulaanbaator, Mongolia. IEEE organized. 2013. P. 265 – 270. <http://www.must.edu.mn/IFOST2013/>
- [9] V. Zhmud, A. Polishchuk, A. Voevoda, R. V. Rao. The Tuning of the PID-Regulator for Automatic Control System of Thermo Energetic Equipment // Proceedings of the Fifth International Conference on Advances in Mechanical Engineering (ICAME-2011), June 06-08, 2011. Surat – 395 007, Gujarat, India. pp. 254-263.
- [10] Zhmud V.A., Zavorin A.N. Metodi di ottimizzazione del controllo numerico su una modelli troncati. Italian Science Review. 2014; 4(13). PP. 686-689. Available at URL: <http://www.ias-journal.org/archive/2014/april/Zhmud.pdf> and <http://www.ias-journal.org/archives/april-2014>

**II. Робототехника.
Программные средства и системы.
Телемеханика и телеметрия.**

Содержание раздела:

- В.И. Гужов, С.П. Ильиных, П.С. Рыжов. Реализация программного обеспечения для цифровой голографии в среде CUDA. ФГБОУ ВО НГТУ (Новосибирск, Россия). Автоматика и программная инженерия. 2015. № 3 (13). С. 29–40.

Реализация программного обеспечения для цифровой голографии в среде CUDA

В.И. Гужов, С.П. Ильиных, П.С. Рыжов
НГТУ, Новосибирск, Россия

Аннотация: в статье рассматривается разработка программного обеспечения для цифровой голографии в среде CUDA оптимизированного по критерию времени выполнения.

Ключевые слова: цифровая голографическая интерферометрия, GPGPU, CUDA, параллелизация алгоритма цифровой голографической интерферометрии, дискретное преобразование Френеля, подавление постоянной составляющей, удаление спекл-шумов.

ВВЕДЕНИЕ

В данной работе рассматривается применение графического процессора (ГП, *англ. graphics processing unit, GPU*) с программно-аппаратной архитектурой параллельных вычислений *CUDA* (*англ. Compute Unified Device Architecture*), для научных вычислений в сфере цифровой голографической интерферометрии (ЦИ), которая позволяет существенно увеличить вычислительную производительность [1, 4], благодаря использованию графических процессоров фирмы *Nvidia*. Для этого были решены задачи оптимизации таких этапов ЦИ, как дискретное преобразование Френеля, подавление постоянной составляющей и удаление действительного изображения, устранение фазовой неоднозначности, устранение спекл-шумов и другие этапы. Реализация этапов алгоритма осуществлена для графических карт одного из последних поколений *GeForce 700 Series*, а также *Quadro K4000*, которые

оптимизированы для выполнения операций с вещественными числами одинарной точности. Результатом параллелизации программного обеспечения (ПО) является значительное (в 1,5-15 раз) уменьшение времени выполнения шагов алгоритма.

Полученные результаты предоставляют возможность применения алгоритма для цифровой голографической интерферометрии реального времени.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В результате аналитического обзора и анализа существующих методов голографической интерферометрии [17-29] было выяснено, что наиболее эффективно данная задача может быть решена при помощи *CUDA*-параллелизации метода цифровой голографической интерферометрии, использующего преобразование Френеля.

После исследования возможностей *CUDA Toolkit 7.0*, а также аппаратной архитектуры *CUDA* для параллелизации этапов алгоритма было решено использовать такие модули *CUDA Toolkit*, как *cuFFT* для выполнения дискретного преобразования Фурье, *cuBLAS* для выполнения основных операций линейной алгебры. Также используются *CUDA* ядра, т.е. самописные функции, которые выполняются параллельно на графических процессорах *CUDA*. Этапы цифровой голографической интерферометрии и способ их реализации в разрабатываемом программном обеспечении (ПО) представлены на *Рис. 1*.



Рис. 1. Этапы цифровой голографической интерферометрии и их реализации

Алгоритм цифровой голографической интерферометрии детально рассмотрен в следующем разделе.

ОПИСАНИЕ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ

Метод цифровой голографической интерферометрии базируется на измерении различий оптических разностей хода света (рис.2), вызываемых изменением коэффициента преломления в прозрачных средах или деформацией твёрдых тел [3]. Основой метода является интерференция двух световых полей, являющихся двумя разными состояниями объекта (до и после деформации). Наглядным примером ЦГИ может служить последовательность этапов, представленных на рисунках 2 и 3, где исходный объект – пластинка с нанесённой решетчатой текстурой. Регистрация цифровых голограмм исходного и деформированного состояния тел осуществляется при помощи специальной голографической установки. Голограммы, зарегистрированные до и после деформации пластины, являются исходными данными для дальнейшей цифровой голографической интерферометрии (рис. 3).

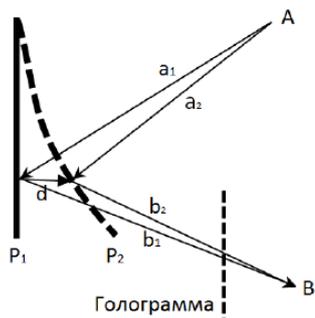


Рис.2 – Схема голографической интерферометрии [3].

На рисунке 2 форма объекта исследования до деформации обозначена \$P_1\$, после деформации – \$P_2\$. При этом в рассматриваемой точке произошло смещение на величину \$d\$. Из голограммы восстанавливается объект при помощи света, испускаемого из точки \$A\$, а рассматривается из точки \$B\$. Оптическая разность хода лучей \$\delta\$ может быть вычислена как

$$\delta(x, y) = (a_1(x, y) + b_1(x, y)) - (a_2(x, y) + b_2(x, y)) \quad (1)$$

где \$a_1, a_2, b_1, b_2\$ – расстояния, обозначенные на Рис. 2.

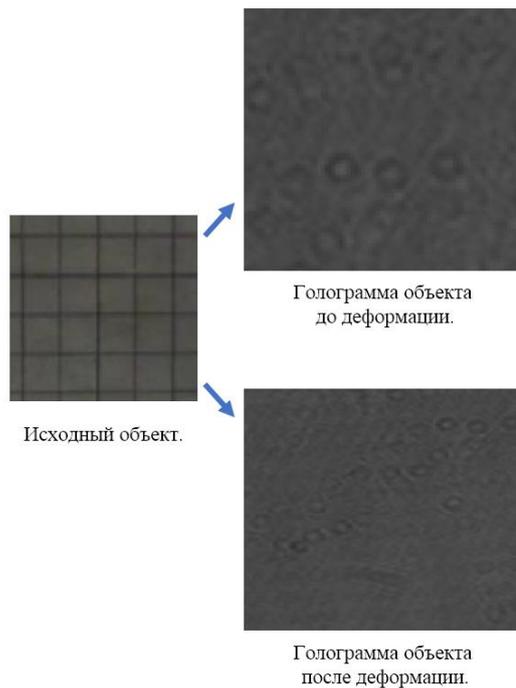


Рис.3 – Регистрация голограмм

В цифровой голографической интерферометрии строится цифровая голограмма для каждого из состояний объекта, выполняется построение поля разницы фаз, характеризующее смещение исходного объекта (рис. 4).

Преобразование Френеля определяется следующим образом:

$$\Phi(v) = \int_{-\infty}^{\infty} E(x)e^{-j(2\pi v+x)^2} dx \quad (2)$$

Введём \$\mu = 2v\$, тогда

$$\Phi(v) = \int_{-\infty}^{\infty} E(x)e^{(-j(2\pi\mu x) + (-j2\pi v^2) + (-jx^2))} dx = e^{-j\left(\frac{2\pi\mu}{2}\right)^2} \int_{-\infty}^{\infty} [E(x)e^{-jx^2}] e^{-j2\pi\mu x} dx \quad (3)$$

Таким образом, чтобы выполнить преобразование Френеля функции \$E(x)\$, её необходимо умножить на \$e^{-jx^2}\$, выполнить преобразование Фурье и полученный Фурье-образ \$F(\mu)\$ умножить на \$e^{-j\left(\frac{2\pi\mu}{2}\right)^2}\$.

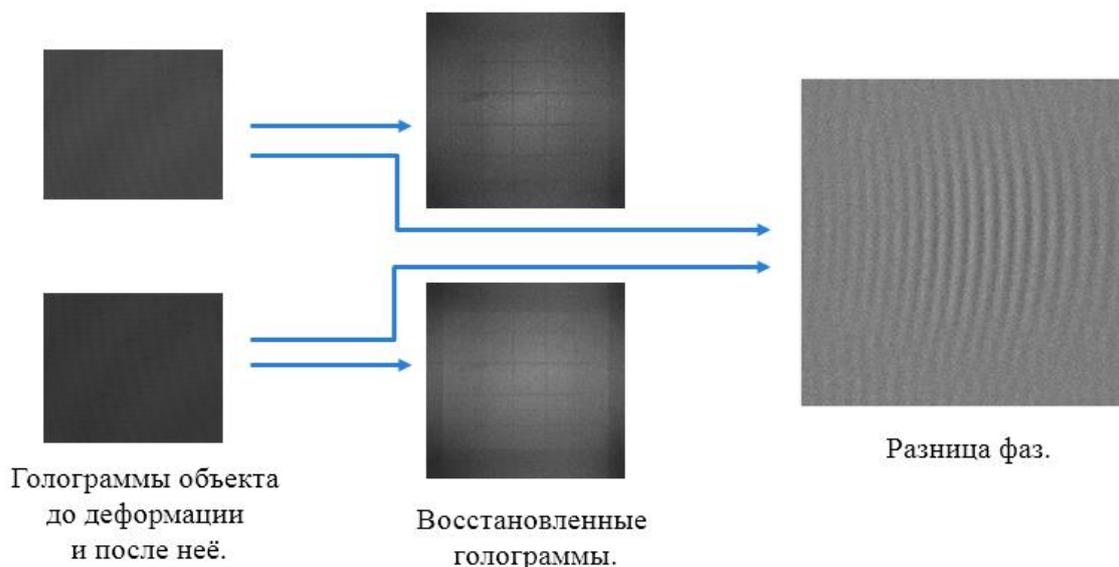


Рис. 4 - Этапы цифровой голографической интерферометрии.

В идеальном случае во внеосевой голографии все составляющие восстановленного изображения оказываются пространственно отделены друг от друга, и достаточно просто выбрать только нужную часть для дальнейшей работы. На практике при малых углах отклонения опорного пучка изображения, находящиеся в разных дифракционных порядках, частично перекрываются. При этом если действительное изображение расфокусировано, то при наложении на мнимое оно будет образовывать зашумление, которое можно подавить вместе с постоянной составляющей. Поэтому при использовании малых углов отклонения опорного пучка важно, чтобы одно из изображений в 1 или -1 порядках дифракции было расфокусировано.

Если рассматривать яркость частей изображения в разных дифракционных порядках, то яркость постоянной составляющей будет на порядок выше остальных. Следовательно, при цифровом восстановлении в процессе нормализации значений большая часть диапазона будет приходиться на постоянную составляющую, что не обеспечит необходимого контраста для выделения остальных составляющих. Визуально постоянная составляющая выглядит как яркий прямоугольник в центре восстановленного изображения, представленный на рисунке 5.

Интенсивность постоянной составляющей в спектральном диапазоне согласно [16] определяется следующим соотношением

$$Z = \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} U_h(k\Delta x, l\Delta y) \quad (4)$$

где N – размер голограммы в пикселах. Для того чтобы удалить постоянную составляющую авторы предлагают отфильтровать голограмму фильтром частот, эквивалентным средней интенсивности голограммы. Зачастую это означает получение

пилообразных функций фазы при голографическом восстановлении

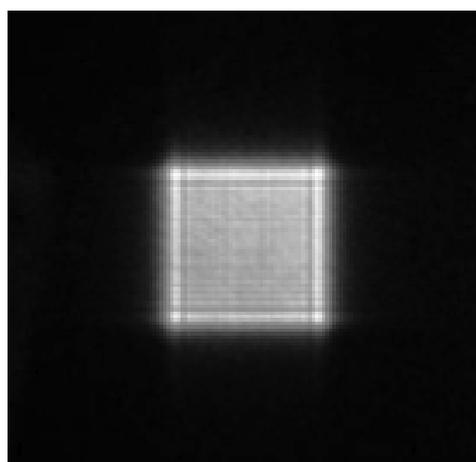


Рис.5 – Постоянная составляющая [3].

$$U'_h(k\Delta x, l\Delta y) = \frac{1}{N^2} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} U_h(k\Delta x, l\Delta y) \quad (5)$$

Проблемой данного метода является то, что восстановленное изображение также теряет интенсивность. К достоинствам этого метода можно отнести его вычислительную простоту.

Фазы, кратные 2π , при вычислении поля фаз по цифровым голограммам будут неотличимы друг от друга, данное явление называется фазовой неоднозначностью. Алгоритмы устранения фазовой неоднозначности называют алгоритмами развёртывания фазы. На практике это означает получение пилообразных функций фазы при голографическом восстановлении (рис. 6).

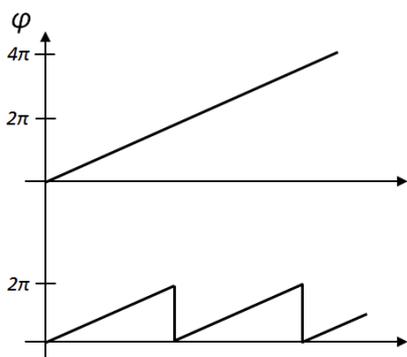


Рис. 6 - Полная фаза (сверху) и восстановленная фаза (снизу).

Существует большое количество алгоритмов и их модификаций для развёртывания фазы [3]. Многие из них формируют так называемую пороговую функцию, которая показывает, в какой точке функции фазы необходимо сделать скачок на 2π или -2π (рис. 7).

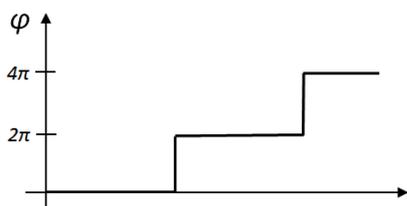


Рис. 7 - Пороговая функция для развёртывания фазы.

Самым простым способом получения пороговой функции является анализ полученного изображения фазы. Там, где в соседних точках изображения будет скачок значений по модулю больший π , будет находиться один из переходов функции. Знак перехода будет определяться знаком разницы значений в этих точках.

Получить полную фазу по двум восстановленным голограммам можно пользуясь следующей формулой:

$$d(x, y) = \Delta\varphi(x, y) \frac{\lambda}{4\pi} \quad (6)$$

Таким образом, можно вычислить значение поля смещения в каждой из точек восстановленного изображения и построить трёхмерную модель смещения поверхности. Следует отметить, что полученное поле смещения будет относительное, т.е. представлять собой разницу между двумя состояниями объекта.

Для устранения возникающих при голографическом восстановлении спекл-шумов необходим сглаживающий фильтр. Однако пилообразный характер функции разности фаз сильно сужает круг допустимых вариантов. Важно понимать, что при фильтрации места фазовых переходов на $\pm 2\pi$ не должны быть сглажены,

иначе алгоритм развёртывания фазы может пропустить фазовый переход. Следовательно, фильтр должен содержать априорную информацию о пилообразном характере функции разности фаз. Фильтр Калмана, широко используемый в областях обработки различного рода сигналов, позволяет задавать априорную информацию о характере системы.

Алгоритм Калмана состоит из двух повторяющихся этапов: экстраполяции и коррекции. На первом этапе делается предсказание состояния системы в текущий момент времени с учётом неточности измерений на основании состояния системы в предыдущий момент времени. На втором, измеренное значение корректирует предсказанное также с учётом неточности и зашумленности.

Рассмотрим математическое представление фильтра Калмана. На этапе экстраполяции вычисляются две величины: предсказанное состояние системы x_k' и предсказанное значение ошибки ковариации P_k' . Напомним, что ковариация – это мера линейной зависимости двух случайных величин. Индекс k обозначает текущее состояние, $k-1$ – предыдущее. Таким образом, предсказанное состояние системы можно вычислить как

$$x_k' = F_k x_{k-1} + B_k u_{k-1} \quad (7)$$

где F_k – матрица перехода между состояниями, определяющая динамическую модель системы; x_{k-1} – состояние системы в предыдущий момент времени; B_k – матрица применения управляющего воздействия, которой мы можем пренебречь в нашем случае, поскольку управляющих воздействий нет; u_{k-1} – управляющее воздействие в прошлый момент времени.

Рассмотрим одномерный вариант фильтра Калмана применительно к нашему процессу. Как уже было отмечено, измерения x_k будут представлять отфильтрованные значения разности фаз. Матрицу, определяющую отношение между измерениями и состоянием системы, H_k возьмём единичной. Это будет означать, что все измерения (точки функции разности фаз) одинаково влияют на состояние системы (функции разности фаз). Матрица перехода между состояниями F_k , будет определять динамику функции разности фаз. Именно в нее и заложим пилообразный характер функции. Тогда F_k будет определено как

$$F_k = c_1 \frac{x_{k-1} \bmod 2\pi}{2\pi} + c_2 \quad (8)$$

где \bmod – операция вещественного остатка от деления, c_1 и c_2 – матрицы настроечных коэффициентов.

Ковариацию шума всего процесса в целом Q_k и ковариацию шума измерений R_k будем подбирать экспериментально, причем для удобства возьмем их одинаковыми на всей протяженности функции. Тогда для фильтрации одномерной функции

разности фаз можно определить следующий фильтр Калмана

$$\begin{cases} x'_k \left(c_1 \cdot \frac{x_{k-1} \bmod 2\pi}{2\pi} + c_2 \right) x_{k-1} \\ P'_k = \left(c_1 \cdot \frac{x_{k-1} \bmod 2\pi}{2\pi} + c_2 \right)^2 P_{k-1} + Q \\ x_k = x'_k + \frac{P'_k}{P'_k + R} (y_k - x'_k) \\ P_k = \frac{P'_k R}{P'_k + R} \end{cases} \quad (9)$$

Предложенный вариант фильтра Калмана является одномерным, вместе с тем возможен и двумерный случай. Для его реализации одномерный фильтр Калмана сначала может применяться для каждой строки изображения, затем для каждого столбца. Таким образом, предложенный вариант фильтра Калмана позволяет эффективно подавлять шумы, возникающие при цифровом голографическом восстановлении. Он не препятствует процессу развёртывания фазы благодаря заданию в фильтре априорной информации о характере функции разности фаз. Данный этап является завершающим.

ПРОФИЛИРОВАНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

В качестве инструмента профилирования используются средства анализа, доступные в интегрированной среде разработки (англ. *Integrated Development Environment, IDE*) Visual Studio [2]. Для того, чтобы обнаружить участки кода, которые выполняются наиболее продолжительное время и/или вызываются с наибольшей частотой, мы запускаем Performance Wizard (мастер производительности) из меню Analyze (анализ) в Visual Studio 2012/2008. В Visual Studio 2005 эта функциональность доступна в Performance Tools

(инструменты производительности) из меню Tools (инструменты).) Это запустит трёхэтапный мастер, где первый этап позволяет указать целевой проект или web-сайт. Второй этап предлагает два различных метода профайлинга: sampling (сэмплинг) и instrumentation (инструментирование). После завершения работы мастера будет создана новая сессия оценки производительности. Сессия включает в себя целевое приложение, но на начальном этапе в ней отсутствуют отчёты о производительности. Для того, чтобы начать профайлинг, необходимо нажать кнопку Launch with Profiling (начать профилирование). После того, как будет запущено приложение и выполнена профилируемая задача, если оно не будет закрыто автоматически, то необходимо его незамедлительно закрыть по завершении. Visual Studio автоматически добавляет вновь созданный отчёт о производительности в сессию и начинает анализировать его. По завершении анализа Visual Studio Profiler отобразит Performance Report Summary (отчёт о производительности), который включает в себя наиболее «дорогие» (выполняющиеся во время профайлинга наиболее продолжительно) функции в виде списка (рис. 8) и дерева (рис. 9). Отчёт показывает эти функции двумя различными способами. Первый измеряет работу, выполненную напрямую или косвенно представленными функциями. Для каждой функции числа представляют накопленное значение для тела функции, а также всех дочерних вызовов. Второй способ не учитывает время, затраченное на дочерние вызовы. Во фрагментах таблиц, показанных на рисунках 8 и 9, столбцы значений “inclusive time” отображают время, или процент от общего времени, затраченного на выполнение тела функции и её дочерних вызовов. Столбцы значений “exclusive time” отображают лишь время, или процент от общего времени, затраченного на выполнение функции без учёта ещё дочерних вызовов. Таким образом можно обнаружить участки кода, занявшие наибольшее время выполнения программы, а затем оптимизировать код, используя стандартные практики [11-13].

Function Name	Number of Calls	Elapsed Inclusive Time %	Elapsed Exclusive Time %	Avg Elapsed Inclusive Time	Avg Elapsed Exclusive Time
holography::ImageLoader::Load	1	33,10	29,22	10 835,59	9 567,14
`vector constructor iterator`	4 096	49,14	22,84	3,93	1,83
alglib::complex::complex	16 777 216	17,45	17,45	0,00	0,00
_RTC_CheckEsp	33 560 576	9,49	9,49	0,00	0,00
holography::Fresnel::Reconstruct	1	56,86	6,33	18 615,42	2 072,31
holography::Experiment::Step	1	61,88	5,02	20 259,07	1 643,65
main	1	100,00	3,75	32 736,94	1 227,77
_FreeImage_GetPixelColor@16	16 777 216	3,13	3,13	0,00	0,00
operator new[]	20 485	1,57	1,57	0,03	0,03
_FreeImage_Load@12	1	0,99	0,99	324,83	324,83
holography::ReferenceBeam::GenerateField	1	0,16	0,16	53,16	53,16

Рис.8 - Фрагмент таблицы результатов профайлинга последовательного C++ кода: функции, выполняемые наиболее продолжительное время.

Function Name	Number of Calls	Elapsed Inclusive Time %	Elapsed Exclusive Time %	Avg Elapsed Inclusive Time	Avg Elapsed Exclusive Time
← CUDA-holography-project.exe	0	100,00	0,00	0,00	0,00
← mainCRTStartup	1	100,00	0,00	32 737,10	0,01
← _tmainCRTStartup	1	100,00	0,00	32 737,09	0,06
← main	1	100,00	3,75	32 736,94	1 227,77
← holography::Experiment::Undertake	1	96,25	0,00	31 509,14	0,24
← holography::Experiment::Step	1	61,88	5,02	20 259,07	1 643,65
← holography::Fresnel::Reconstruct	1	56,86	6,33	18 615,42	2 072,31
← vector constructor iterator	4 096	49,14	22,84	3,93	1,83
← alglib::complex::complex	16 777 216	17,45	17,45	0,00	0,00
← _RTC_CheckEsp	16 781 312	8,85	8,85	0,00	0,00
← operator new[]	8 194	1,23	1,23	0,05	0,05
← holography::Experiment::LoadImag	1	34,12	0,00	11 168,61	0,00
← holography::ImageLoader::Load	1	34,12	0,00	11 168,57	0,00
← holography::ImageLoader::Lo	1	33,10	29,22	10 835,59	9 567,14
← _FreeImage_GetPixelColor	16 777 216	3,13	3,13	0,00	0,00

Рис.9 - Фрагмент таблицы результатов профайлинга последовательного С++ кода: дерево вызовов функций.

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ

Приход многоядерных центральных процессоров (ЦП) и многоядерных графических процессоров (ГП) означает то, что параллельные системы становятся актуальнее как в сфере научных вычислений, так и у обычных пользователей. Кроме того, параллелизм современных систем продолжает масштабироваться согласно закону Мура, что делает актуальной задачей разработку программного обеспечения, которое может работать параллельно, наиболее эффективно используя возрастающее число процессорных ядер. Так, например, графические 3D приложения прозрачно масштабируются на значительно разнящееся число ядер.

Параллельная программная модель CUDA разработана для того, чтобы решить эту задачу, оставляя низкий порог вхождения для программистов, знакомых со стандартным языком программирования, таким, как С. В её основе лежат три основных абстракции – иерархия групп потоков, разделяемая память и барьерная синхронизация. Данные абстракции легко раскрываются программистам, как минимальный набор расширений языка.

Данная декомпозиция сохраняет выразительность языка, позволяя потокам взаимодействовать для решения подпроблем, в то же время делает возможным автоматическую масштабируемость. Действительно, каждый блок потоков может быть использован планировщиком в любом доступном мультипроцессоре ГП, в любом порядке - параллельно или последовательно. Таким образом, скомпилированная CUDA программа может быть выполнена на любом числе мультипроцессоров, как это иллюстрировано на рисунке 10, только исполняющей системе необходимо знать число физических мультипроцессоров.

CUDA С расширяет язык, позволяя программистам определять С функции, называемые ядрами, которые при вызове выполняются N раз параллельно в N различных потоках CUDA, в

противоположность обычным С функциям, которые выполняются только один раз при вызове.

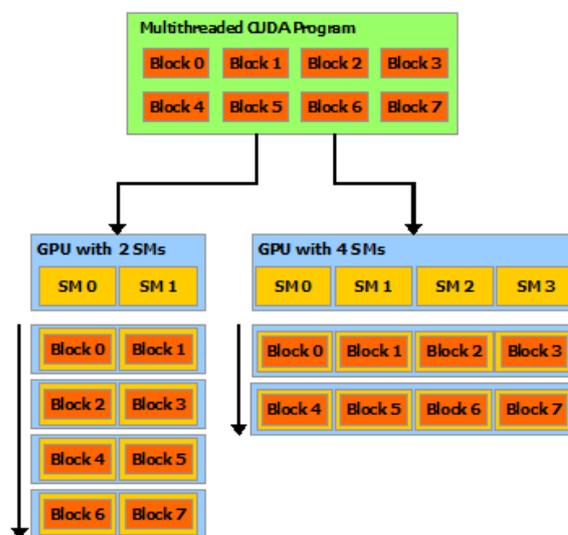


Рис.10 – Автоматическая масштабируемость CUDA [4].

Ядра определяются спецификатором объявления `__global__`, а число CUDA потоков, в которых выполняется ядро, указывается с использованием расширения синтаксиса `<<<...>>>` (см. расширения языка С[4]). Каждый поток, исполняющий ядро, получает уникальный идентификатор, доступный в пределах ядра через встроенную `threadIdx` переменную.

В качестве наглядного примера различия в принципе работы параллельного и последовательного кода на листингах 1 и 2 представлены фрагменты кода функции генерации поля опорного пучка, задействованной в разрабатываемом ПО. При использовании стандартного подхода на С++ выполнение функции осуществляется последовательно на процессоре, при использовании CUDA ядра выполнение функции осуществляется параллельно сразу во множестве вычислительных блоков видеокарты CUDA. В данном случае операция выполняется для 65 тыс. элементов, где в последовательном варианте осуществляется проход по двумерному массиву, а в параллельном варианте ядро выполняется параллельно для множества

элементов, индекс которых вычисляется на начальном этапе из имеющихся данных о текущем блоке и потоке, а также о размерности блока.

Листинг 1. Последовательный код C++

```
void GenerateFieldSerial(double ccd_pixel_dist, int size_in_pixel, double angle,
alglib::complex**& output_field) {
    // ...
    for (int i = 0; i < size_in_pixel; i++) {
        double phase_angle = -wave_num * sin(angle) * ccd;
        double line_real = cos(phase_angle) * intensity;
        // ...
        for (int j = 0; j < size_in_pixel; j++) {
            outputField[i][j].x = line_real;
            // ...
        }
        // ...
    }
}

// Выполнение операции для 65 тыс. элементов
GenerateFieldSerial(ccd_pixel_dist, 256, angle, output_field);
```

Листинг 2. Параллельный код CUDA

```
__global__ void GenerateFieldParallel(double ccd_pixel_dist, double angle,
cufftComplex*& outputField) {
    int index = blockDim.x * blockIdx.x + threadIdx.x;
    int i = index / size_in_pixel;
    int j = index % size_in_pixel;
    // ...
    double phase_angle = -wavenum * sin(angle) * (ccd + ccdPixelDist * i);
    double line_real = cos(phase_angle) * intensity;
    // ...
    outputField[i * size_in_pixel + j].x = line_real;
    // ...
}

// Выполнение операции для 65 тыс. элементов
GenerateFieldParallel<<<256, 256>>>(ccd_pixel_dist, angle, output_field);
```

РЕАЛИЗАЦИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЯДЕР CUDA

Код ядра CUDA циклического сдвига матрицы, используемый в разрабатываемом ПО, представлен на листинге 3. Сначала вычисляется индекс текущего элемента при помощи имеющихся данных о порядковых номерах блока и потока, на котором выполняется данное ядро. Затем вычисляются индексы элементов матрицы, которые будут смещены. На заключительном этапе выполняется операция обмена для данных элементов.

CUDA является языком, который обеспечивает параллелизм на двух уровнях. Существуют потоки и блоки потоков. Данные параметры задаются при вызове ядра между тремя треугольными скобками $\langle\langle\langle B, T \rangle\rangle\rangle$, где B – число блоков, а T – число потоков в каждом блоке. Архитектура CUDA такова, что пользователю, т.е. программисту, неизвестно, что параллелизм состоит из четырёх уровней. В действительности, блок потоков разделяется на подблоки, называемые варпами

(англ. warp). Размером варпа является число потоков в варпе, данная единица используется в аппаратное обеспечение для организации доступа к памяти и отправке инструкций [6].

Блок потоков, планируемый на потоковых мультипроцессорах (ПМ), разделяется на варп. Таким образом, блоки имеют разделяемую память, доступная внутри блока, т.к. находится на одном ПМ. Число блоков каждого ПМ зависит от лимита устройства, и его загруженности. Максимальное число блоков ПМ – 8 для 1.0-2.x версий вычислительной совместимости (ВЧ) и 16 для версий 3.x [7].

Наиболее оптимальным в общем случае является 128 или 256 потоков на каждый блок, тем не менее для каждой конкретной задачи может существовать лучшее большее или меньшее количество потоков на блок. Выбор слишком большого числа потоков может вызвать замедление работы из-за ограниченного числа регистров, выбор слишком малого числа потоков может вызывать сложности с разделяемой памятью, а также количеством блоков из-за ограничения в 8 (или 16)

блоков на каждый ПМ, что приведёт к неэффективному использованию ГП [8].

Ядро циклического сдвига вызывается для половины элементов матрицы, таким образом будет

совершено $\frac{N-2}{2}$ обменов элементов параллельно, где N – количество элементов в матрице.

Листинг 3. Код ядра CUDA циклического сдвига матрицы

```
__global__ void MatrixHalfSizeCircularShiftKernel(cufftComplex *matrix, int
size) {
    int index = blockDim.x * blockIdx.x + threadIdx.x;

    int source_i = index / size;
    int source_j = index % size;

    int destination_i = (source_i + (size / 2)) % size;
    int destination_j = (source_j + (size / 2)) % size;

    cufftComplex temp = matrix[destination_i * size + destination_j];
    matrix[destination_i * size + destination_j] = matrix[source_i * size +
source_j];
    matrix[source_i * size + source_j] = temp;
}
```

Листинг 4. Фрагмент C++ кода вызова ядра CUDA

```
#define THREADS_PER_BLOCK 256

void MatrixCUDAUtils::MatrixHalfSizeCircularShiftInplace(cufftComplex*& matrix,
int size) {
    int blocks_count = ((size * size) / 2) / THREADS_PER_BLOCK;
    MatrixHalfSizeCircularShiftKernel<<<blocks_count,
THREADS_PER_BLOCK>>>(matrix, size);
    cudaError_t error_code = cudaGetLastError();
    if (error_code != cudaSuccess) {
        fprintf(stderr, "Failed to launch MatrixHalfSizeCircularShiftKernel
kernel (error code %s)!\n", cudaGetErrorString(error_code));
        exit(EXIT_FAILURE);
    }
}
```

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОНСТАНТНОЙ ПАМЯТИ CUDA

Современные графические процессоры обладают высоким вычислительным потенциалом. Данное обстоятельство на начальном этапе вызвало значительный интерес к тому, чтобы использовать ГП для вычислений общего назначения вместо ЦП. Зачастую для ГП с большим количеством вычислительных блоков узким местом является не пропускная способность вычислительных блоков, а ширина канала между памятью ЦП и ГП. Из-за большого количества арифметически-логических устройств (АЛУ) на графическом процессоре иногда невозможно поставлять такой объём данных для обработки, чтобы не допускать простоя вычислительных блоков. Таким образом стоит исследовать способы, которыми можно уменьшить объём трафика памяти, необходимого для решения задачи [9].

Язык CUDA предоставляет в распоряжение другой вид памяти, известный как константная память. Из названия становится ясно, что этот вид памяти используется для данных, неизменных в течение выполнения CUDA ядра.

Всего доступно 64 КБ константной памяти на ГП. Константная память кэшируется, таким образом обращение к константной памяти эквивалентно чтению из памяти устройства, только в случае кэш-промаха, в противном случае данная операция будет эквивалентна чтению из константного кэша [4].

Для всех потоков половины варпа, чтение из кэша осуществляется также быстро, как и чтение из регистров, если все потоки обращаются к одному и тому же адресу. Доступ потоков к разным адресам в пределах половины варпа последователен, таким образом трудоёмкость данной операции возрастает линейно с увеличением количества различных адресов, по которым обращаются потоки в пределах половины варпа.

Для того, чтобы объявить переменную в константной памяти, используется ключевое слово `__constant__`, как это продемонстрировано на листинге 5. Переменные в константной памяти всегда объявляются в глобальной области, таким образом, механизм объявления переменных в константной памяти эквивалентен объявлению переменных в разделяемой памяти.

Функция `cudaMemcpyToSymbol()` – это специальная версия функции `cudaMemcpy()`, где осуществляется копирование из памяти устройства в область константной памяти ГП, пример использования данной функции в разрабатываемом ПО представлен на листинге 6.

Операция чтения из константной памяти, пример которой представлен на листинге 7, может быть оттранслирована между потоками одной половины варпа, таким образом эффективно уменьшая общее количество операций чтения. Т.к. константная память кэширована, то последовательное обращение к одному и тому же адресу не увеличит трафик между блоком и памятью устройства.

Константы, известные на момент компиляции программы, должны быть определены при помощи макросов препроцессора (к примеру, `#define`). Использование переменных в константной памяти устройства обоснованно в случае, если точно известно, что значения не будут изменены в течение времени выполнения ядра. Если же количество констант относительно небольшое, и их значения влияют на ветвления при выполнении ядра, то лучшим вариантом может также оказаться использование шаблонов CUDA

ядер, где в качестве параметров шаблонов используются константы [15].

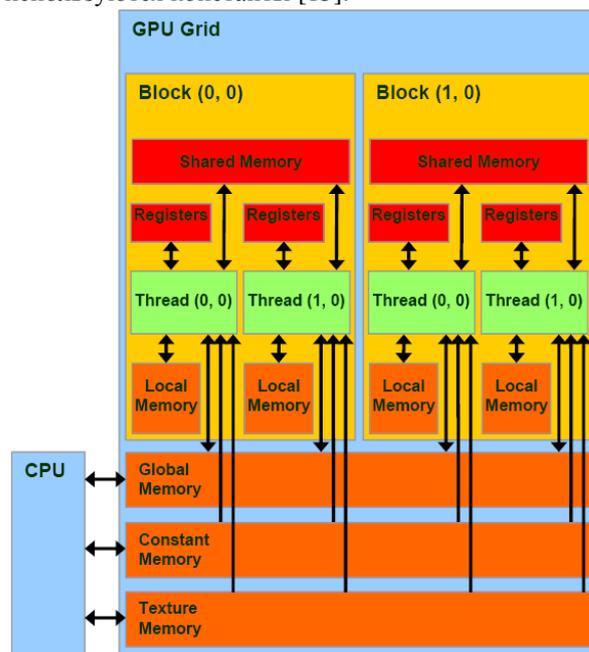


Рис.11 – Модель памяти CUDA [9].

Листинг 5. Фрагмент кода глобального пространства

```
#define FACTOR_ARRAY_SIZE 2
__constant__ double device_factor[FACTOR_ARRAY_SIZE];
```

Листинг 6. Фрагмент последовательного C++ кода

```
double host_factor[FACTOR_ARRAY_SIZE];
double host_factor[0] = -HOLO_PI * waveLength * z_distance;
double host_factor[1] = -wavenum * z_distance;
cudaMemcpyToSymbol(device_factor, host_factor, sizeof(double) *
FACTOR_ARRAY_SIZE);
```

Листинг 7. Фрагмент кода CUDA ядра

```
double var_real = cos(device_factor[0] * dist);
double var_img = sin(device_factor[1] * dist);
```

ДВУМЕРНОЕ ДИСКРЕТНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ФРЕНЕЛЯ СРЕДСТВАМИ CUFFT

Если плоскость голограммы представлена в пространственной области, то при восстановлении преобразование Фурье переведет эту область в частотную. Алгоритм преобразования Френеля обеспечивает простое масштабирование восстановленного изображения, однако это накладывает ряд ограничений на конструкцию измерительной системы, в частности нижняя и верхняя границы допустимого расстояния записи голограммы становятся значимым фактором. Помимо этого, уменьшенное восстановленное изображение объекта занимает меньшую площадь в дискретном цифровом изображении. В ходе вычисления преобразования Френеля преобразование Фурье применяется 1 раз. Из

непрерывного преобразования Фурье можно получить дискретное и использовать алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ).

Библиотека NVidia CUDA Fast Fourier Transform (cuFFT) предоставляет простой интерфейс для вычисления быстрого преобразования Фурье на порядок быстрее, в сравнении с вычислением на ЦПУ. Используя сотни процессорных ядер графических процессоров NVidia, cuFFT обеспечивает высокую производительность вычислений с плавающей точкой на ГП без необходимости разработки собственной реализации БПФ на ГП. Широко используемые в различных приложениях от вычислительной физики до обработки изображений и обработки сигналов, cuFFT является эффективным решением для вычисления БПФ для комплексных или вещественных наборов данных. Библиотека cuFFT использует алгоритмы, базированные на известных

алгоритмах Кули-Тьюки и Блустейна, таким образом вы можете быть уверены, что будут получены точные результаты эффективным методом [5].

Т.к. в используемом методе необходимо применить преобразование Фурье для матрицы комплексных чисел, то будет использовано двумерное преобразование Фурье библиотеки cuFFT, реализация которого представлена на листинге 8.

Листинг 8. Дискретное преобразование Фурье с использованием библиотеки функций cuFFT

```
cufftHandle plan2D;
cufftPlan2d(&plan2D, size, size, CUFFT_C2C);
cufftComplex *device_CUDA_data;
checkCudaErrors(cudaMalloc((void**) &device_CUDA_data, sizeof(cufftComplex) *
size * size));
checkCudaErrors(cudaMemcpy(device_CUDA_data, host_CUDA_data,
sizeof(cufftComplex) * size * size, cudaMemcpyHostToDevice));
cufftExecC2C(plan2D, device_CUDA_data, device_CUDA_data, forward ? CUFFT_FORWARD
: CUFFT_INVERSE);
checkCudaErrors(cudaMemcpy(host_CUDA_data, device_CUDA_data,
sizeof(cufftComplex) * size * size, cudaMemcpyDeviceToHost));
cufftDestroy(plan2D);
checkCudaErrors(cudaFree(device_CUDA_data));
```

ОПТИМИЗАЦИЯ СТАТИСТИЧЕСКИХ ВЫЧИСЛЕНИЙ НА CUDA

Как правило, потоки могут безопасно взаимодействовать между собой, только если они существуют на одном блоке. Существует техническая возможность взаимодействий потоков с разных блоков, но это гораздо сложнее, и использование этой возможности делает код склонным к большому количеству ошибок в программе.

В настоящем разделе рассматривается написание ядер, потоки которых безопасно и эффективно взаимодействуют друг с другом для нахождения среднего значения массива вещественных чисел. На CUDA также легко реализовать вычисление таких статистических значений, как стандартное отклонение, среднее, минимум, максимум и т.д., используя методы, подобные приведенному далее решению.

Рассмотренная ниже методика является официально рекомендованным методом выполнения reduction operations (операций по сокращению) [14]. Т.к. для решения задачи потоки должны разделять память, важно правильно сформировать структуру блоков потоков. Переменные должны разделять 8 байт * 256 потоков / блок = 2 КБ / блок. Т.к. ПМ имеет всего 16 КБ shared (разделяемой) памяти, таким образом приемлемо использование 2 КБ разделяемой памяти. Более того, блоки будут состоять из 256 потоков каждый, что даёт 256 x 1 x 1 конфигурацию.

В коде на листинге 9 есть цикл while, в котором с каждой итерацией число активных потоков сокращается вдвое. Подобное сокращение является

На начальном этапе определяется план выполнения, задаются параметры преобразования. Далее выделяется память на видеокarte для матрицы, затем осуществляется копирование матрицы из оперативной памяти в память видеокарты и выполняется двумерное преобразование Фурье на графической карте. На заключительном этапе данные копируются обратно в оперативную память.

популярное техникой т.к. может быть параллелизовано. Изначально, блок потоков состоит из 256 потоков, первый раз цикл while выполняется, потоки 0..127 будут сравнивать их средние значения с потоками 128..255. Результаты будут сохранены в разделяемой памяти под индексами 0..127. При следующем проходе цикла только потоки 0..63 будут активны и т.д. Необходимо обратить внимание, что несмотря на тот факт, что большая часть потоков будет простаивать в течение выполнения ядра, поиск среднего значения массива на ГП остаётся значительно быстрее, чем аналогичная операция, выполняемая на ЦП [4].

Также необходимо обратить внимание на то, что в ядре вызывается функция __syncthreads(). Эта функция является барьерной для всех потоков в пределах каждого блока. Ни один поток не может продолжить выполнение, пока все потоки не достигнут участка кода вызова данной функции. Может показаться, что это замедлит выполнение из-за того, что часть потоков будет простаивать из-за того, что достигнет точки синхронизации раньше остальных, но совершенно необходимо синхронизировать потоки. Лишь используя __syncthreads() можно гарантировать, что все потоки каждый раз будут в пределах одной итерации цикла while, таким образом обеспечивая корректное чтение значений из разделяемой памяти. Без вызова __syncthreads() возникает состояние гонки.

Т.к. не существует удовлетворительного способа обмена данными между блоками потоков, результирующие значения будут записаны в global (глобальную) память. Эти значения в дальнейшем могут быть скопированы обратно в оперативную память ПК для окончательной обработки.

Листинг 9. Ядро CUDA усреднение значений в массиве

```

__global__ void getAverageKernel(double *array, double *avg_value) {
    __shared__ double avg[THREADS_PER_BLOCK];

    int array_index = BLOCKS_PER_GRID_ROW * THREADS_PER_BLOCK * blockIdx.y + 256
* blockIdx.x + threadIdx.x;
    avg[threadIdx.x] = array[array_index];
    __syncthreads();
    int nTotalThreads = blockDim.x;

    while(nTotalThreads > 1) {
        int halfPoint = (nTotalThreads >> 1);
        if (threadIdx.x < halfPoint) {
            avg[threadIdx.x] += avg[threadIdx.x + halfPoint];
            avg[threadIdx.x] /= 2;
        }
        __syncthreads();

        nTotalThreads = (nTotalThreads >> 1);
    }

    if (threadIdx.x == 0) {
        avg_value[BLOCKS_PER_GRID_ROW * blockIdx.y + blockIdx.x] = avg[0];
    }
}

```

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье описан процесс оптимизации программного обеспечения для цифровой голографии в среде CUDA. Параллелизованная версия алгоритма работает значительно быстрее для средних и больших размеров голограмм (с разрешением от 512 x 512 до 4096 x 4096).

В сравнении с последовательной версией время выполнения операций сократилось от полутора до пятнадцати раз. Время выполнения параллельного алгоритма для голограмм малого разрешения занимает порядка четверти секунды, таким образом делая возможным его применение в системах реального времени. Программа зарегистрирована в фонде алгоритмов и программ Сибирского Отделения РАН [30].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] <http://supercomputingblog.com/cuda/cuda-tutorial-3-thread-communication/>
- [2] <https://msdn.microsoft.com/en-us/magazine/cc337887.aspx>
- [3] Разработка системы неразрушающего контроля на основе методов цифровой голографической интерферометрии
- [4] <http://docs.nvidia.com/cuda/cuda-c-programming-guide/>
- [5] <https://developer.nvidia.com/cuFFT>
- [6] <http://stackoverflow.com/questions/3606636/cuda-model-what-is-warp-size>
- [7] <http://stackoverflow.com/questions/16986770/cuda-cores-vs-thread-count>
- [8] <http://stackoverflow.com/questions/10934240/blocks-threads-warp-size>
- [9] <http://cuda-programming.blogspot.ru/2013/01/what-is-constant-memory-in-cuda.html>
- [10] http://developer.download.nvidia.com/compute/cuda/CUDA_Occupancy_calculator.xls
- [11] Рефакторинг. Улучшение существующего кода
- [12] Optimizing software in C++ An optimization guide for Windows, Linux and Mac platforms http://www.agner.org/optimize/optimizing_cpp.pdf
- [13] <http://web.archive.org/web/20080729033434/http://www.abarnett.demon.co.uk/tutorial.html>
- [14] https://www.sharcnet.ca/help/index.php/CUDA_tips_and_tricks
- [15] <http://stackoverflow.com/questions/16119923/using-constants-with-cuda>
- [16] Kreis, T. Suppression of the dc term in digital holography [Text] / T. Kreis, W. Juptner // Optical Engineering. – 1997. – Vol. 36. – P. 2357-2360.
- [17] Madrigal R., Acebal P., Blaya S., Carretero L, Fimia A., Serrano F. GPU-based calculations in digital holography // Holography: Advances and Modern Trends III. – 2013. - Vol. 8776.
- [18] S. Lee, H. C. Wey, D. K. Nam and D. S. Park. GPU implementation of wave field translation method for fast hologram generation // Optics and Photonics for Information Processing VIII. – 2014. - Vol. 9216.
- [19] Koki Murano1, Tomoyoshi Shimobaba1., Atsushi Sugiyama1, Naoki Takada1, Takashi Kakue1, Minoru Oikawa1, Tomoyoshi Ito. Fast computation of computer-generated hologram using Xeon Phi coprocessor // Computer Physics Communications. – 2014.
- [20] N. Múnera Ortiz, C. A. Trujillo and J. García-Sucerquia. Digital holographic interferometry accelerated with GPU: application in mechanical micro-deformation measurement operating at video rate // 8th Iberoamerican Optics Meeting and 11th Latin American Meeting on Optics, Lasers, and Applications. – 2013. - Vol. 8785
- [21] Yasuyuki Ichihashi, Ryutaro Oi, Takanori Senoh, Hisayuki Sasaki, Koki Wakunami, and Kenji Yamamoto. A real-time 3D system using electronic holography // SPIE. – 2014.

- [22] Mert Dogar, Hazar A. Ilhan, and Meric Ozcan. Real-time reconstruction of digital holograms with GPU // Practical Holography XXVII. – 2013. - Vol. 8644
- [23] Koki Muranoa, Tomoyoshi Shimobabaa, Atsushi Sugiyamaa, Naoki Takadab, Takashi Kakuea, Minoru Oikawaa, Tomoyoshi Itoa. Fast computation of computer-generated hologram using Xeon Phi coprocessor // Preprint submitted to Computer Physics Communications. – 2013.
- [24] P.В. Усков. О некоторых особенностях применения технологии CUDA для моделирования переноса излучения // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Естественные науки”. 2011. № 3
- [25] Гужов В.И. Использование голографической и спекл-интерферометрии при контроле промышленных изделий// Пятая международная научно-техническая конференция "Оптические методы исследования потоков". - Москва: МЭИ.- 1999.- С.107-108.
- [26] Цифровая голографическая система реального времени. / Гужов В.И., Ильиных С.П., Хайдуков Д.С., Кабак Е.С. // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета, Новосибирск , – 2014.-№4(78) – С. 97 – 112.
- [27] Алгоритм расшифровки интерференционных картин со случайным фазовым сдвигом. / Гужов В.И., Ильиных С.П., Хайдуков Д.С. // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета, Новосибирск , – 2014.-№4(78) – С. 79 – 96.
- [28] Гужов В.И., Подъяков А.Е., Солодкин Ю.Н., Штейнгольц З.И. Восстановление фазы волнового фронта на основе одномерного преобразования Фурье// Автометрия.- 1992.- №6.- С.21-24.
- [29] Цифровая голографическая интерферометрия реального времени для экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния динамических объектов. / Гужов В.И., Ильиных С.П., Кузнецов Р.А., Кабак Е.С. // Омский научный вестник, Омск , – 2015.-№1(137) – С. 158 – 162.

- [30] <http://fap.sbras.ru/node/4141>.



Владимир Гужов профессор Новосибирского Государственного Технического университета, доктор технических наук. Он является автором 170 научных работ, в том числе является обладателем 4 патентов. Область научных интересов: программные системы, высокоточные измерения.



Сергей Ильиных - доцент Новосибирского Государственного Технического университета, кандидат технических наук. Он является автором более 100 научных трудов, в том числе 1 учебник НГТУ и 4 патента. Область научных интересов: разработка алгоритмов анализа изображений в оптических измерительных системах.



Рыжов Павел Сергеевич – магистрант Новосибирского Государственного Технического университета.

Implementation of Software for Digital Holography in Software CUDA

V.I. Guzhov, S.P. Ilyinikh, P.S. Ryzhov

**III. Инновационные технологии.
Перспективные технологии.
Моделирование систем.
Численная оптимизация.**

Содержание раздела:

- И.Е. Ландовская, В.Д. Фроловский, В.В. Ландовский. Методы ускорения процесса сборки изделий из тканых материалов. ФГБОУ ВО НГТУ (Новосибирск, Россия). Автоматика и программная инженерия. 2015. № 3 (13). С. 43–48.

Методы ускорения процесса сборки изделий из тканых материалов

И.Е. Ландовская, В.Д. Фроловский, В.В. Ландовский
ФГБОУ ВПО НГТУ (Новосибирск, Россия)

Аннотация: Статья посвящена применению методов параллельной обработки данных в задаче моделирования процесса сборки изделий из тканых материалов на поверхности твердотельного многогранного объекта с целью ускорения процесса моделирования. Представлены алгоритмы для распараллеливания вычислений, как на центральном процессоре, так и на графическом процессоре видеоадаптера.

Ключевые слова: методы параллельной обработки данных, моделирование тканых материалов, метод частиц, схема с перешагиванием.

ВВЕДЕНИЕ

Моделирование трехмерных поверхностей и изучение их поведения используется не только в науке, медицине, телевидении и дизайне, а также и при моделировании ткани. Мощности современных компьютеров и программные средства для них позволяют человеку создавать и моделировать практически любые интересные его процессы.

Задача моделирования поведения тканых материалов является одной из наиболее увлекательных и сложных задач компьютерной графики. Ответы на вопросы о том, как будет выглядеть ткань с определенными свойствами на определенном объекте, как с изменением свойств ткани изменяется ее драпировка, и другие вопросы в наглядной форме должно давать компьютерное моделирование ткани. Важным в этой задаче является не только достижение наибольшей визуальной реалистичности, но, возможно в большей степени, обеспечение соответствия модели физическим характеристикам ткани, соответствия моделируемых деформаций реальным.

Успешно развивающимся на сегодняшний день подходом является моделирование ткани с использованием метода частиц [1]. Модели частиц применяются для моделирования самых разных явлений таких, как водопады, взрывы, вихревые поля и т. д. Термин «модели частиц» является общим для класса вычислительных моделей, в которых дискретное описание физических явлений включает использование взаимодействующих частиц. Каждая частица имеет набор атрибутов, таких как масса, положение, скорость. Состояние физической системы определяется атрибутами конечного ансамбля частиц, а эволюция системы

определяется законами взаимодействия этих частиц.

Очевидно, чем большим количеством частиц представлена модель, тем точнее будут переданы ее деформационные свойства. В то же время, при увеличении количества частиц в модели, происходит увеличение времени моделирования, которое возрастает пропорционально увеличению количества частиц, которыми представлена сетка тканого материала. Сокращение времени расчетов можно добиться, воспользовавшись методами параллельной обработки данных, которые могут повысить скорость получения результатов за счет использования вычислительных ресурсов нескольких ядер или процессоров одновременно.

1. ДИСКРЕТНАЯ МОДЕЛЬ ТКАНОГО МАТЕРИАЛА

В полотне тканого материала, тонкие волокна скручены в нити, а эти нити более или менее жестко сплетены во взаимосвязанную сеть. Компоненты сети удерживаются вместе трением, а поведение ткани зависит от типа волокна (хлопчатобумажное, шелк, шерсть и т. д.), веса волокна, плотности сплетения, типа сплетения и т. д. Порядок расположения нитей относительно друг друга остается неизменным даже при существенных деформациях, а сама деформация ткани представляет собой только изменение формы и размеров ячеек [2]. Отсюда следует предположение рассматривать ткань как систему частиц, которые размещены в точках пересечения продольных и поперечных нитей, как представлено на *Рис. 1*.

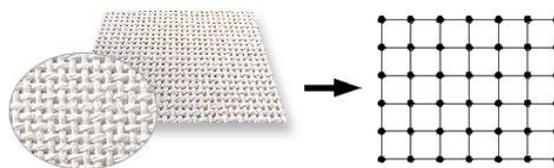


Рис. 1. Дискретная модель ткани

Основные взаимодействия, которые происходят на уровне нити, это: растяжение-сжатие; изгиб и сдвиг [3]. Учитывая, что ткань достаточно легкая и масса ткани в удаленных узлах оказывает пренебрежимо малое влияние на каждую рассматриваемую частицу, предположим, что на каждую внутреннюю частицу влияют 12 соседних частиц. На *Рис. 2* взаимодействия растяжения-сжатия, сдвига и изгиба обозначены связями 1, 2 и 3 соответственно.

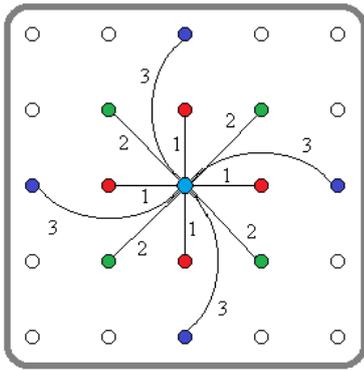


Рис. 2. Взаимодействия между частицами ткани

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТКАНИ

Движение системы можно описать перемещениями в трехмерном пространстве:

$$r_{ij}(t) = \{x_{ij}(t), y_{ij}(t), z_{ij}(t)\},$$

где $x_{ij}(t), y_{ij}(t), z_{ij}(t)$ – координаты частицы в трехмерном пространстве, t – время.

На каждом временном слое ищут положения узлов в пространстве. При этом каждая из частиц обладает некоторой массой, находится в гравитационном поле, взаимодействует с окружающей средой и соседними частицами [4]. Тогда уравнение движения частицы P_{ij} имеет следующий вид:

$$m_{ij}r_{ij}'' = m_{ij}g - m_{ij}c_{ij}r_{ij}' + \sum_{kl \in R_{ijkl}} F_{im}(r_{ij}, r_{kl}),$$

где m_{ij} – масса частицы; c_{ij} – константа демпфирования; составляющая $-m_{ij}c_{ij}r_{ij}'$ – представляет собой потери энергии, связанные с взаимодействием частицы с окружающей средой; g – ускорение свободного падения. Последняя составляющая уравнения движения, представляет собой результирующую силу взаимодействий между частицами; R_{ijkl} – множество индексов узлов связанных с узлом P_{ij} .

Для решения системы следует воспользоваться схемой с перешагиванием (leapfrog scheme) [1]. Это обусловлено тем, что для воспроизведения на компьютере реального поведения материала, число частиц в моделируемом полотне должно быть велико, и, к тому же, каждое дополнительное вычисление силы требует больших временных затрат.

Схема с перешагиванием является методом второго порядка точности, и, в сравнении с классическим явным методом Эйлера, обладает большей устойчивостью, что позволяет на порядок увеличить шаг интегрирования:

$$\begin{aligned} V_{n+1} &= V_n + hM^{-1}F(r_n, V_n), \\ r_{n+1} &= r_n + hV_{n+1} \end{aligned}$$

где r_n и V_n – векторы положений и скоростей частиц на n -ом шаге интегрирования, h – шаг интегрирования, $F(r, V)$ – вектор-функция, описывающая действие внутренних и внешних

сил на ткань, M – матрица инерции – диагональная матрица, описывающая распределение масс частиц ткани.

3. АЛГОРИТМ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ НА ЦЕНТРАЛЬНОМ ПРОЦЕССОРЕ

При моделировании твердотельный многогранный объект, на поверхности которого происходит сборка, является неподвижным, а изменение координат происходит только у частиц ткани за счет действия на них различных сил, имитирующих воздействие окружающей среды, таких как стягивающая сила, сила тяжести, сопротивление воздуха, сила трения об объект и прочие.

Как было описано ранее, ткань рассматривается как система частиц, которые размещены в точках пересечения продольных и поперечных нитей. Следовательно, в программе систему частиц, соответствующую детали, удобнее всего представить в виде двумерного динамического массива. Число строк массива соответствует максимальному количеству частиц по длине детали, а число столбцов – максимальному количеству частиц детали по ее ширине. Если элементу массива не соответствует частица детали, то он имеет значение *NULL*. При этом определить взаимодействующие частицы можно исходя из позиции элемента в массиве. Схематично двумерный массив для хранения данных о частицах детали представлен на Рис. 3.

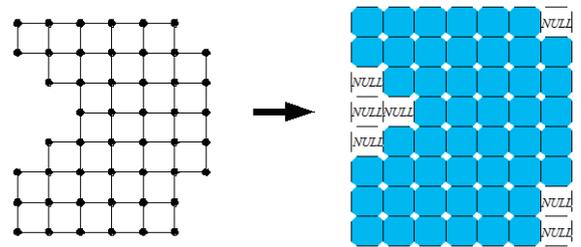


Рис. 3. Структура для хранения данных о частицах детали

На сегодняшний день наиболее целесообразным решением является разработка алгоритма параллельной обработки данных для осуществления расчетов на центральном процессоре, который подходит как для систем с общей памятью, так и систем с распределенной.

Как описано выше, в процессе моделирования для решения уравнений движения частиц ткани применяется явный метод, а именно схема с перешагиванием. Следовательно, на каждом шаге интегрирования вначале вычисляется новое значение скорости, которое затем используется для вычисления значений координат на этом шаге. Этой особенностью можно воспользоваться, при создании алгоритма параллельной обработки данных для систем, как с общей, так и с распределенной памятью.

В то же время, как сказано в разделе 1, для

вычисления скорости частицы на n -ом шаге интегрирования, нужно учитывать значения координат ее соседних частиц с $(n-1)$ -ого шага интегрирования. То есть, в алгоритме параллельной обработки данных для систем с распределенной памятью, нужно предусмотреть этап своевременного обмена данными между процессами.

При работе в системах с распределенной памятью передача данных между процессами всего массива координат частиц деталей, число которых составляет несколько тысяч, занимает больший процент от общего времени, чем сами вычисления и, следовательно, аннулирует все преимущества параллелизма.

Для уменьшения потерь времени на передачу данных между процессами с учетом особенностей задачи моделирования разработан усовершенствованный алгоритм, который позволяет обмениваться процессам только четырьмя строками массива, что значительно повышает его эффективность. Этот алгоритм учитывает, что для вычисления значений координат точки ткани используются значения координат только двенадцати ее соседних частиц.

При моделировании двумерный массив, в котором хранятся данные о частицах детали, разделяется на количество частей, равное количеству запущенных процессов в программе, как представлено на *Рис. 4* [5].

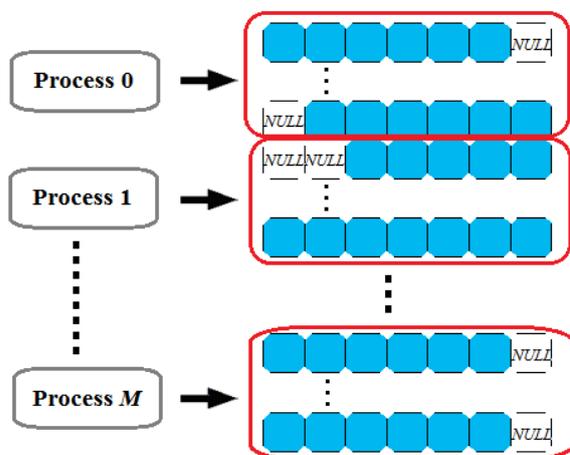


Рис. 4. Разделение данных между процессами

Каждый процесс обрабатывает только свою часть массива, а затем происходит обмен данными, при котором процессы обмениваются между собой значениями координат двух крайних строк своей части массива, *Рис. 5*.

Кроме того, в памяти каждого процесса создается отдельная копия данных массива частиц многогранного объекта, так что при моделировании процесс обрабатывает пересечения только своей части массива частиц детали с гранями объекта, что позволяет избежать лишнего обмена данными между процессами и приводит к резкому сокращению времени вычислений.

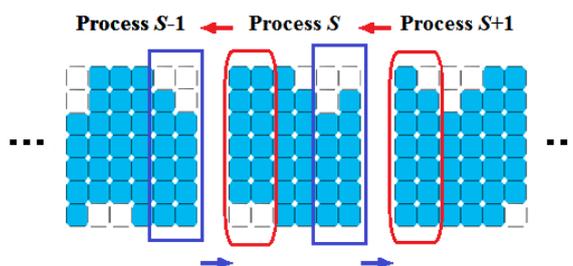


Рис. 5. Обмен данными между процессами

Параллелизм программы достигается как на уровне потоков, за счет применения библиотеки *OpenMP*, так и на уровне процессов – для этого применяется библиотека *MPICH2*. В каждом процессе порождается заданное количество потоков, что полностью соответствует *SPMD*-модели, представленной на *Рис. 6*. Данный алгоритм может быть использован в системах как с общей, так с распределенной памятью, что делает его более универсальным.

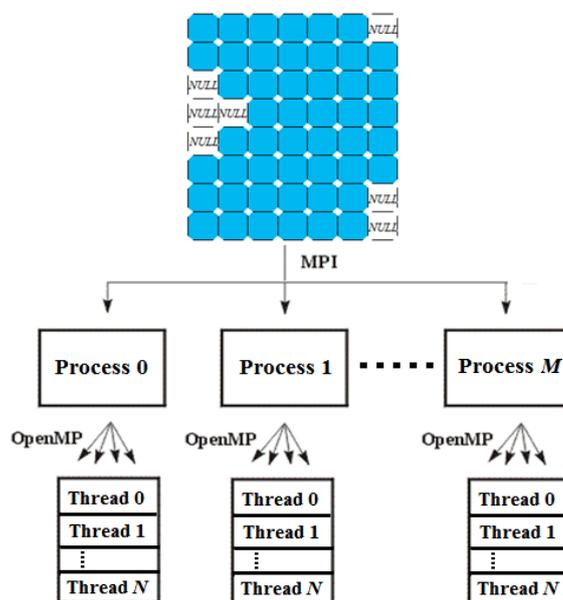


Рис. 6. SPMD-модель работы программы

Представленный алгоритм протестирован в восьмиядерной многопроцессорной среде, на кафедре вычислительной техники Новосибирского государственного технического университета с использованием вычислительного кластера с процессорами *Intel Xeon E5310 Clovertown* с частотой 1600 МГц и общей памятью 32 Гб . Тестирование проводилось с использованием различных контуров деталей и различных типов объектов. Результаты эксперимента по вычислению зависимости времени выполнения 10000 итераций моделирования движения ткани из 987 частиц при взаимодействии с объектом из 300 граней от количества запущенных процессов и потоков представлены в *Таблице 1*.

Зависимость времени моделирования от количества запущенных процессов и потоков

Количество процессов	1	1	1	1	2	2	4	4	8
Количество потоков	1	2	4	8	1	4	1	2	1
Время моделирования, с	71,8	42,5	25,7	16,1	43,4	16,9	28,0	18,2	20,8

В качестве критерия оптимальности выступает время получения результатов моделирования. Этот критерий выбран, так как он является одним из основных для данной задачи.

Из Таблицы 1 видно, что наименьшее время моделирования параллельный алгоритм показывает при работе в системах с общей памятью, так как отсутствует расход времени на обмен данными между процессами. Следовательно, для достижения максимальной эффективности от применения параллельного алгоритма необходимо, по-возможности, создавать максимальное количество потоков, а количество процессов сводить к минимуму.

4. АЛГОРИТМ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ НА ГРАФИЧЕСКОМ ПРОЦЕССОРЕ ВИДЕОКАРТЫ

Структура графического процессора такова, что позволяет запускать на выполнение практически одновременно большое количество потоков (нитей). Как отмечено выше, при моделировании поведения ткани движение частиц материала не является абсолютно независимым. В то же время, так как для вычисления скорости частицы на n -ом шаге интегрирования, требуется учитывать значения координат ее соседних частиц с $(n-1)$ -ого шага интегрирования, такая задача подходит для распараллеливания данных на графическом процессоре. Для повышения производительности следует представить данные, передаваемые в память графического процессора не массивами структур, а классами, содержащими несколько массивов:

```
class Particles_fabric {
public:
    float *coord_x;
    float *coord_y;
    float *coord_z;
    ...
    float *V_x;
    float *V_y;
    float *V_z;
    ...
    float *F_x;
    float *F_y;
    float *F_z;
};
```

В программе используются двумерные массивы, которые хранятся в памяти в виде одной связанной области. Адрес элемента массива с

индексами i, j равен $i \cdot N_y + j$, где N_y – количество столбцов в массиве. Это означает, что элементы, имеющие близкие индексы по оси y , расположены в соседних ячейках памяти [6]. Таким образом, если различные нити обрабатывают различные ячейки по оси y , они будут запрашивать данные из соседних элементов массивов.

Как и в алгоритме для выполнения на центральном процессоре, между блоками происходит обмен через глобальную память не всеми данными, а только той частью массива, которая содержит информацию о координатах частиц, являющихся соседними для частиц других блоков.

Зависимость времени выполнения 10000 итераций моделирования движения ткани из 4056 частиц от размера блока отражены в Таблице 2.

Тестирование представленного алгоритма проводилось на видеокарте *NVIDIA GeForce GTX 760*. Следует заметить, что при хронометраже не учитывалось время копирования данных между центральным и графическим процессорами, а максимально возможный размер блока для данного графического процессора составляет 32, так как $32 \times 32 = 1024$ – предельное значение для произведения измерений блока.

Таблица 2

Зависимость времени моделирования от размера блока

Размер блока	Время выполнения, с
не блочный	16,51
4×4	91,1
8×8	16,8
16×16	11,2
32×32	10,3

Стоит отметить, что время работы ядерной функции не должно превышать двух секунд из-за механизма *Time-Out Detection and Recovery (TDR)*, используемого в *Microsoft Windows*.

На Рис. 7 приведены графики для сравнения производительности центрального процессора *Intel Core i7-4770K Haswell* (запуск задачи в 8 потоков) и графического процессора видеокарты *NVIDIA GeForce GTX 760* (размер блока 32×32) в задаче моделирования поведения ткани в зависимости от количества частиц модели при вычислении 10000 итераций.

В процессе моделирования учитываются коэффициенты среды, такие как сила тяжести, сопротивление воздуха, сила трения об объект и

прочие, что придает процессу большую реалистичность. Итоговый результат моделирования падения хлопчатобумажной лоскутной ткани на кресло представлен на *Рис. 8*.

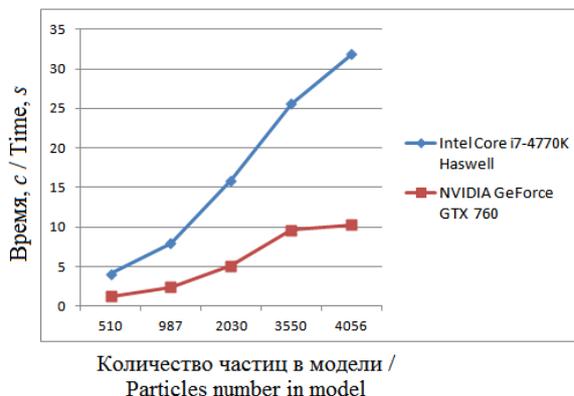


Рис. 7. Графики производительности центрального и графического процессоров в задаче моделирования ткани

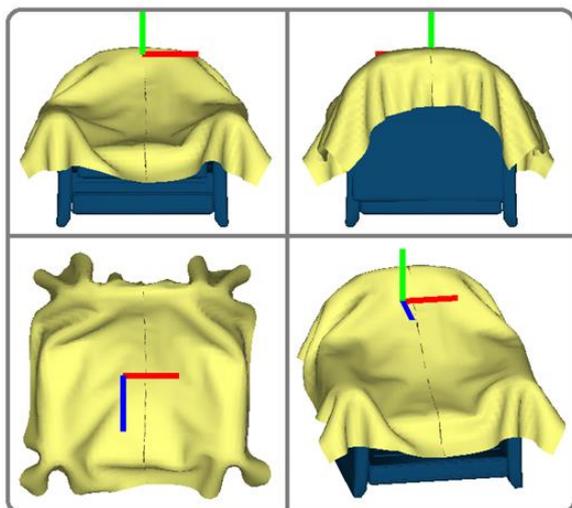


Рис. 8. Результаты моделирования

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье описаны методы параллельной обработки данных с использованием центрального и графического процессоров. Данные алгоритмы были протестированы на примерах разных видов деталей и форм объектов.

Для тестирования был разработан комплекс программных средств на языке C++ в среде *Microsoft Visual Studio 2012*. Для реализации параллельной обработки данных на центральном процессоре используются интерфейсы параллельного программирования *OpenMP* и *MPI*, а для обработки данных с использованием ресурсов графического процессора видеоадаптера применяется технология *CUDA*.

Результаты, представленные в работе, имеют значение для развития информационных технологий в области геометрического моделирования и проектирования. Научной

новизной в статье являются предложенные алгоритмы параллельной обработки данных в процессе моделирования для описанной дискретной модели ткани.

Результаты данной работы могут быть использованы для создания систем автоматизации геометрического моделирования и проектирования, систем виртуальной реальности и компьютерной помощи для специалистов швейной промышленности, а также в работе дизайнеров одежды и мебельного производства.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Hockney W., Eastwood J., Computer Simulation Using Particles. McGraw-Hill, New York, 1981.
- [2] Breen D., House D. A physically based model of woven cloth. The Visual Computer, 8(5-6):264–277, June 1992.
- [3] Kawabata S. The standardisation and analysis of hand evaluation. Technical report. The textile machinery society of Japan, Osaka, July 1980.
- [4] Ландовский В.В., Фроловский В.Д. Исследование методов интегрирования дифференциальных уравнений в задаче моделирования поведения ткани на основе метода частиц. Сибирский журнал вычислительной математики. Том 9, 2006. С. 287–298.
- [5] Хьюз К., Хьюз Т. Параллельное и распределенное программирование на C++: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. – 672 с.
- [6] Сандерс Дж., Кэндрот Э. Технология CUDA в примерах: введение в программирование графических процессоров: Пер. с англ. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 232 с.



Ландовская Ирина Евгеньевна, аспирант кафедры автоматизированных систем управления НГТУ. Область научных интересов: компьютерное моделирование поведения тканых материалов.
E-mail: nairy@rambler.ru



Фроловский Владимир Дмитриевич, профессор кафедры автоматизированных систем управления НГТУ, профессор, доктор технических наук. Область научных интересов: моделирование и автоматизация процессов геометрического проектирования.
E-mail: frolovskij@corp.nstu.ru



Ландовский Владимир Владимирович, доцент кафедры автоматизированных систем управления НГТУ, кандидат технических наук. Область научных интересов: моделирование процессов сборки трехмерных изделий из плоских заготовок.
E-mail: landovskij@corp.nstu.ru

Accelerating methods of the fabric products assembly

I.E. LANDOVSKAYA, V.D. FROLOVSKY,
V.V. LANDOVSKY

Abstract: Using of the parallel processing methods during the simulation of the fabric material products on the solid plane–bounded object’s surface to accelerate the simulation process is considered in the paper. The algorithms for paralleling the calculations on the central processing unit and on the graphics processor of the video display adapter are presented.

Keywords: the parallel processing methods, simulation of the fabric materials, particle method, leapfrog scheme.

REFERENCES

- [1] Hockney W., Eastwood J., Computer Simulation Using Particles. McGraw-Hill, New York, 1981.
- [2] Breen D., House D. A physically based model of woven cloth. The Visual Computer, 8(5-6):264–277, June 1992.
- [3] Kawabata S. The standardisation and analysis of hand evaluation. Technical report, The textile machinery society of Japan, Osaka, July 1980.
- [4] Landovsky V.V., Frolovsky V.D. Issledovanie metodov integrirovaniya differencial'nyh uravnenij v zadache modelirovaniya povedeniya tkani na osnove metoda chastic [Investigation of the techniques of the difference equation integration in the problem of the simulation of the fabric materials behavior by particle method]. Sibirskij zhurnal vychislitel'noj matematiki. - Siberian Journal of Numerical Mathematics. 2006. vol. 9. pp. 287-298.
- [5] Hughes C., Hughes T. Parallel'noe i raspredelennoe programmirovaniye na C++: Per. s angl. [Parallel and distributed programming using C++] – M.: Izdatel'skij dom «Vilyams», 2004. – 672 p.
- [6] Sanders J., Kandrot E. Tekhnologiya CUDA v primerakh: vvedenie v programmirovaniye graficheskikh protsessorov: Per. s angl. [CUDA by example. An introduction to general-purpose GPU programming] – M.: DMK Press, 2011. – 232 p.

IV. Измерительные средства и системы. Идентификация

Содержание раздела:

- Б.И. Пякилля, В.А. Жмудь. Корректная идентификация объекта с запаздыванием для управления им. ФГБОУ ВО НИ ТПУ (Томск, Россия), ФГБОУ ВО НГТУ (Новосибирск, Россия). Автоматика и программная инженерия. 2015. № 3 (13). С. 51–57.
- В.Г. Трубин, М.В. Трубин. Модуль воспроизведения звуковых сигналов JQ6500-16P. ФГБОУ ВО НГТУ (Новосибирск, Россия). Автоматика и программная инженерия. 2015. № 3 (13). С. 58–63.

Корректная идентификация объекта с запаздыванием для управления им

Б.И. Пякилля, В.А. Жмудь

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия,
Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

Аннотация: Актуальность управления объектами с запаздыванием несомненна, об этом свидетельствует нарастающий поток публикаций, в частности, [1]. Вместе с тем, зачастую теоретические результаты расчета крайне далеки от практических результатов использования полученных регуляторов для управления такими объектами. Можно предположить, что наиболее распространенной причиной этого является упрощение модели при идентификации. В данной статье на примере объекта из [1] решается вопрос о достаточности модели и допустимости ее упрощения применительно к задаче управления в контуре с отрицательной обратной связью. Поставленная задача решается путем математического моделирования в программе VisSim.

Ключевые слова: регулирование, запаздывание, идентификация объекта, настройка регулятора, моделирование, симуляция, корректность моделирования

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность задач управления объектом с запаздыванием достаточно известна, и в частности, раскрыта во введении статьи [1]. Запаздывание в значительной мере ограничивает возможности обеспечения быстродействия в контуре управления. Поэтому традиционно исследователи предполагали, что правильное определение значения запаздывания и коэффициента усиления объекта в значительной мере обеспечивает правильность модели в целом. Помимо запаздывания динамические свойства объекта могут быть описаны минимально-фазовой моделью, которая наряду с запаздыванием входит в полную модель. Простейшим примером такой модели является фильтр первого порядка. Некоторые авторы ограничивают модель именно таким фильтром. Поэтому обобщенная модель такого объекта может быть представлена передаточной функцией следующего вида [1]:

$$W(s) = \frac{k}{Ts + 1} \cdot e^{-\tau s}, \quad (1)$$

где k – коэффициент передачи;
 τ – время запаздывания;
 T – постоянная времени.

В данной статье ставится задача исследования, насколько такое ограничение оправдано. Актуальность этого исследования основана на

том, что именно такое обобщение (1) лежит в основе многих методов настройки регуляторов, которые используются до сих пор достаточно часто, несмотря на их малую пригодность.

Малую пригодность методом мы усматриваем, например, в таком предлагаемом алгоритме проектирования регуляторов: «Настройка контура регулирования состоит из трёх важных этапов: а) идентификация объекта, б) расчет параметров регулятора и в) подстройка регулятора. Третий этап обычно связан с ручной подстройкой параметров регулятора для улучшения качества регулирования» [1]. Как видим, авторы после теоретической настройки регулятора готовы осуществить его ручную корректировку. Это столь же странно, как если бы после того, как строитель, используя уровень, начертил вертикальную линию, после этого бы «подправил» ее положение, пользуясь своим органолептическим восприятием, то есть «на глазок». Если имеет место ручная настройка, то расчет не эффективен, и обратно: если расчет эффективен, то ручная настройка не требуется.

Мы бы считали, что целесообразно использовать один из следующих методов проектирования регулятора:

Аналитический метод

- а) идентификация объекта;
- б) расчет регулятора;
- в) реализация регулятора (без подстройки).

Эмпирический метод

- а) реализация регулятора;
- б) настройка регулятора эмпирическим путем.

Комплексный метод

- а) идентификация объекта;
- б) расчет регулятора;
- в) реализация регулятора (без подстройки);
- г) уточненная идентификация объекта;
- д) уточнение расчета регулятора;
- е) реализация уточненного регулятора.

Предложенный метод, на наш взгляд, не хорош не тем, что не укладывается ни в одну из предложенных схем, а тем, что в нем расчет не имеет никакого значения, а, следовательно, и идентификация не имеет никакого значения, поэтому он, по сути, является эмпирическим методом. Наше исследование посвящено анализу влияния неучтенных особенностей реального

объекта, не входящих в модель (1).

1. АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ИДЕНТИФИКАЦИИ ОБЪЕКТА

В работе [1] предложено по традиции определять передаточные функции объектов на основании кривой разгона, вид которой для выбранного объекта показан на *Рис. 1*. При этом априорно предполагается, что модель объекта «представляются в виде последовательного соединения аperiodического и запаздывающего звеньев».

Характеристика разгона – это отклик на единичное ступенчатое воздействие на входе объекта. Минимально-фазовая компонента модели дает переходный процесс в виде экспоненциальной функции. Асимптота этой функции, как и асимптота кривой разгона, стремится к значению, которое равно коэффициенту усиления (передачи) объекта. На

Рис. 1 асимптота, по-видимому, стремится к значению, показанному как максимальное значение шкалы, то есть примерно 31 единицы. Из этого следует, что входное воздействие было не равным единице, а равно этой величине, либо авторы забыли учесть коэффициент усиления. Поскольку далее в этой статье коэффициент усиления объекта везде принят равным единице, целесообразно принять первую версию, считая этот коэффициент отнесенным к величине входного скачка.

Авторами по графику *Рис. 1* определены следующие параметры передаточной функции:

$$W(s) = \frac{1}{47s + 1} \cdot e^{-55s}. \quad (2)$$

Также сказано, что из соотношения $\tau/T < 1$ следует предположить определенные трудности настройки регулятора традиционными способами.

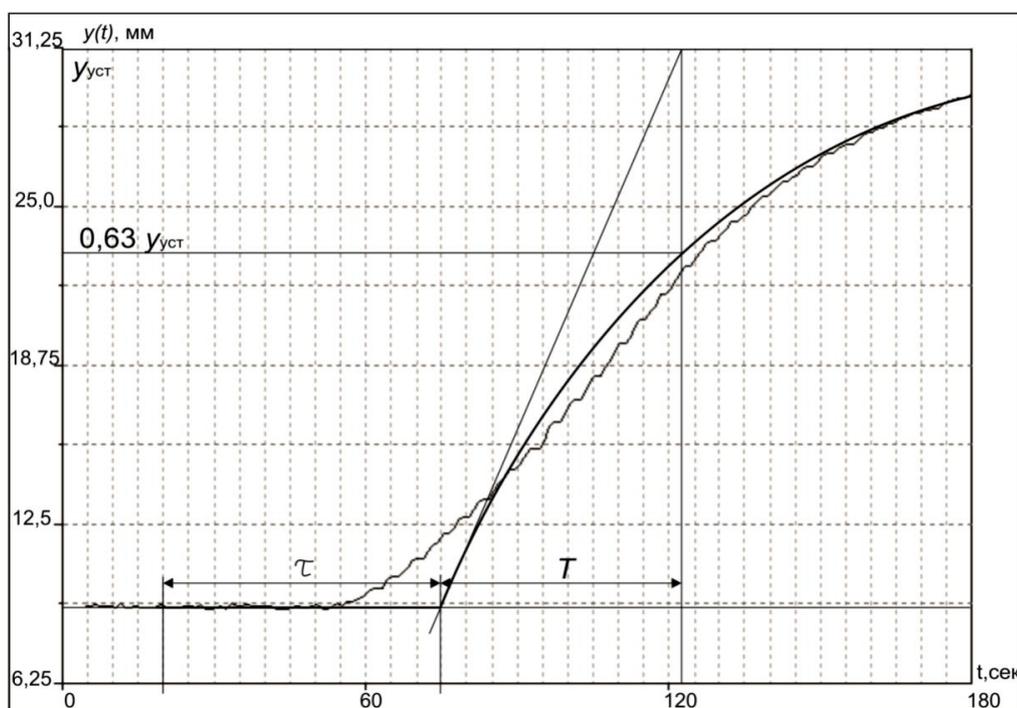


Рис. 1. Характеристика разгона при ступенчатом входном воздействии

Результаты использования регулятора, рассчитанного по модели (2), у авторов отличаются от результатов моделирования, прогнозирующего их.

Попробуем разобраться в причинах такого несовпадения. Обратим внимание на различия двух графиков – теоретического и экспериментального на *Рис. 1*. Эти отличия состоят в следующем:

1. Экспериментальный процесс начинается плавно, без резкой линии излома, теоретический процесс начинается резко с характерной линией излома.

2. Экспериментальный процесс начинается в

момент $t = 55$ с, теоретический процесс начинается в момент $t = 75$ с.

3. Точка первого совпадения экспериментального и теоретического процессов соответствует примерно $t = 85$ с.

4. Далее величина экспериментального процесса меньше, чем значение теоретического процесса, максимальное отклонение составляет примерно половину деления (весь процесс асимптотически стремится к значению, соответствующему семи делениям), это максимальное отклонение соответствует времени $t = 100$ с.

5. В экспериментальном процессе видно возбуждение с относительно высокой частотой.

6. Амплитуда колебаний, порождаемых возбуждением, растет с ростом производной выходного сигнала; при малой скорости изменения этого сигнала величина их снижается.

7. При достижении времени $t = 180$ с оба процесса сливаются, однако, из этого отнюдь не следует, что и далее они совпадают, хотя это и не исключено.

Причиной несовпадения общего хода процесса, очевидно, состоит в недостаточно высоком порядке модели.

Для начала попытаемся использовать модель второго порядка, например, в виде двух последо-

вательно включенных фильтров первого порядка. При этом за счет уменьшения времени чистого запаздывания и за счет подбора значения новых постоянных времени можно обеспечить требуемый ход процесса. *Рис. 2* показывает схему моделирования такого процесса, а также сам получаемый процесс в сравнении процессом на выходе модели по соотношению (2). Также в создаваемую модель введен контур с обратной связью на границе устойчивости для того, чтобы обеспечить имитацию небольшого возбуждения в виде колебаний, которые видны на *Рис. 1*.

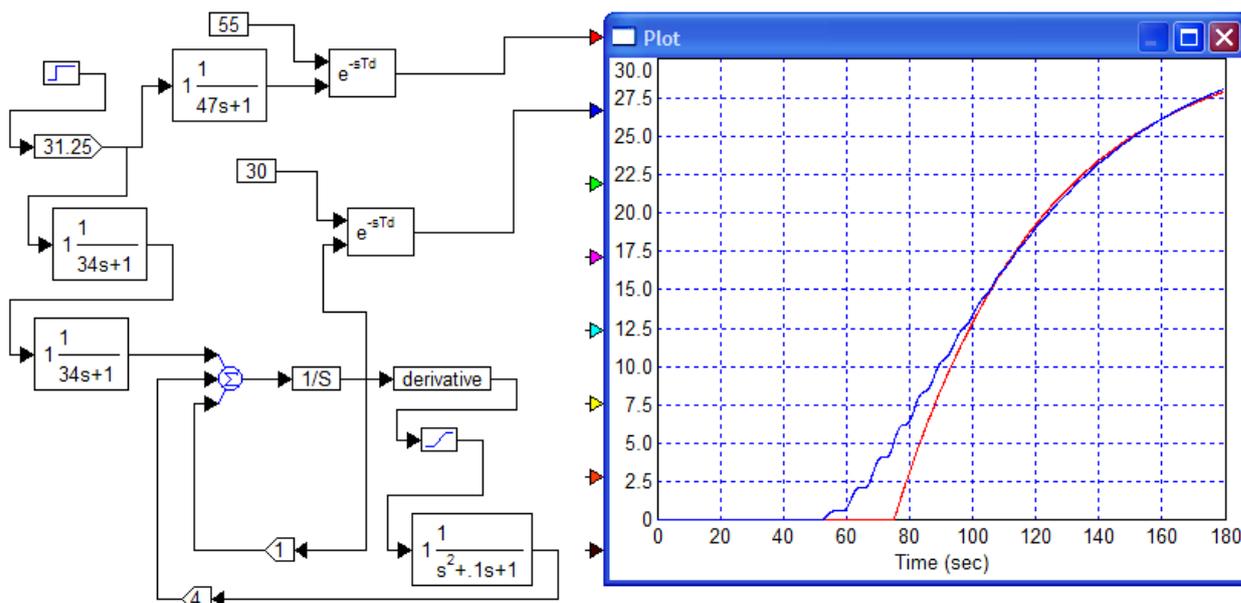


Рис. 2. Схема моделирования объекта и результаты в сопоставлении с моделью по соотношению (2): процесс по модели (2) – красная линия, процесс по модели в первой итерации – синяя линия

Анализ графика на *Рис. 2* показывает, что, хотя он и больше похож на экспериментальный процесс, показанный на *Рис. 1*, он все же недостаточно ему соответствует. А именно: не выполняются признаки 3, 4 и 6.

Для обеспечения условия 6 сделаем колебания зависимыми не от величины сигнала, а от ее производной, для чего используем фильтр, оценивающий производную, на его выходе поставим элемент типа «зона нечувствительности» с шириной зоны, равной единице, сигналы возбуждения введем в основной тракт через сумматор. Весовой коэффициент, равный пяти, $K_w = 5$, подобран экспериментально с запасом, в соответствии с развитием идеи, сформулированной в [3], согласно которой лучше использовать ухудшенную модель при расчете регулятора, чем улучшенную. Поэтому в случае сомнения выбираем худший вариант, реально достаточно было бы использовать коэффициент равный двум, $K_w = 2$. Для обеспечения признаков 3 и 4 используем модель в виде трех фильтров первого порядка, то есть повысим порядок объекта со второго до третьего.

На *Рис. 3* показана соответствующая модель

объекта со всеми изменениями, значения новой постоянной времени и нового запаздывания подобраны экспериментально для лучшего совпадения графика с экспериментальным процессом.

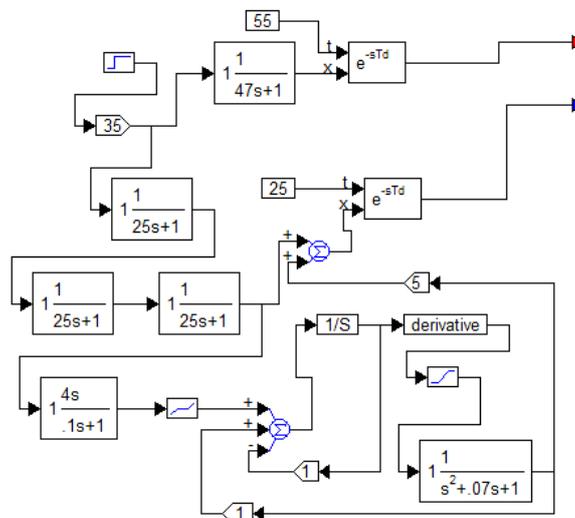


Рис. 3. Схема для моделирования второй итерации модели (синий выход), а также модели по соотношению (2) (красный выход)

На *Рис. 4* показан полученный переходный процесс в новой модели (синяя линия) в сравнении с процессом от модели (2) (красная линия).

Видно, что теперь совпадение двух графиков, показанных на *Рис. 4*, с двумя графиками, показанными на *Рис. 1*, достаточно хорошее. При этом красный график на *Рис. 4* совпадает с соответствующим графиком на *Рис. 1* вследствие идентичности их моделей и входных сигналов,

поэтому этот график можно использовать как опорный для анализа второго графика, синего. Отличия синего графика на *Рис. 4* от красного графика на этом же рисунке достаточно близки к отличиям экспериментального процесса на *Рис. 1* от теоретического графика на этом же рисунке. Поэтому можно сделать вывод, что модель, показанная на *Рис. 3*, и использованная для получения синего графика на *Рис. 4*, намного больше соответствует экспериментальной установке, чем модель по соотношению (2).

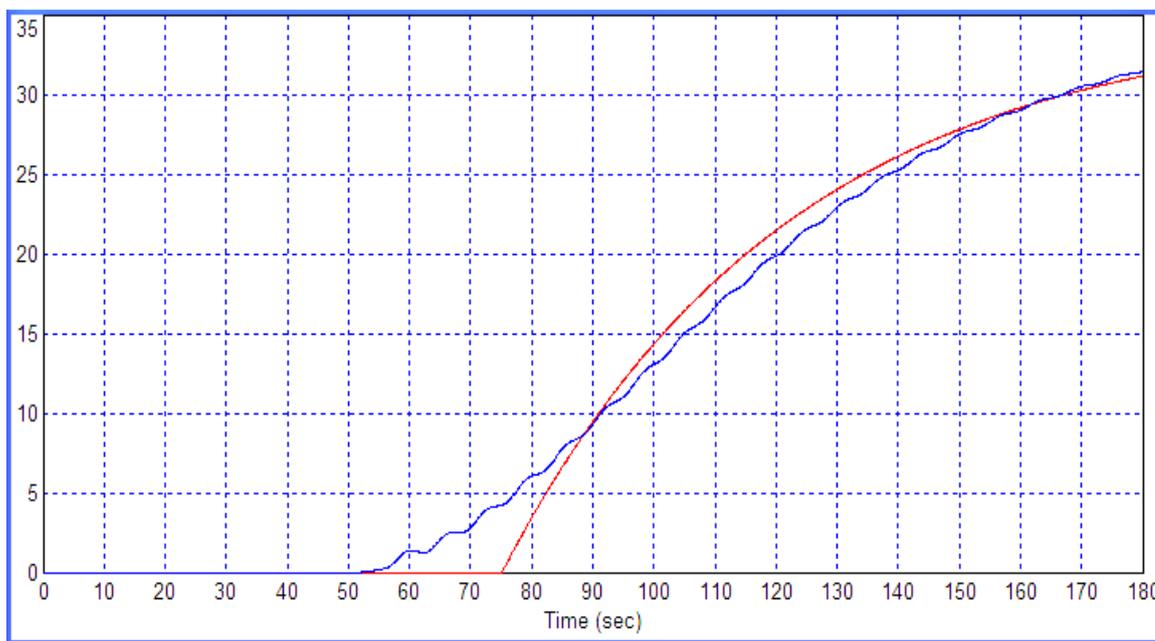


Рис. 4. Переходные процессы, полученные при моделировании второй итерации модели (синий выход), а также модели по соотношению (2) (красный выход)

2. РАСЧЕТ ПИД-РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ НАЙДЕННОЙ МОДЕЛИ ОБЪЕКТА

В статье [1] приведены экспериментальные переходные процессы, однако, на этих процессах не указаны отсчеты по оси времени, поэтому использовать их не представляется возможным.

Для расчета робастного регулятора используем методику, предложенную и разработанную в [2], основанную на численной оптимизации. С этой целью используем структуру, показанную на *Рис. 5*. При этом состав блоков *PI-Regulator*, *Optimizer* и *Cost Estimator* показан на *Рис. 6, 7* и *8* (отметим, что блок *PI-Regulator* по структуре соответствует ПИД-регулятору). Переходный процесс в системе показан на *Рис. 9*. Назначение стандартных блоков *parameterUnknown* можно уяснить из любого пособия по использованию программы *VisSim*, например, [1]. Эти блоки осуществляют поиск оптимальных значений своих выходных значений, которые сообщают минимальное значение стоимостной функции, которая поступает на блок *Cost*. Эти блоки работают совместно в режиме оптимизации, причем, блоков *parameterUnknown* может быть несколько, а блок

Cost может быть только один. Блок *derivative*, как и в структуре на *Рис. 1*, вычисляет производную по времени от входного сигнала.

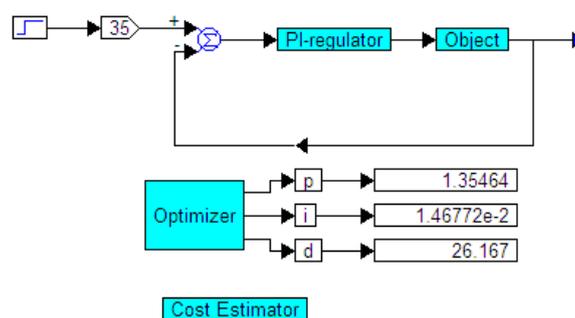


Рис. 5. Структура системы для оптимизации регулятора

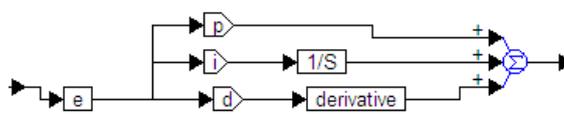


Рис. 6. Структура регулятора *PI-Regulator* в системе по *Рис. 5*

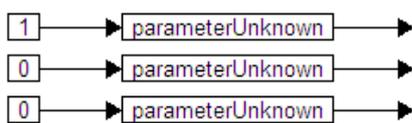


Рис. 7. Структура оптимизатора *Optimizer* в системе по Рис. 5

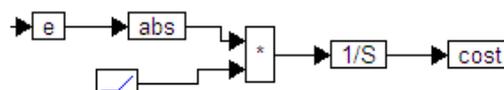


Рис. 8. Структура блока оценки стоимостной функции *Cost Estimator* в системе по Рис. 5

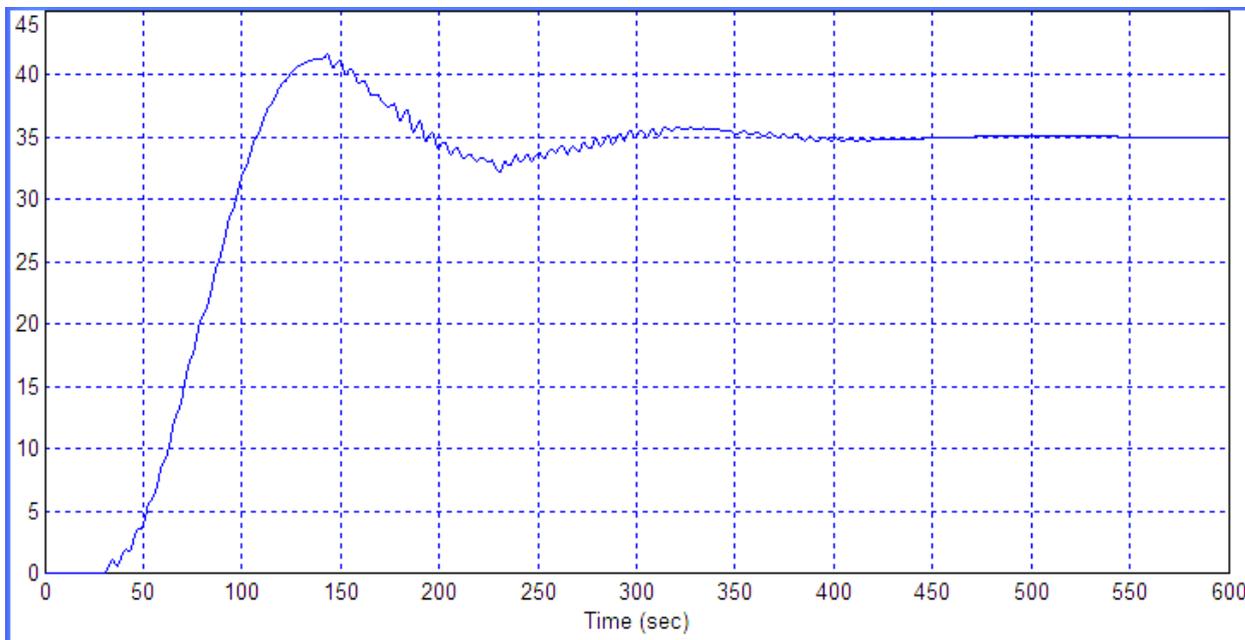


Рис. 9. Переходный процесс в системе по Рис. 5

3. РАСЧЕТ РОБАСТНОГО ПИД-РЕГУЛЯТОРА

В патенте [3] даны рекомендации по расчету робастного регулятора. Суть их сводится к тому, что следует намеренно увеличить запаздывание в модели для расчета регулятора. Тогда реальный объект будет устойчивым с полученным для такой модели регулятором. Поскольку авторами работы [1] было определено запаздывание на уровне 55 с, возьмем эту величину с запасом, а именно: используем 60 с.

Получим следующие настройки регулятора в результате процедуры оптимизации: $K_P = 0,85$; $K_I = 0,009$; $K_D = 37,6$. На Рис. 10 показан переходный процесс с заведомо ухудшенной моделью объекта, поскольку в ней коэффициент вклада контура возбуждения взят равным пяти, $K_w = 5$, а запаздывание взято равным $\tau = 60$ с.

Видно, что переходный процесс в целом устойчив, установившаяся ошибка в среднем равна нулю за счет действия интегрирующего контура, но в процессе присутствуют всплески высоких частот вследствие пребывания системы на границе устойчивости. На Рис. 11 показан тот же процесс в случае, когда коэффициент вклада $K_w = 2$. Всплески генерации снизились до пренебрежимо малой величины. Напомним, что в статье [1] склонность объекта к возбуждению не обсуждалась и в модели не учтена.

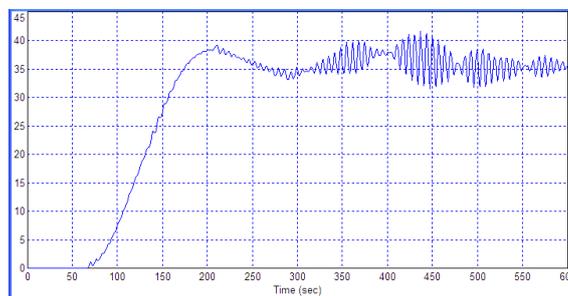


Рис. 10. Переходный процесс в системе при оптимизации ПИД-регулятора с значениями $K_w = 5$, $\tau = 60$ с

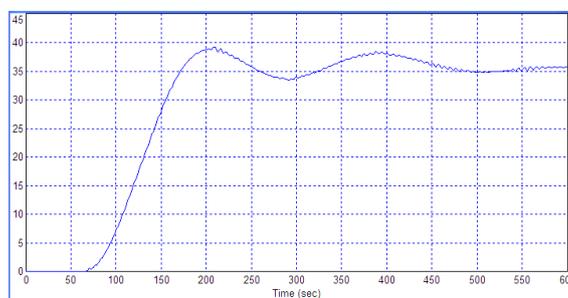


Рис. 11. Переходный процесс в системе с тем же ПИД-регулятором при $K_w = 2$, $\tau = 60$ с

На Рис. 14 показаны процессы при изменении запаздывания в объекте от 25 до 65 с, видно, что система остается устойчивой.

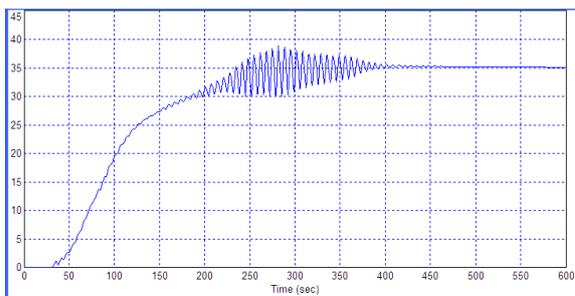


Рис. 12. Переходный процесс в системе с тем же ПИД-регулятором при $K_w = 5$, $\tau = 25$ с

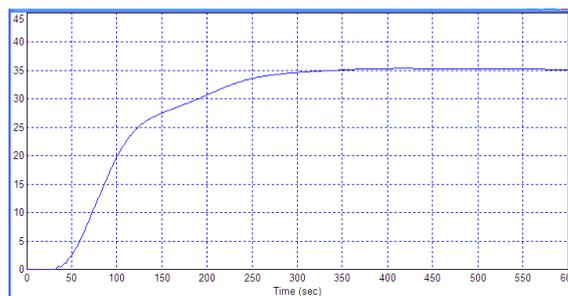


Рис. 13. Переходный процесс в системе с тем же ПИД-регулятором при $K_w = 2$, $\tau = 25$ с

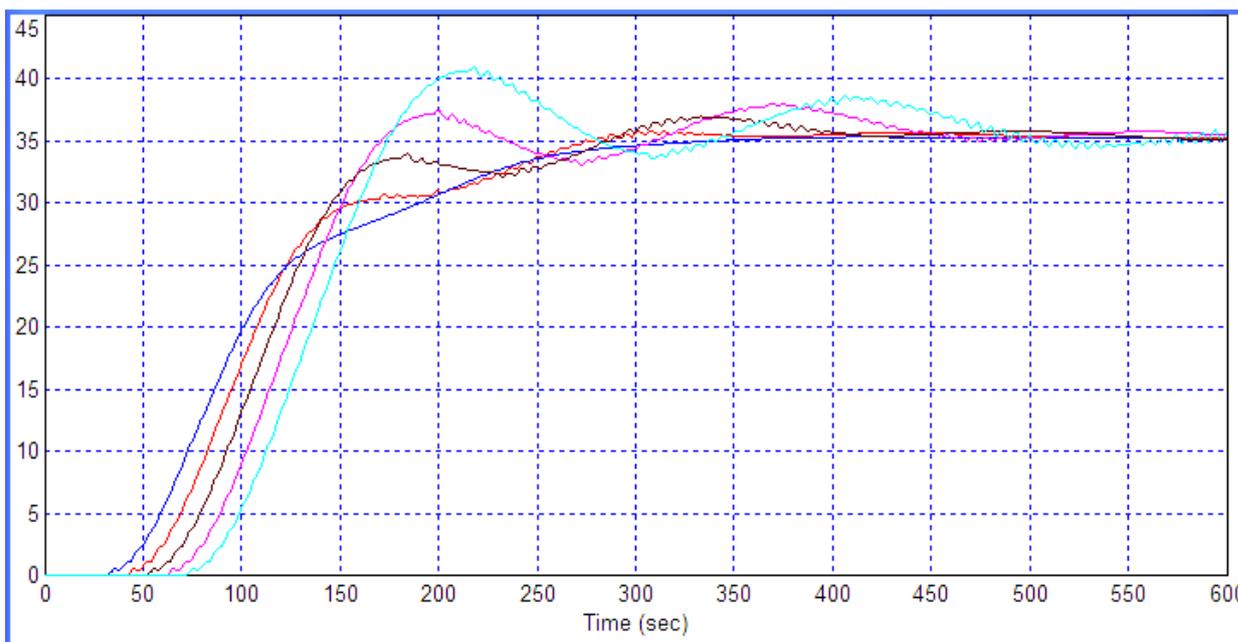


Рис. 14. Переходные процессы в системе с тем же ПИД-регулятором при $K_w = 2$, изменении запаздывания от $\tau = 25$ с до $\tau = 65$ с

Наконец, применим полученный регулятор к модели объекта по соотношению (2), которое

предложено в работе [1]. Результат такого использования показан на Рис. 15.

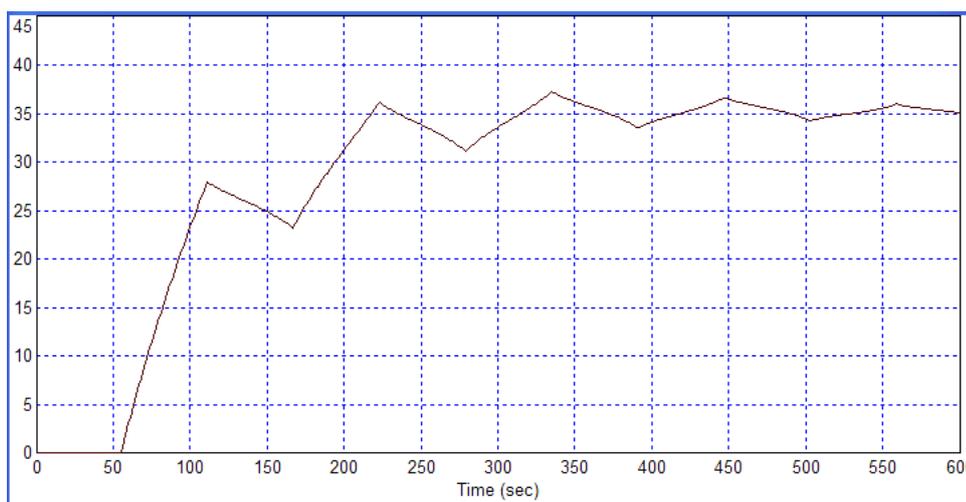


Рис. 15. Переходный процесс с тем же регулятором при модели объекта по соотношению (2)

Видно, что и в этом случае система остается

устойчивой, хотя переходный процесс характеризуется резкими скачками производной.

Этот признак объекта унаследован от модели (2), который виден на графике на Рис. 1, поскольку в реальном объекте этого признака нет, целесообразно предположить, что и в системе с реальным объектом этого признака не будет.

Таким образом, можно считать, что объект, заданный разгонной характеристикой Рис. 1, успешно идентифицирован, на основании произведенной идентификации к нему рассчитан регулятор. Ожидается, что этот регулятор не потребует дополнительной настройки после его реализации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Идентификация объекта по разгонной характеристике вида Рис. 1 может быть сделана точнее, чем предложенная в [1] модель (2). Наиболее точная модель дается соотношением:

$$W(s) = \frac{1}{(25s + 1)^3} \cdot e^{-25s}. \quad (3)$$

2. Использование модели с избыточным запаздыванием вида

$$W(s) = \frac{1}{(25s + 1)^3} \cdot e^{-60s} \quad (4)$$

позволяет рассчитать регулятор, обеспечивающий устойчивый переходный процесс с достаточным запасом устойчивости по фазе, что позволяет назвать его робастным.

Работа выполнена при поддержке фондом РФФИ, проект № 15-38-50594 «Разработка и исследование алгоритмов идентификации объектов управления с сосредоточенными и распределенными параметрами, с целью построения адаптивных систем управления и регулирования».

ЛИТЕРАТУРА

- [1] В.В. Курганов, А.В. Цавнин. Управление объектом с запаздыванием. ФГБОУ ВО НИ ТПУ (Томск, Россия). Автоматика и программная инженерия. 2015. № 2 (12). С. 9–13.
- [2] Жмудь В. А. Моделирование, исследование и оптимизация замкнутых систем автоматического управления. Монография. Новосибирск, Изд-во НГТУ, 2012. – 335 с.
- [3] Жмудь В.А., Заворин А.Н. Структура модели для оптимизации системы с обратной связью. Патент РФ RU 2554291 C1. Оpubл. 27.06.2015. Бюлл. № 18.



Вадим Аркадьевич Жмудь – заведующий кафедрой Автоматики НГТУ, профессор, доктор технических наук.
E-mail: oao_nips@bk.ru



Борис Иванович Пякилля – ассистент кафедры компьютерных интегрированных систем Института Кибернетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.
E-mail: pakillaboris@gmail.com

Correct Identification and Control of Object with Time-Delay Link

Boris Pyakillya, Vadim Zhmud

Abstract. The relevance of control of objects with delay is beyond doubt; rising number of publications proves this, in particular [1]. However, the theoretical calculation results are often very far from practical results obtained using the controller (regulator) to control these objects. We can assume that the most common reason for this is too fundamental simplification of the model in the result of the identification. It can be named uncorrect identification. This paper use the example object from [1] to test its adequacy of the model and its admissibility of simplifying in relation to the task the control design with the helps of negative feedback loop. The correct identification mean usability of the result for the calculation of the regulator for the object by means of any possible method, including numerical optimization. The paper resolves the stated problem of the identification based in the comparison of the resulting transient processes from the experiment and from the simulation. In addition, it gives the results of the regulator calculation by means of numerical optimization on the base of the mathematical modeling (simulation) in program *VisSim*.

Key words: regulation, time-delay, object identification, configuration of control, modeling, simulation, simulation correctness.

REFERENCES

- [1] V.V. Kurganov, A.V. Cavnin. Upravlenie ob#ektom s zapazdyvaniem. FGBOU VO NI TPU (Tomsk, Rossija). Avtomatika i programmnaja inzhenerija. 2015. № 2 (12). S. 9–13.
- [2] Zhmud' V. A. Modelirovanie, issledovanie i optimizacija zamknutyh sistem avtomaticheskogo upravlenija. Monografija. Novosibirsk, Izd-vo NGTU, 2012. – 335 s.
- [3] Zhmud' V.A., Zavorin A.N. Struktura modeli dlja optimizacii sistemy s obratnoj svjaz'ju. Patent RF RU 2554291 C1. Opubl. 27.06.2015. Bjull. № 18.

Модуль воспроизведения звуковых сигналов JQ6500-16P

В.Г. Трубин, М.В. Трубин
ФГБОУ ВПО НГТУ, Новосибирск, Россия

Аннотация: В статье рассматриваются вопросы автономного воспроизведения звуковых сигналов, музыки, голоса с помощью модуля воспроизведения звуковых сигналов *JQ6500-16P*. Приводятся схемы подключения для автономной работы, и работы с компьютером. Акцентировано внимание на простоту переноса звуковых файлов с компьютера в модуль без использования специализированного программного обеспечения. Так же показаны способы управления модулем с помощью кнопок, и по последовательному каналу связи, что позволяет управлять модулем как например, от компьютера, так и от любого микроконтроллера. Минимальное количество внешних компонент, необходимых для работы модуля, так же является существенным преимуществом. Всё это позволяет быстро создавать устройства, системы с возможностями воспроизведения звуковых сигналов.

Ключевые слова: *JQ6500*, *JQ6500-16P*, *MP3*, воспроизведение звука, *RS-232*, *USART*, *UART*, *Terminal*.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность задачи развития робототехники не вызывает сомнений. Одной из проблем, решаемых при создании роботов, является наиболее эффективное обеспечение акустических возможностей такого робота, то есть задача воспроизведения звука. Это может быть актуальным не только для связи с человеком (оператором), но также и для использования акустического канала связи с различными целями. Также робот может обладать акустическими датчиками, включая датчики в звуковом диапазоне, а также в ультразвуковом и инфразвуковом диапазонах. Для тестирования таких датчиков также могут быть крайне полезными средства формирования звуковых сигналов, причем, в этом случае к ним могут предъявляться требования намного выше, чем требования к традиционным акустическим системам.

Также разработка и изготовление, тестирование и изучение акустических систем важно для целей обучения студентов. Опыт показал, что студенты наиболее охотно и более эффективно изучают электронику тогда, когда

её действие может быть воспринято органолептически, именно поэтому популярны робототехнические кружки, где обучающиеся создают своими усилиями устройства, осуществляющие механические действия в контурах с отрицательной обратной связью, что позволяет обеспечить наивысшую точность таких движений.

В данной статье обсуждается целесообразность использования модульного принципа построения сложных систем на примере модуля *JQ6500-16P*. К преимуществам его относятся низкая стоимость (не более 10 USD) [[1]]. Достаточно подключить этот модуль к источнику питания на 4,2 В, снабдить модуль динамиком и несколькими кнопками для управления, чтобы получить готовое автономное устройство для воспроизведения звуков, мелодий. Этот модуль можно использовать для построения говорящих игрушек, говорящих приборов и т. д. Несомненным достоинством модуля так же является простота записи воспроизводимых *MP-3* файлов в модуль без использования специального программного обеспечения.

ОПИСАНИЕ МОДУЛЯ

Рассмотрим модуль воспроизведения звуковых сигналов *JQ6500-16P V2.1*. Основой модуля является микросхема *JQ6500-24SS*. Внешний вид микросхемы приведён на *Рис. 1*, а внешний вид модуля - на *Рис. 2*.



Рис. 1. Внешний вид микросхемы *JQ6500-24SS*

Размер платы 22 x 19 мм. На модуле, который рассматривается в данной статье выводы 8, 9, 10, 18, 19 микросхемы *JQ6500-24SS*

оказались не припаяны к плате. При более подробном рассмотрении модулей на фотографиях поставщиков подтверждает то, что часть выводов микросхемы так же не запаивается. Т.е. этот факт не следует считать браком.

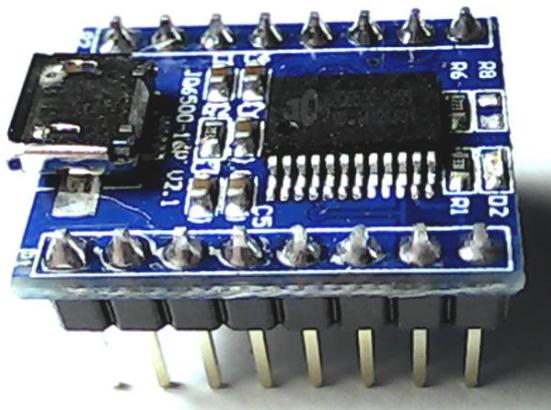


Рис. 2. Внешний вид модуля JQ6500-16P

Основные характеристики модуля:

1. Допустимые частоты дискретизации 8/11.025/12/16/22.05/24/32/44.1/48 кГц;
2. Поддерживаются файловые системы FAT16 и FAT32;
3. Имеется возможность подключения до 5 кнопок для запуска воспроизведения звуковых файлов;
4. Допускается расположение файлов в отдельных каталогах. Поддерживается до 100 каталогов. В каждом каталоге может располагаться до 1000 звуковых файлов;
5. 30 уровней регулировки громкости;
6. Возможность управления от микроконтроллера по асинхронному последовательному интерфейсу USART (UART, RS-232);
7. Возможность управления режимами воспроизведения с помощью набора подключаемых резисторов;
8. Напряжение питания от 3,5 до 5 В. Оптимальное значение 4,2 В.

Более подробную информацию по модулю можно найти в [[2]]. При покупке модуля необходимо обратить внимание на следующие особенности:

Во-первых, модули могут иметь либо внутреннюю Flash-память, либо внешнюю. Рассматриваемый в данной статье модуль имеет внутреннюю Flash-память;

Во-вторых, если Flash-память внутренняя, то обратите внимание на её размер (от 16 до 64 Мбит). Соответственно и стоимость модулей будет разная. На Рис. 3 видно, что в данном модуле используется микросхема памяти 25L6405D. Это Flash-память на 64 Мбит.

Вторая микросхема «8002A» - это аудиоусилитель на 2 Вт;

В-третьих, рекомендованное напряжение внешнего источника питания 4,2 В. Если имеется источник питания на 5 В, то можно поставить последовательно в цепи питания диод, например, 1N4002..1N4007. Это замечание важно, если модуль получает питание от внешнего источника. Если же модуль подключается к USB, то никаких дополнительных действий не требуется. Просто подключите модуль к разъёму USB и работайте.

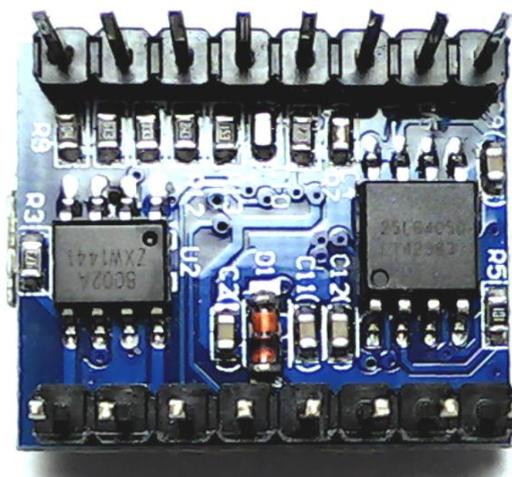


Рис. 3. Внешний вид модуля JQ6500-16P с нижней стороны

MP-3 ФАЙЛЫ

Вначале необходимо получить MP-3 файлы, которые в дальнейшем будут записаны в модуль. Для этого можно воспользоваться, например, поиском в Google с поисковым запросом "mp3 звуки". Или ввести поисковый запрос "синтезатор речи онлайн".

Файлы требуется именовать по следующему алгоритму 01.mp3, 02.mp3 и т.д.

ЗАПИСЬ MP-3 ФАЙЛОВ В МОДУЛЬ

Для записи MP-3 файлов в модуль требуется подключить модуль к компьютеру с помощью кабеля micro-USB. После подключения кабеля должно появиться всплывающее окно, внешний вид которого приведён на Рис. 4.

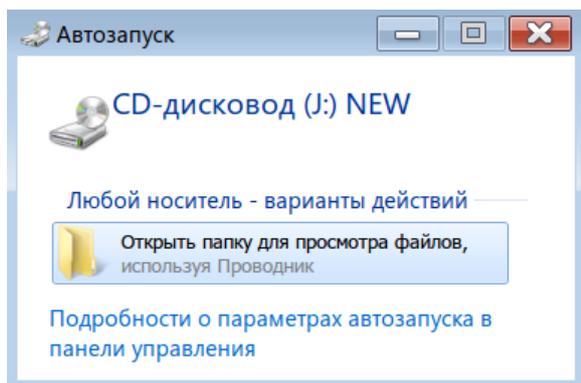


Рис. 4. Окно автозапуска

Для запуска специализированной управляющей программы копирования файлов требуется щёлкнуть указателем мышки на выделенном действии "Открыть папку для просмотра файлов", см. Рис. 4. После этого действия должен появиться каталог "toy" как показано на Рис. 5.



Рис. 5. Каталог «toy»

Далее рекомендуется открыть каталог и запустить файл «MusicDownload». Содержимое каталога «toy» показано Рис. 6.

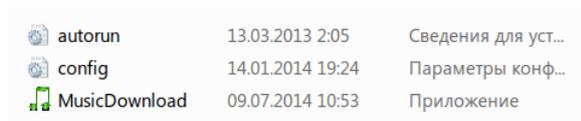


Рис. 6. Содержимое каталога «toy»

В случае успешного запуска управляющей программы выводится диалоговое окно с открытой вкладкой «Update» как показано на Рис. 7.

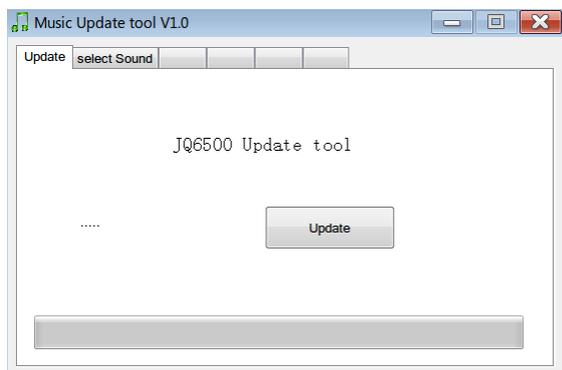


Рис. 7. Диалоговое окно с открытой вкладкой «Update»

Далее рекомендуется переключиться на вкладку «select Sound» как показано на Рис. 8.

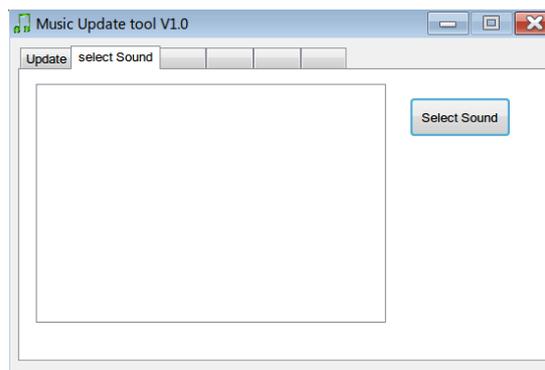


Рис. 8. Вкладка «select Sound»

После этого следует выбрать звуковые файлы, как показано, например, на Рис. 9.

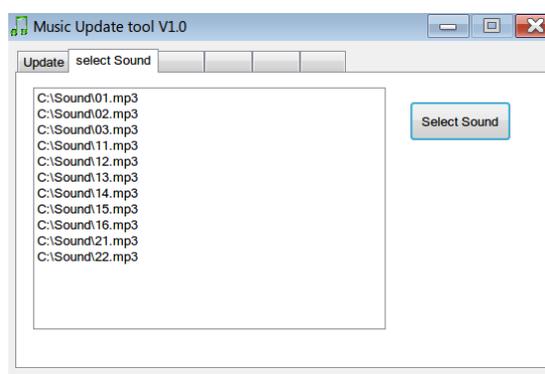


Рис. 9. Вкладка «select Sound» с выбранными файлами

Далее рекомендуется вернуться на вкладку «Update» и нажать на кнопку «Update», см. Рис. 10. Должен начаться процесс копирования файлов из памяти компьютера в Flash-память модуля. Процесс достаточно длительный. При суммарном объёме MP-3 файлов около 1 Мбайта время копирования составляет примерно 1,5 минуты.

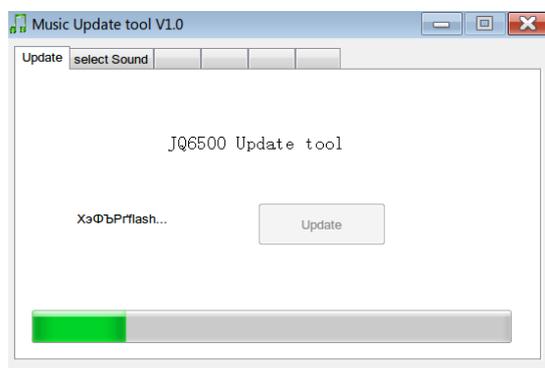


Рис. 10. Процесс копирования файлов

После успешного переноса файлов из памяти компьютера в память модуля должно

появится окно, которое показано на Рис. 11.

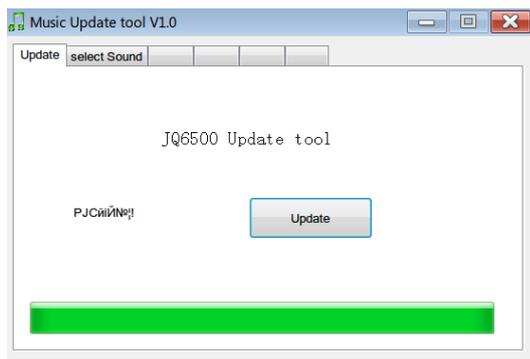


Рис. 11. Внешний вид диалогового окна при удачном завершении процесса копирования файлов

После этого можно закрыть программу и отключить модуль от USB.

ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ МР-3 ФАЙЛОВ

Вначале необходимо к выводам «SPK+», «SPK-» подключить динамик на 8 Ом. Полярность подключения роли не играет. Расположение выводов для подключения можно увидеть на Рис. 12.

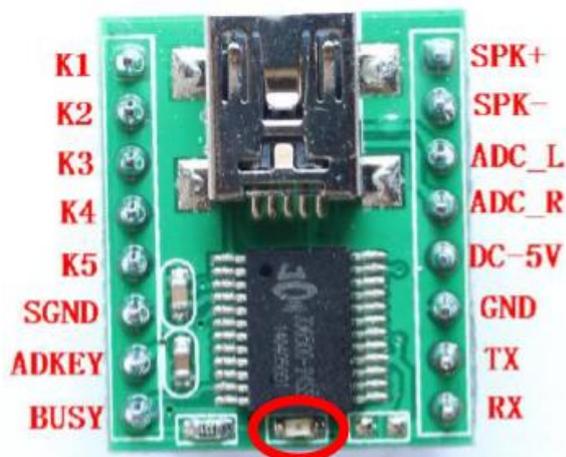


Рис. 12. Внешний вид модуля JQ6500-16P с описанием назначения выводов

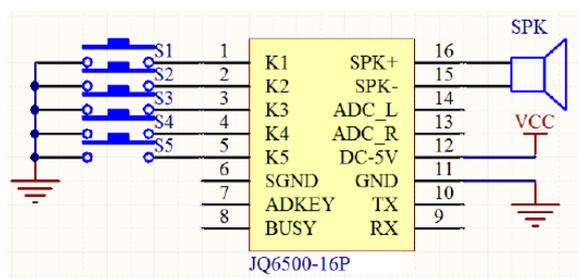


Рис. 13. Схема подключения питания, кнопок, динамика к модулю

Схему подключения внешнего питания, кнопок, динамика к модулю так же можно

узнать из Рисунка 13. Для проверки работоспособности модуля без использования внешнего источника питания можно подключить модуль с помощью кабеля micro-USB к компьютеру. Далее аккуратно кратковременно на 1-2 секунды следует замкнуть выводы «K1» и «GND» между собой. После этого модуль должен начать воспроизводить звук, который записан в первом файле, т.е. с именем «01.mp3». При воспроизведении должен загореться светодиод, который находится рядом с главной микросхемой. На Рис. 12. этот светодиод обведён красным эллипсом. Так же модуль можно просто заставить воспроизводить любой из первых 5 звуковых файлов. Для этого кратковременно следует замкнуть «K1», «K2» ... «K5» с «GND». Если текущий звук ещё воспроизводится, а был замкнут другой контакт с «GND», то текущий звук прерывается, и модуль начинает воспроизводить новый звук.

ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ МР-3 ФАЙЛОВ ПОД УПРАВЛЕНИЕМ С КОМПЬЮТЕРА

Для связи с компьютером можно использовать, например, не дорогой, широко распространённый преобразователь USB/RS232 на базе микросхемы PL2303, внешний вид которого показан на Рис. 14. Так же можно использовать любой имеющийся преобразователь USB/RS232.

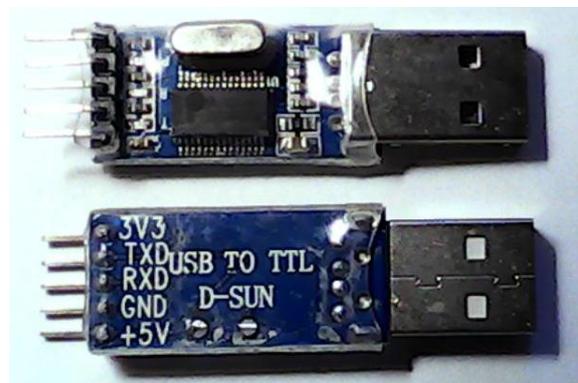
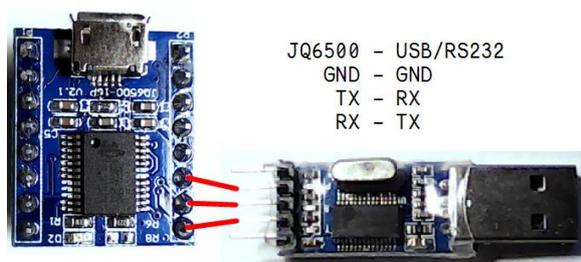


Рис. 14. Внешний вид преобразователя USB/RS232 на базе микросхемы PL2303

Для обеспечения связи рекомендуется соединить модуль с преобразователем USB/RS232 с помощью трёх проводов, как показано на Рис. 15.



JQ6500 - USB/RS232
 GND - GND
 TX - RX
 RX - TX

Рис. 15. Схема соединения преобразователя USB/RS232 с звуковым модулем JQ6500-16P

После этого рекомендуется присоединить динамик и подключить полученную конструкцию к двум USB портам. Возможно, потребуется установка драйверов на преобразователь USB/RS232, определение номера виртуального COM порта. Для управления модулем можно использовать программу «Terminal v1.9b - 20060920Я -by Br@y++». Более подробную информацию по данным действиям можно получить из статьи [[3]].

После запуска программы Terminal установите параметры связи: 9600 бод, 8 бит информационных, 1 стоповый бит, без контроля чётности как показано на Рис. 16.

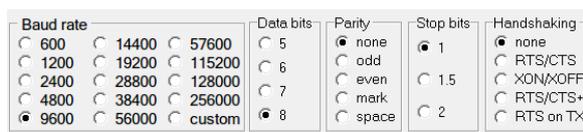


Рис. 16. Внешний вид окон настройки параметров связи программы Terminal

Далее выберите нужный COM-порт, нажмите «Connect». Т.к. управляющие команды содержат «невидимые» коды, то рекомендуется передавать данные с помощью макросов. Для этого требуется нажать на кнопку «SetMacros», она находится в левом нижнем углу. После этого можно ввести, например, три команды как показано на Рис. 17.

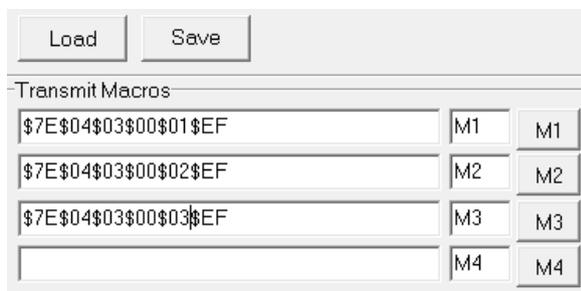


Рис. 17. Внешний вид окон задания и исполнения макросов программы Terminal

Далее можно закрыть окно с макросами, нажав на крестик в верхнем правом углу. После

этого следует нажать по кнопке вызова первого макроса «M1» как показано на Рис. 18.

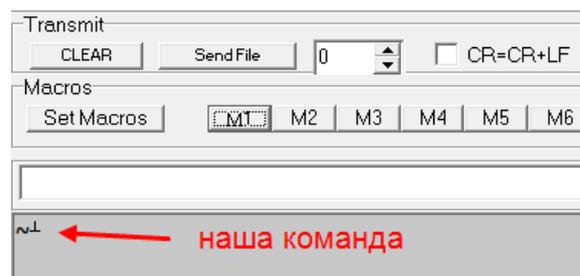


Рис. 18. Внешний вид окна с полученной от модуля информацией программы Terminal

В окне передачи информации можно увидеть ответ от модуля. Так же должен начать воспроизводиться первый звук. После окончания звука в окне приёма информации выводится «STOP» как показано на Рис. 19.

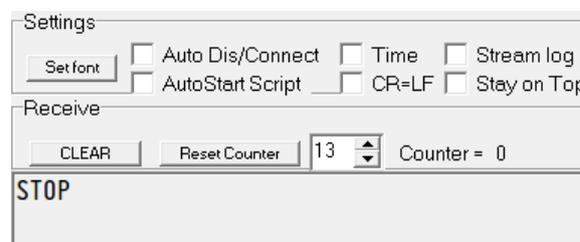


Рис. 19. Внешний вид окна с полученной информацией после окончания вывода звукового файла программы Terminal

Для воспроизведения второго звука нажмите «M2», третьего - «M3». Так же существуют команды воспроизвести следующий/предыдущий звук, увеличить/уменьшить громкость и т.д.

Можно управлять модулем с помощью программы на языке высокого уровня. Ниже, на Рис. 20, приводится программа на языке программирования Python, которая заставляет модуль воспроизвести первый звуковой файл.

```
# -*- coding: cp1251 -*-
# Тест модуля JQ6500-16P V2.1.
import serial
text = "\x7E\x04\x03\x00\x00"
text += '\x01' # Номер записи 01, 02.. в 16 с.с.
text += '\xEF'
ser=serial.Serial(port="COM3", baudrate=
9600)
ser.write(text); ser.close()
```

Рис. 20. Текст тестовой программы на Python

Так же управлять модулем можно не только от компьютера, но и от микроконтроллера через

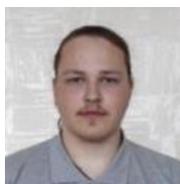
UART (SCI, USART). Это открывает большие возможности по созданию "говорящих" приборов. Управляющие коды можно посмотреть в [[2]].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] URL: http://www.ebay.com/sch/i.html?_odkw=JQ6500-16P&_osacat=0&_from=R40&_trksid=p2045573.m570.11313.TR0.TRC0.H0.XJQ6500+mp3.TRS0&_nk_w=JQ6500+mp3&_sacat=0. (дата обращения 22.06.2015)
- [2] URL: <http://saber.patagoniatecnology.com/wp-content/uploads/2014/09/JQ6500-voice-Module.pdf> (дата обращения 22.06.2015)
- [3] В.А. Жмудь, И.В.Трубин, М.В.Трубин. Обмен данными между компьютером и микроконтроллером STM32F100 по последовательному интерфейсу связи RS-232. Автоматика и программная инженерия. 2015. №1(11). С. 45–51.
- [4] URL: <http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/%D0%90%D0%98%D0%9F%D0%98-1-2015-6.pdf> (дата обращения 22.06.2015)



Виталий Геннадьевич Трубин - зав. лаб. кафедры Автоматики НГТУ, директор ООО «КБ Автоматика».
E-mail: trubin@ngs.ru



Максим Витальевич Трубин - студент группы АА-46 кафедры Автоматики НГТУ
E-mail: tmv.kba@gmail.com

Unit playback of audio signals JQ6500-16P

V.G .Trubin, M.V. Trubin

Abstract: The paper deals with offline playback sounds, music, voice playback using the sounds module JQ6500-16P. The paper gives scheme of connectivity for stand-alone regime, and for work with computer. The paper makes attention to ease of transferring of audio files from a computer to the module without the use of specialized software. In addition, the paper discovers the way to control the module using the buttons and serial interface. It allows controlling the module with the help of computer or on any microcontroller. The minimum number of external components is required for the operation of the module. It is the additional significant advantage. All this allows quickly creating of devices and systems capable of reproducing audio signals.

Key words: JQ6500, JQ6500-16P, MP3, play audio, RS-232, USART, UART, Terminal.

REFERENCES

- [1] URL: http://www.ebay.com/sch/i.html?_odkw=JQ6500-16P&_osacat=0&_from=R40&_trksid=p2045573.m570.11313.TR0.TRC0.H0.XJQ6500+mp3.TRS0&_nk_w=JQ6500+mp3&_sacat=0. (Date: 22.06.2015)URL: <http://saber.patagoniatecnology.com/wp-content/uploads/2014/09/JQ6500-voice-Module.pdf> (Date: 22.06.2015)
- [2] V.A. Zhmud, I.V. Trubin, M.V. Trubin. Exchange of Data between the Computer and the Microcontroller STM32F100 by Serial Communication Interface RS-232. Automatics & Software Enginery. 2015. №1(11). С. 45–51. <http://www.jurnal.nips.ru/sites/default/files/A%26SE-1-2015-6.pdf>
- [3] URL: <http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/%D0%90%D0%98%D0%9F%D0%98-1-2015-6.pdf> (Date: 22.06.2015)

**V. Популярные статьи.
Введение в специальность.**

Содержание раздела:

- В.А. Жмудь. Сопоставление вклада погрешностей квантования по времени и по уровню в результат аналогоцифрового преобразования. НГТУ (Новосибирск, Россия). Автоматика и программная инженерия. 2015. № 3 (13). С. 66–70.
- В.А. Жмудь. Подавление обратного перерегулирования в системах автоматике. НГТУ (Новосибирск, Россия). Автоматика и программная инженерия. 2015. № 3 (13). С. 71–75.

Сопоставление вклада погрешностей квантования по времени и по уровню в результат аналогоцифрового преобразования

В.А. Жмудь
НГТУ (Новосибирск, Россия)

Аннотация: Выбор аналого-цифровых преобразователей (АЦП) для преобразования сигналов осуществляется на основе компромисса между быстродействием и точностью, даже если цену преобразователя можно не принимать в расчет. Очевидно, точность АЦП связана с разрядностью, хотя не только разрядность ее ограничивает. Теорема Котельникова (теорема Найквиста-Шеннона) устанавливает, что при достаточно высокой точности взятия отсчетов достаточно брать их с частотой больше, чем удвоенная частота максимума спектра преобразуемого сигнала. Это требование устанавливает границы применимости цифрового преобразования, и если, согласно условиям чистой теории, сигнал бесконечен во времени, а отсчеты взяты с нулевой погрешностью, а также известна верхняя граница полосы частот сигнала, то по таким отсчетам можно восстановить исходный сигнал без потерь. На этом основании многие практикующие инженеры, преподаватели и исследователи считают, что точность преобразования имеет наивысший приоритет, а частота преобразования может быть не слишком высокой, достаточно обеспечить требуемые условия этой теоремы. Однако на практике сигналы ограничены во времени, точность преобразования также ограничена, для восстановления исходного сигнала не используют алгоритмы вычисления его, которые заложены в доказательстве указанной теоремы. Актуален вопрос критерия для выбора АЦП, и если нельзя одновременно обеспечить высшую точность и высшее быстродействие, то какой из этих параметров следует считать наиболее значимым, а каким параметром можно пожертвовать. В данной статье исследуется этот вопрос методом моделирования.

Ключевые слова: системы сбора и обработки данных, АЦП, дискретизация, квантование по времени, квантование по уровню

ВВЕДЕНИЕ

Пусть требуется преобразование некоторого сигнала, который изменяется достаточно медленно, что можно без больших сложностей обеспечить выполнение соотношения частоты

преобразования и верхней частоты спектра преобразуемого сигнала, требуемого условиями теоремы Котельникова, известной в зарубежной литературе также как теорема Найквиста или Найквиста-Шеннона [1]. А именно: можно обеспечить намного больше количество отсчетов сигнала, чем два отсчета на период верхней частоты. Также можно обеспечить достаточно большое количество разрядов АЦП. Из имеющегося набора доступных АЦП в наличии имеются АЦП с более высоким быстродействием, но меньшей разрядностью, а также АЦП с большей разрядностью, но с меньшим быстродействием. Например, АЦП, работающие на частоте преобразования около 120 МГц, как правило, имеют 12-14 разрядов, в быстродействие 18-20-разрядных АЦП намного ниже. Встречаются и такие АЦП, которые можно запрограммировать на различные режимы работы, в которых можно повысить либо быстродействие, либо число разрядов, но не одновременно оба параметра.

Актуально решение вопроса о выборе: что следует предпочесть. Также можно поставить вопрос о том, каким количеством разрядов можно пожертвовать ради выигрыша по быстродействию, если такая жертва оправдана, или какую потерю быстродействия можно допустить ради повышения разрядности.

Другая причина актуальности решения этой задачи состоит в формировании критерия для выбора методов преобразования сигналов, в том числе, преобразований для измерения частоты, фазы и других характеристик сигнала, а не только лишь величины (или амплитуды). Актуальность этого вопроса связана с большим прогрессом в развитии методов обработки потоков данных с применением методов потоковой фильтрации, в частности, для измерения частоты сигнала или разностей фаз двух или большего количества сигналов.

Если сигнал линейно нарастает или убывает, то осуществление осреднения двух последовательных отсчетов позволяет снизить шаг дискретности вдвое, то есть как бы виртуально добавить один разряд. Это утверждение не справедливо, если сигнал неизменен по величине, но для неизменных сигналов вопрос компромисса между быстродействием и точностью не стоит,

поскольку выбор однозначно следует делать в пользу точности.

Можно исследовать этот вопрос теоретически, но с появлением эффективных средств моделирования сигналов и их преобразований наиболее просто и наглядно решить указанный вопрос экспериментально методом математического моделирования (симуляции).

Достаточно лишь выбрать тестовые сигналы, математическую модель преобразователей и критерии сравнения получаемых сигналов, после чего исследование осуществляется с применением одной из моделирующих программ.

1. ВЫБОР СИГНАЛОВ И ПАРАМЕТРОВ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Для анализа используем два вида сигналов: фрагмент гармонического сигнала (синусоидального) и экспоненциально нарастающий сигнал, формирующийся на выходе фильтра первого порядка в ответ на ступенчатое изменение сигнала на его входе.

Для моделирования используем программу *VisSim*. Этот выбор диктуется возможностью отдельного формирования в этой программе квантователя по уровню и квантователя по

времени. Для моделирования АЦП необходимо последовательно соединить эти квантователи, причем, квантователь по времени должен быть включен первым.

Вследствие особенностей моделирования в этой программе квантование по уровню получает результат с систематической ошибкой на половину единицы младшего разряда, поскольку на выходе такого квантователя формируется сигнал, равный целой части от величины входного сигнала в единицах кванта. Поэтому для адекватного преобразования к сигналу на входе перед подачей его на соответствующий квантователь добавим смещение, равное половине кванта. Будем моделировать два различных АЦП, у первого из которых частота преобразования в четыре раза выше, также как в четыре раза выше погрешность квантования. На *Рис. 1* показана схема моделирования двух АЦП по этой схеме, а также схема для формирования опорного сигнала, отклонение от которого будет наиболее точно характеризовать ошибку преобразования. С целью моделирования опорного канала достаточно пропустить входной сигнал через те же фильтры, через которые пропускается сигнал при его преобразовании.

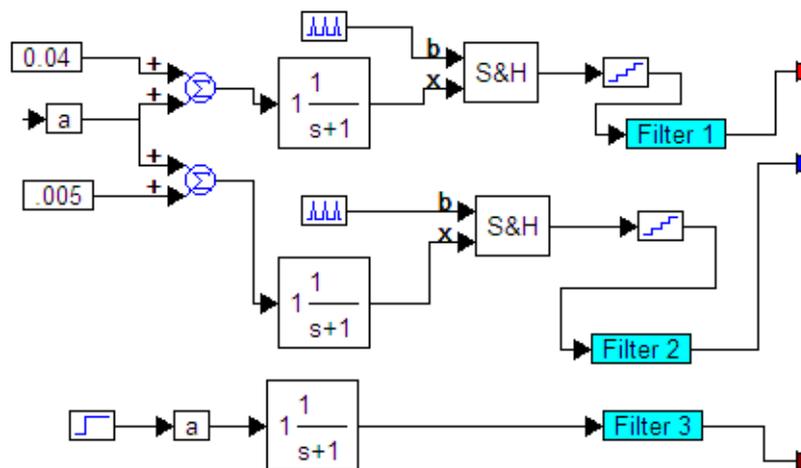


Рис. 1. Структура для моделирования сигналов

Как видно из *Рис. 1*, для преобразования ступенчатого сигнала используется фильтр с постоянной времени $T_1 = 1$ с. Для того, чтобы сравнивать результаты преобразований, осуществленных с помощью АЦП, удобно на выходах этих АЦП включить фильтры низких частот, чтобы получить сглаженный непрерывный сигнал. При цифровой обработке сигналов можно использовать соответствующие фильтры Калмана. Эти фильтры на *Рис. 1* реализованы в виде двух последовательно включенных фильтров первого порядка с постоянной времени $T_2 = 0,1$ с. Период преобразования верхнего квантователя по времени равен 0,1 с, а период преобразования нижнего квантователя по времени равен 0,4 с. Соответственно, ошибка квантования верхнего

квантователя по уровню в восемь раз выше, чем ошибка нижнего квантователя, и эти ошибки, соответственно, равны 0,08 и 0,01 единицы. При этом мы сознательно ухудшили ситуацию для первого АЦП, поскольку при условии, что частота его преобразования выше в четыре раза, погрешность этого преобразования больше в восемь раз, а не в четыре раза. Это намеренное снижение точности быстродействующего АЦП направлено на большую убедительность результатов.

На *Рис. 2* показаны результаты моделирования преобразований предложенных двух видов сигналов с помощью АЦП с рассмотренными параметрами. Черной линией показан опорный сигнал, то есть тот сигнал, который должен был быть получен при идеальном преобразовании.

Синей линией показан сигнал на выходе канала с более медленным, но более точным каналом, расположенным внизу схемы. Красной линией показан результат моделирования с более быстрым, но менее точным каналом преобразования, расположенным на схеме выше.

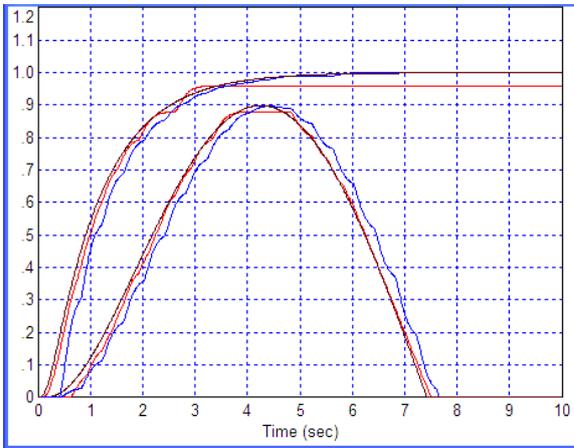


Рис. 2. Результат моделирования по схеме, показанной на Рис. 1

Из рассмотренных графиков на Рис. 2 следует, что увеличение быстродействия вчетверо следует предпочесть снижению погрешности в восемь раз, поскольку отличие красного графика от черного меньше, чем отличие синего графика на всей протяженности процесса, кроме случая, когда процесс практически не изменяется (в установившемся режиме отклика на ступенчатое воздействие). Для более детального исследования этой ситуации рассмотрим сигналы ошибки измерения, представляющие собой разницы между соответствующими выходами фильтров, включенных на выходах АЦП и выходом фильтра, включенного непосредственно на выходе формирователя сигнала. То есть рассмотрим разницу между кривыми, показанными синей и черной линиями, а также между графиками, показанными красной и черной линиями. Для вычисления разниц внесем в структуру вычитающие устройства, как показано в структуре на Рис. 3.

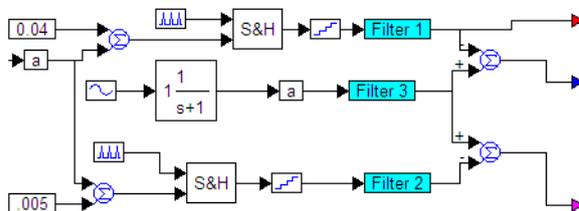


Рис. 3. Структура для вычисления разностных сигналов, соответствующих ошибке измерения АЦП

Результат показан на Рис. 4. Видно, что ошибка второго (медленного) канала в два-три раза выше, чем ошибка первого (быстрого) канала. Для наглядности рассмотрим промежуточные сигналы. На Рис. 5 показаны сигналы непосредственно на выходах АЦП без

использования фильтров. Естественно, что в реальных системах сбора и обработки данных погрешность квантования по уровню намного ниже, чем в этой модели. Погрешность преобразования по времени может быть такой же или даже больше, поскольку выбранная частота намного превышает требования теоремы Котельникова. Большая погрешность квантования по уровню выбрана для большей наглядности результата. Поэтому для дальнейшего детального исследования этого вопроса и с целью большей наглядности увеличим погрешность квантования по времени, соответственно, в два, в четыре и в восемь раз. Результаты показаны на Рис. 6, 7 и 8, соответственно.

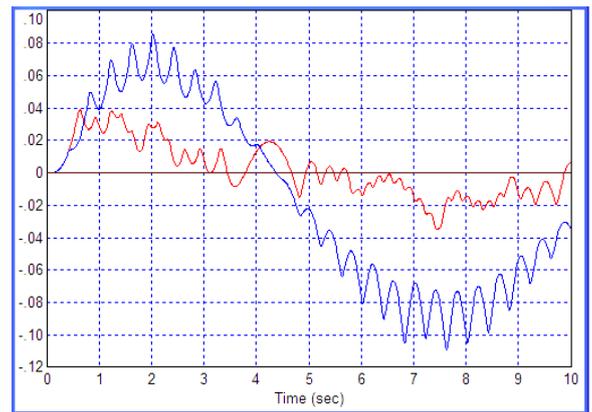


Рис. 4. Графики разностей выходных каналов АЦП и опорного сигнала: красная линия – верхний канал, синяя линия – нижний канал

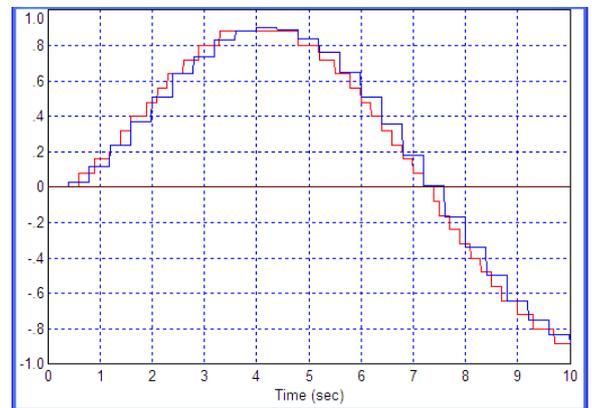


Рис. 5. Графики выходных каналов АЦП: красная линия – верхний канал, синяя линия – нижний канал

На Рис. 9 показаны те же сигналы после фильтров, а на Рис. 10 – в виде сигналов ошибки, то есть после вычитания из них опорного сигнала. Обратим внимание на то, что на Рис. 4 погрешность, показанная красной линией, в два-три раза меньше погрешности, показанной синей линией, а на Рис. 10 ситуация кардинально изменилась. На этом Рис. 10 погрешность, показанная красной линией, в четыре-десять раз больше, чем погрешность, показанная синей линией. Дело в том, что вследствие чрезмерного увеличения погрешности измерения она сравнялась с самой измеряемой величиной.

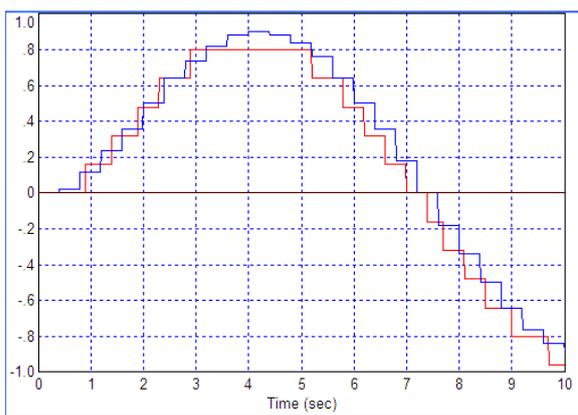


Рис. 6. Графики выходных каналов АЦП: красная линия – верхний канал, синяя линия – нижний канал. То же, что и на Рис. 5, но при увеличении погрешностей квантования по времени в два раза

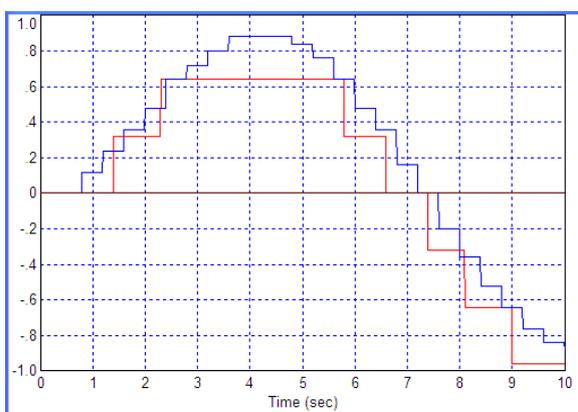


Рис. 7. Графики тех же сигналов, что и на Рис. 6, но при увеличении погрешностей квантования по времени в два раза (по сравнению с графиками на Рис. 5 погрешности увеличены в 4 раза)

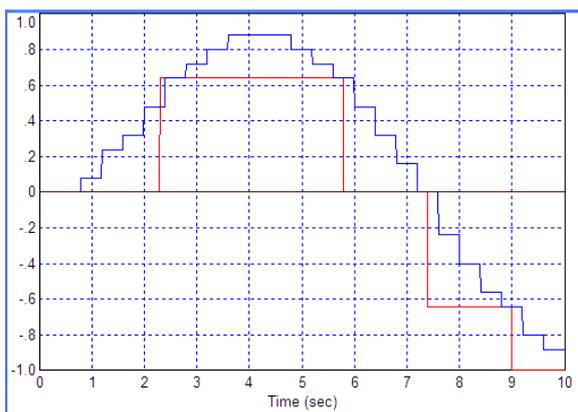


Рис. 8. Графики тех же сигналов, что и на Рис. 6, но при увеличении погрешностей квантования по времени в четыре раза (по сравнению с графиками на Рис. 5 погрешности увеличены в 8 раз)

Действительно, на последнем графике этой серии, то есть на Рис. 8, для красной линии шаг квантования стал равным 0,64, а само значение сигнала изменяется от -1 до +1. То есть фактически для данного сигнала осталось 4–5 уровней сигнала, что соответствует

трехразрядному АЦП. Соответственно, на Рис. 7 красная линия соответствует АЦП на 5–6 разрядов, а на Рис. 6 – АЦП на 6–7 разрядов.

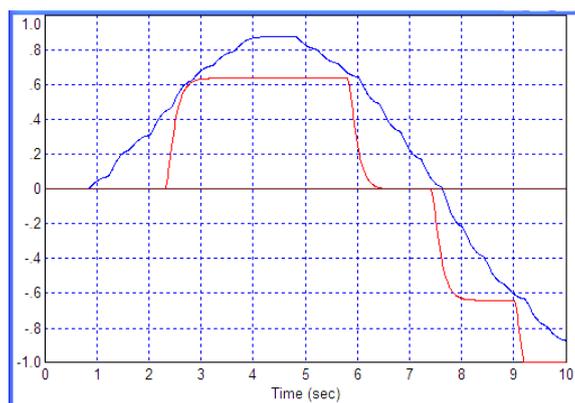


Рис. 9. Графики тех же сигналов на выходе фильтров в условиях эксперимента тех же, что на графиках на Рис. 8

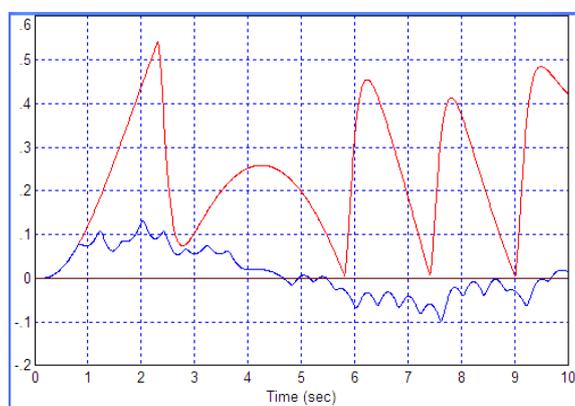


Рис. 10. Графики тех же сигналов, что на графиках Рис. 9, после вычитания из них опорных сигналов

Следовательно, если соотношение погрешности по уровню к значению входного сигнала не доводить до соотношения, соответствующего 6-разрядному АЦП или хуже, то повышение точности преобразования менее предпочтительно, чем повышение частоты преобразования. Если же погрешность квантования по уровню меньше, чем погрешность 8-разрядного АЦП, а количество отсчетов соответствует 40 отсчетам на период или меньше, то имеются основания рекомендовать повышение частоты преобразования предпочтительно перед повышением точности этого преобразования.

Хотя теорема Котельникова рекомендует обеспечить хотя бы двойное превышение частоты квантования по отношению к частоте верхней границы спектра обрабатываемого сигнала, в наших исследованиях стартовые условия обеспечивали превышение этого требования к частоте квантования в десятки раз.

Полученные результаты целесообразно учесть при проектировании АЦП или систем сбора и обработки сигналов, хотя, казалось бы, теорема Котельникова и ее приложения рекомендуют совсем иное. Данные исследования вовсе не

опровергают указанную теорему, они опровергают ложные заключения, которые могут быть сделаны на основании ее основного результата в связи с ложными логическими построениями или аналогиями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом моделирования установлено и убедительно показано, что выбор соотношения точности и быстродействия при преобразовании динамично изменяющихся сигналов является не простым и не однозначным. Если нет возможности обеспечения одновременно наилучшего быстродействия и наилучшей точности, то в ситуации, наиболее точно соответствующей практическим случаям (то есть когда имеется не более 40–50 отсчетов на один период входной частоты и АЦП имеет эффективную разрядность не хуже восьми разрядов), быстродействие важнее точности. В этой ситуации повышение частоты преобразования в четыре раза более эффективно, чем повышение точности преобразования в восемь раз.

Под эффективной разрядностью мы понимаем то количество разрядов АЦП, которое соответствует диапазону изменений входного сигнала. Если сигнал изменяется в пределах не менее 80–90 % от входного диапазона, то эффективная разрядность соответствует разрядности АЦП. Если, например, сигнал изменяется лишь в пределах 25 % этого диапазона, то эффективная разрядность на два разряда ниже, если в пределах 12,5 %, она хуже на три разряда и так далее.

Указанные результаты могут и должны быть распространены на задачу выбора частоты и точности преобразования при измерениях частоты или фазы (разности фаз) сигналов. Данное исследование направлено на решение именно этих задач.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России по государственному заданию №2014/138, тема проекта «Новые структуры, модели и алгоритмы для прорывных методов управления техническими системами на основе наукоемких результатов интеллектуальной деятельности», проект № 471.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] https://ru.wikipedia.org/wiki/Теорема_Котельникова .
- [2] В. А. Жмудь Моделирование, исследование и оптимизация замкнутых систем автоматического управления. Монография. Новосибирск, Изд-во НГТУ, 2012. – 335 с.



Вадим Аркадьевич Жмудь – заведующий кафедрой Автоматики НГТУ, профессор, доктор технических наук.
E-mail: oao_nips@bk.ru

Comparison of the Contribution of Quantization Error in Level and in Time into the Result of Analog-to-Digital Conversion

VADIM ZHMUD

Abstract: Choice of analog-digital converters (ADC) for converting of signals is based on a compromise between speed and accuracy, even if the price of ADC can be not taken into consideration. Obviously, the accuracy of ADC is connected with the number of digits, though not only this limits it. Nyquist theorem (Nyquist-Shannon sampling theorem) states that at sufficiently high accuracy of samples taking it is enough to take them with a frequency of more than twice of the maximum frequency of the spectrum of the converted signal. This requirement sets the limits of applicability of digital conversion, and if, under the terms of the pure theory, the signal is infinite in time and the samples are taken from the zero error and the upper limit of the frequency band of signal is known. Under these conditions, such readings gives the opportunity to restore the original signal without loss. On this basis, many practitioners, engineers, teachers, and researchers believe that the accuracy of the conversion has the highest priority, and the frequency of conversion can be not too high, it is enough to provide the required conditions of the theorem. However, in practice, the signals are limited in time, the accuracy of the conversion is also limited, and the restoration of the original signal not uses the best algorithms for calculating it. The proof of this theorem does not take into account such situation. The question of the criteria for selecting the ADC is relevant, especially if it is not possible at the same time to provide a higher precision and higher performance. It is important to know, which of these parameters should be considered as the most important one, and what parameter you can donate. This paper explores this question by modeling.

Key words: data collection and data processing, ADC, sampling, quantization of the time, quantization of the level

REFERENCES

- [1] https://ru.wikipedia.org/wiki/Теорема_Котельникова .
- [2] V.A. Zhmud Simulation study and optimization of locked systems of automatic control. Monograph. Novosibirsk, Publishing House of the NSTU, 2012. - 335 p.

Подавление обратного перерегулирования в системах автоматике

В.А. Жмудь

ФГБОУ ВПО НГТУ (Новосибирск, Россия)

Аннотация. Задача управления объектами, склонными к колебаниям, крайне сложна. Аналитические методы в случае сложной модели объекта уступают по возможностям методам, основанным на численной оптимизации регуляторов. Инструментарий этого метода составляет набор структур регуляторов, набор целевых функций и средства для моделирования и оптимизации. Ряд работ автора посвящен методам построения целевых функций, их достоинствам и недостаткам, а также обоснованию выбора программы *VisSim* для моделирования и оптимизации [1–6]. Наиболее часто используемые структуры регулятора – это последовательный ПИД-регулятор, который содержит пропорциональный, интегрирующий и дифференцирующий тракты. В ряде случаев специальные меры при выборе целевой (стоимостной) функции позволяют подавить колебания в системе, однако, в некоторых случаях даже эти меры недостаточно эффективны. В данной статье обсуждается один из структурных методов подавления колебаний в системах для управления объектами, склонными к колебательной неустойчивости. Этот метод состоит в использовании более сложной структуры, чем традиционные ПИД-регуляторы, в частности, двухконтурный регулятор. Предлагаемый метод апробирован методом математического моделирования, в статье приводятся иллюстрирующие переходные процессы, подтверждающие эффективность этого метода.

Ключевые слова: регулятор, автоматика, обратная связь, быстродействие, точность, управление, переходный процесс, численная оптимизация

ВВЕДЕНИЕ

Точное управление технологическими объектами актуально во всех отраслях промышленности, техники, технологии и науки. Эта задача всегда решается с помощью систем с обратной связью. В таких системах изменения входных управляющих сигналов, поступающих на объект, обеспечивают достижение требуемого значения выходных величин объекта с высокой статической и динамической точностью, поскольку отклонение от задания

(ошибка управления) постоянно измеряется и используется для формирования управляющего воздействия. Для успешности решения этой задачи требуется правильная структура системы и правильный расчет регулятора. Вся сложность, как правило, состоит в отыскании модели регулятора, поскольку структура системы, как правило, типовая, и состоит в том, что выходной сигнал объекта вычитается из предписанного значения (задания), полученная разница (ошибка) поступает через регулятор на вход объекта. Расчет регулятора при такой структуре основан на знании математической модели объекта, то есть его передаточной функции, описывающей преобразование входного сигнала в выходную величину.

Встречаются объекты, склонные к колебаниям выходной величины. В них даже отклик на ступенчатое воздействие имеет вид колебаний, зачастую с нарастающей амплитудой. В некоторых случаях такие колебания удается легко подавить за счет действия обратной связи, в других случаях колебания настолько присущи объекту, что весьма трудно рассчитать или подобрать при настройке регулятор, который бы подавил такие колебания в системе.

Склонность к колебаниям в полученной системе состоит в одном или нескольких из трех нежелательных свойств:

1. Большое количество колебаний, прежде чем выходная величина установится в требуемом равновесном состоянии.
2. Большое перерегулирование – превышение выходной величиной требуемого значения на существенную величину (в процентах).
3. Обратное перерегулирование – изменение выходной величины в направлении, противоположном требуемому, которое отстоит от предписанного больше, чем стартовое значение.

Для решения задачи управления такими объектами, так же, как и для управления любыми другими объектами, могут применяться регуляторы с пропорциональным, интегрирующим и дифференцирующим трактами (ПИД-регуляторы). Коэффициенты этих трактов рассчитываются разными методами, например, путем численной оптимизации. Обобщенный вид традиционной системы показан на *Рис. 1*.

Общий вид выходного сигнала ПИД-регулятора задается уравнением:

$$U(t) = K_p E(t) + K_D \frac{dE(t)}{dt} + K_I \int_{t_0}^t E(t) dt. \quad (1)$$

Здесь K_p , K_I , K_D – коэффициенты усиления пропорционального, дифференцирующего и интегрирующего трактов регулятора.

Проектирование регулятора состоит в этом случае в вычислении таких значений этих коэффициентов, которые обеспечат требуемое быстродействие, точность и устойчивость системы [1–6].

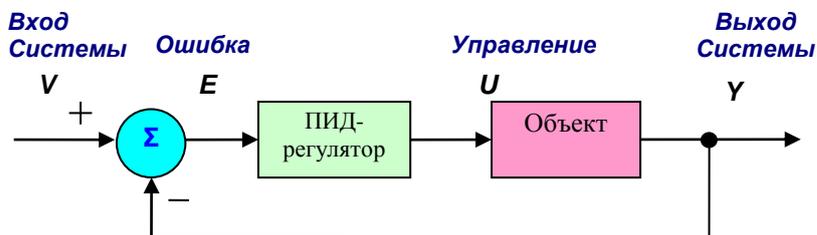


Рис. 1. Традиционная система

В настоящей статье ставится задача исследования одного из методов повышения качества переходного процесса при управлении объектами, склонными к колебаниям, который бы позволил исключить большое количество колебаний, большое перерегулирование (больше 5 %) и обратное перерегулирование.

1. ПРЕДЛАГАЕМЫЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Этот метод основан на использовании полученной на первом шаге системы как нового

комплексного объекта и применении для этого объекта новой внешней системы управления, содержащей дополнительный регулятор. Структурная схема такой системы показана на Рис. 2. Объект с ПИД-регулятором во внутреннем контуре образуют систему, переходный процесс в которой неудовлетворительный. Эта система рассматривается как новый объект, внешний ПИ-регулятор со своим контуром обеспечивает управление этим сложным объектом так, чтобы качество переходного процесса соответствовало требованиям, предъявляемым к нему.

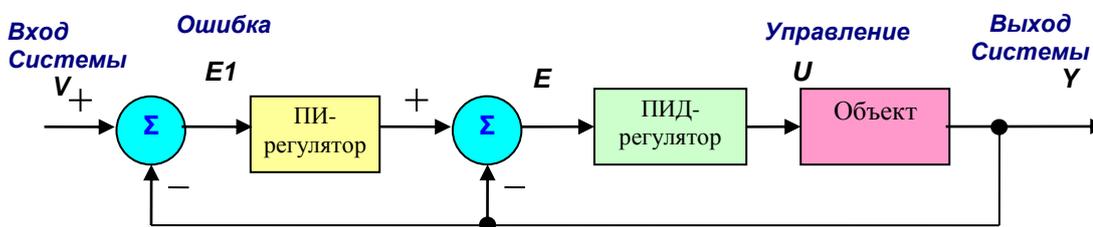


Рис. 2. Система по методу применения дополнительного внешнего контура

Рассмотрим объект из статьи [7]. В этой статье рассмотрен линейный объект, математическая модель которого задана в виде передаточной функции следующего вида:

$$W_o(s) = \frac{s^3 + 4s^2 - s + 1}{s^5 + 2s^4 + 32s^3 + 14s^2 - 4s + 50}. \quad (2)$$

На Рис. 3 показана структура для моделирования и оптимизации системы с объектом по уравнению (2), а также результаты оптимизации в виде найденных коэффициентов регулятора и полученных графиков переходных процессов. Видно, что переходный процесс неудовлетворительный. Действительно, имеется обратное перерегулирование на 25 % от предписанного скачка, причем оно возникает уже после того, как выходная величина объекта

достигла предписанного значения. Если бы эта величина так и осталась в зоне предписанного значения, переходный процесс был бы идеален. Но поскольку она идет в обратном направлении и даже уходит на дополнительные 25 % дальше от предписанного значения, чем была в начале процесса, такой процесс далек от идеала. Кроме того, после этого имеется перерегулирование на величину около 70 %. В целом в процессе имеется три ярко выраженных колебания. Для преодоления этих недостатков был использован метод переключения коэффициентов [8], но он не дал ощутимого положительного результата. Кроме того, был апробирован более сложный регулятор, который содержит не только пропорциональный, интегрирующий и дифференцирующий тракты, но также и тракт с двойным дифференцированием. Тем самым был

реализован ПИДД-регулятор, или как его еще называют, ПИД²-регулятор. Второе дифференцирование дало несущественное улучшение. Попытка ввести в регулятор дифференцирование третьего порядка, как и ограниченное по полосе дифференцирование, не только не дала положительного эффекта, но привела к нарушению устойчивости в системе. Каждый раз при изменении структуры регулятора использовалась процедура оптимизации, поэтому можно утверждать, что данные структуры не дают заметного улучшения качества системы ни при каких значениях параметров регулятора. Поэтому был применен метод дополнительного внешнего контура. При этом полученные в результате оптимизации коэффициенты внутреннего регулятора были зафиксированы и не подвер-

гались дальнейшему изменению в процедуре оптимизации. Внешний регулятор был задан в виде ПИ-регулятора. Структурная схема для моделирования и оптимизации показана на Рис. 4. Там же показаны полученные коэффициенты внешнего регулятора, а также коэффициенты внутреннего ПИД²-регулятора. На Рис. 5 показаны полученные переходные процессы. Наиболее быстрый процесс с небольшими колебаниями (синяя линия) – это результат оптимизации внешнего ПИ-регулятора. Для сравнения на этом же рисунке показаны графики при использовании интегрального регулятора с коэффициентами, соответственно, 0,1 и 0,05. Во всех этих случаях обратное перерегулирование отсутствует, в последних двух случаях отсутствует также и обычное перерегулирование.

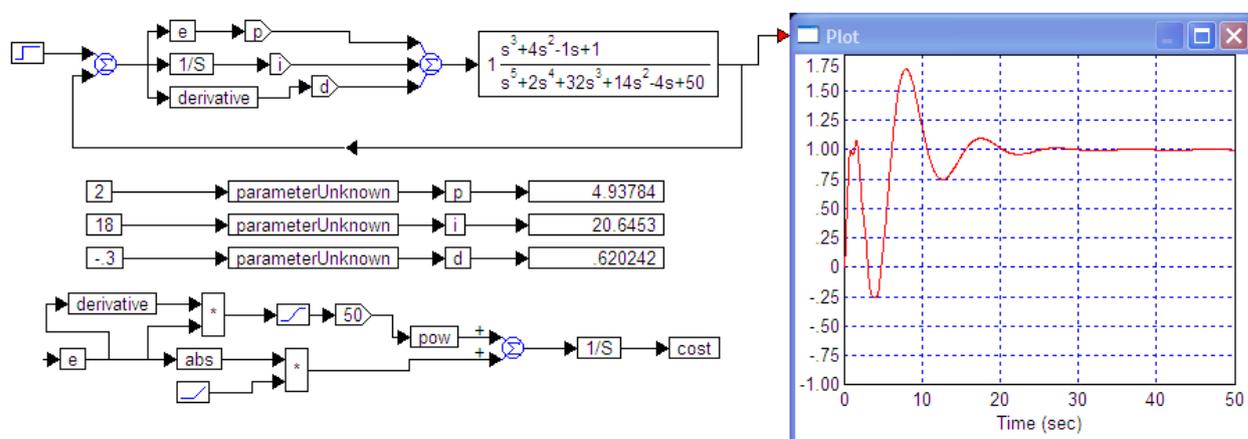


Рис. 3. Структура для оптимизации системы с объектом (2)

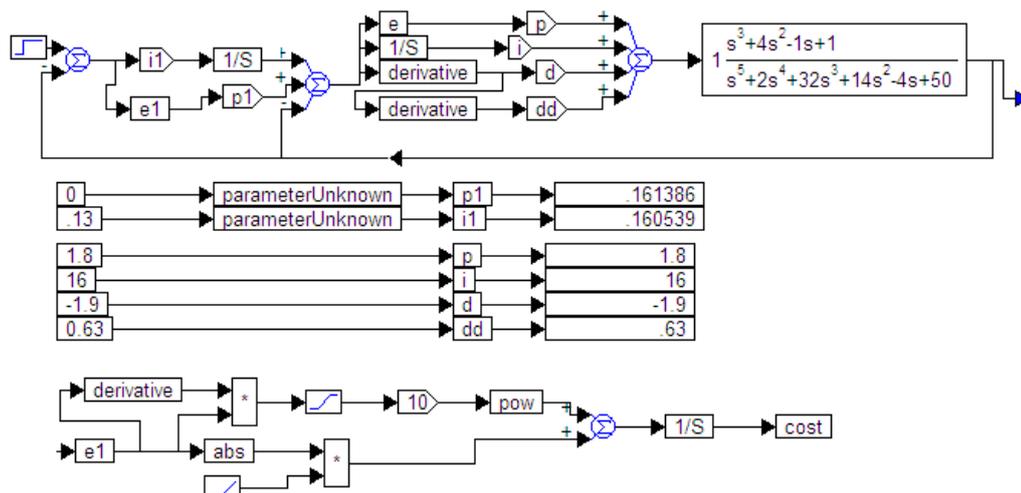


Рис. 4. Структура для оптимизации системы с объектом (2) при использовании дополнительного внешнего контура

Таким образом, предложенный метод дает эффективный инструментальный борьбы с обратным перерегулированием при скачкообразном изменении задания. Длительность переходного процесса не ухудшилась, поэтому улучшение его качества достигнуто только ценой усложнения регулятора, но не ценой потери быстродействия. Усложнение регулятора

при современном уровне техники не играет существенной роли, поскольку большинство регуляторов выполняются на базе цифровой вычислительной техники, и небольшое изменение соотношений для вычислений управляющих сигналов не усложняет системы в целом.

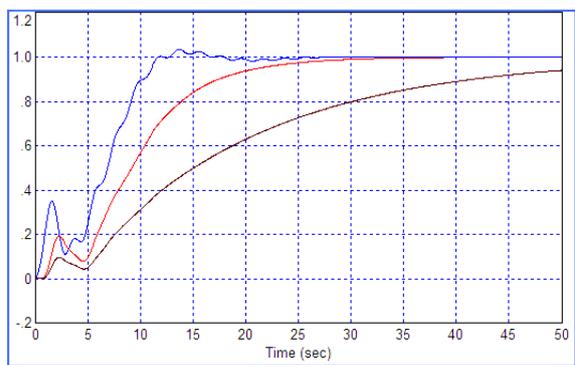


Рис. 5. Переходные процессы в системе по Рис. 4: синяя линия – с рассчитанным ПИ-регулятором, красная линия – с интегральным регулятором с коэффициентом 0,1, черная линия – интегральный регулятор с коэффициентом 0,05

2. НЕДОСТАТОК МЕТОДА

Недостаток метода состоит в том, что он эффективен лишь для улучшения качества переходного процесса при скачке задания. На Рис. 6 показан отклик системы на единичный скачок (с отрицательным знаком) помехи, включенной непосредственно на выход объекта. Для моделирования этой ситуации достаточно между выходом объекта и точкой, объединяющий отрицательные входы вычитателей на (см. Рис. 4) включить сумматор, на второй вход которого подать указанное возмущение.

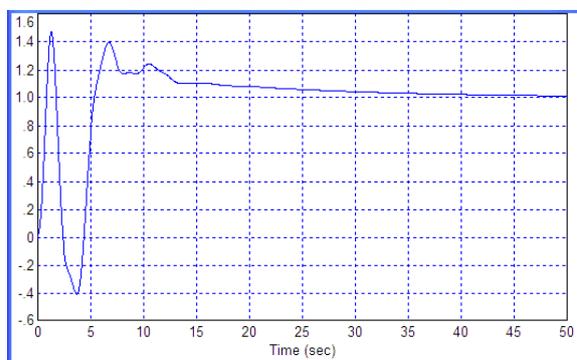


Рис. 6. Переходный процессы в системе по Рис. 4 при подаче ступенчатой помехи на выход объекта (через дополнительный сумматор)

В системах с единственным контуром управления при условии единичной обратной связи ошибка при подобном ступенчатом воздействии помехи (как функция времени) по виду полностью совпадает с ошибкой при подаче ступенчатого скачка на задание $V(t)$, поэтому авторы зачастую не осуществляют исследования вида ошибки в этом специфическом случае. Однако если в системе имеется два или более контуров, то следует учесть, что помеха приложена именно в этой точке системы, и наиболее показательной характеристикой работы системы является именно отработка помехи. Если помеху вводить через сумматор, расположенный

между выходом системы и входом первого сумматора, то отклик на такую помеху будет такой же, как отклик на Рис. 5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России по государственному заданию №2014/138, тема проекта «Новые структуры, модели и алгоритмы для прорывных методов управления техническими системами на основе наукоемких результатов интеллектуальной деятельности», проект № 471.

ЛИТЕРАТУРА (REFERENCES)

- [1] Zhmud V.A., Yadrishnikov O.D. Chislennaja optimizacija PID-reguljatorov s ispol'zovaniem detektora pravil'nosti dvizhenija v celevoj funkcii. *Avtomatika i programmaja inzhenerija*. 2013. № 1 (3). p.24–29. URL: <http://www.nips.ru/images/stories/zhournal-AIPI/3/Paper-2013-1-4.pdf> (Automatics & Software Engineering, URL: <http://jurnal.nips.ru/en/node/58>)
- [2] V.A. Zhmud, O.D. Yadrishnikov. Povyshenie kachestva perehnogo processa pri upravlenii sklonnymi k kolebanijam ob'ektami. *Avtomatika i programmaja inzhenerija*. 2013. № 3 (5). p. 12–17. URL: <http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/AIPI-3-2013-2.pdf>
- [3] V.A. Zhmud. Simulation study and optimization of closed systems of automatic control. Novosibirsk, Publishing House of the NSTU, 2012. 335 p.
- [4] V.A. Zhmud, G.A. Frantsuzova, A.S. Vostrikov. Dynamics of mechatronic systems: Proc. Manual. Novosibirsk: Publishing House of the NSTU, 2014. - 176 p. ISBN 978-5-7782-2415-5.
- [5] V.A. Zhmud, O.D. Yadrishnikov. Numerical optimization of PID-regulators using the improper moving detector in cost function. Proceedings of the 8-th International Forum on Strategic Technology 2013 (IFOST-2013), vol. II, 28 June – 1 July. Mongolian University of Science and Technology, Ulaanbaator, Mongolia. IEEE organized. 2013. P. 265 – 270. <http://www.must.edu.mn/IFOST2013/>
- [6] V.A. Zhmud, A.N. Zavorin. Method of designing energy-efficient controllers for complex objects with partially unknown model. Proc.: The control and modeling in complex systems. Proceedings of the XVI International Conference June 30 - July 3, 2014, Samara, Russia. p. 557-567. V.A. Zhmud V., L.V. Dimitrov. The providing of the power saving control of one output value with two controlling channels having different effectiveness and cost of the controlling resource. *International journal for science, technics and innovations for the industry*. 2015. IX Issue 9. ISSN 1313-0226 / Machines, Technologies, Materials. P. 50 –54. URL: <http://mech-ing.com/journal/Archive/2015/9-2015.pdf>
- [7] Nusret Tan, Derek P. Atherton. Design of PI and PID controllers. *International Journal of Systems Science*. Vol.37, No. 8, June 2006. p. 543–554.
- [8] Жмуд В.А., Трубин М.В. Регулятор с разделением «правильных» и «неправильных» движений. *Автоматика и программная инженерия*. 2015. № 1 (11). С. 57–62.



Вадим Аркадьевич Жмудь –
заведующий кафедрой
Автоматики НГТУ, профессор,
доктор технических наук.
E-mail: oao_nips@bk.ru

Reverse Overshootings Suppression in Automation Systems

VADIM ZHMUD

Abstract. The task of control of objects prone to oscillation is extremely difficult. Analytical methods in the case of a complex object models are inferior in features methods based on numerical optimization controllers. Tools of this method is a set of structures regulators, set of objective functions and tools for modeling and optimization. A number of works of the author is devoted to the author's methods of

constructing of the objective functions, their advantages and disadvantages, as well as the rationale for the choice of program VisSim for the simulation and optimization [1-6]. The most commonly used control structure - is a serial PID-controller (PID-regulator, PID) which contains proportional, integrating and derivative links. In some cases special measures for the choice of the target (cost) functions allow to suppress oscillations in the system, however, in some cases, even these measures are not effective enough. This paper discusses one of the structural methods of suppression of oscillations in systems for control of objects prone to oscillatory instability. This method is in the use of more complicated structure than conventional PID-controllers, in particular, double-loop regulator. Mathematical modeling has tested the proposed method. Transients confirming the effectiveness of this method illustrates the paper.

Key words: controller, regulator, automation, feedback, speed, accuracy, control, transients, numerical optimization

**VI. Дискуссии. Форум.
К сведению авторов.**

Содержание раздела:

- Тюнина Л.В. Встраиваемые системы управления. Специфика подготовки специалиста. Автоматика и программная инженерия 2015. № 3 (13). С. 78–79.
- В.А. Жмудь. Информационный подход к задачам метрологии и физики. Автоматика и программная инженерия 2015. № 3 (13). С. 80–109.
- Требования к публикациям в научном электронном журнале «Автоматика и программная инженерия». Автоматика и программная инженерия 2015. № 3 (13). С. 110–112.

Встраиваемые системы управления. Специфика подготовки специалиста

Тюнина Л.В.

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск

Современные системы и устройства содержат все больше встроенных модулей, управляемых программами, которые должны обеспечивать надежность и безопасность их функционирования в реальном времени.

Область применения встраиваемых систем (*embedded system*) включает:

1. Системы автоматического управления технологическими процессами.
2. Измерительные системы с функциями управления.
3. Информационные системы реального времени (банкоматы, системы резервирования, платежные терминалы, и пр.).
4. Телекоммуникационные системы.
5. Роботы.
6. Электронные устройства для автомобилей, бытовой техники, и пр.

Проектирование таких систем является комплексной задачей, и требует участия специалистов в области теории автоматического управления и АСУТП, вычислительной техники, контроллеров, микропроцессоров и программируемой логики, системотехники, прикладного программного обеспечения (ПО). Сократить время проектирования, избежать множества ошибок на стадиях реализации и внедрения и обеспечить интеграцию программно-аппаратного обеспечения на различных платформах – актуальная задача, стоящая перед разработчиками встраиваемых систем реального времени. Она усложняется тем, что для них, как правило, существуют жесткие ограничения на вычислительные ресурсы, надежность, стоимость и длительность разработки.

Перечисленные проблемы проектирования приводят к необходимости применения *CASE (Computer Aided System Engineering)* - технологий. *CASE*-технология представляет собой методологию проектирования и набор инструментальных средств, позволяющих в наглядной форме моделировать предметную область, анализировать эту модель на всех этапах разработки, использующих спецификации в виде диаграмм для описания внешних требований, связей между моделями системы, динамики поведения системы и архитектуры программных средств. Для проектирования встроенных систем существует несколько систем автоматизированного проектирования, включая и open-source системы такие, как *IBM Rational Modeler*, *OpenAmeos*, *Quantum LeapS*.

Важная и, зачастую, наиболее трудоемкая часть разработки - программное обеспечение, Специфика его создания для встраиваемого ПО в том, что границы между проектированием и реализацией размываются. Большое количество платформ для реализации встроенных систем затрудняет процесс, как их проектирования, так и переноса уже созданного ПО на новую платформу. При этом очень распространен подход, когда для разных разработок выбираются одинаковая платформа и, значит, существует возможность включения ранее разработанных программ в новые проекты.

В настоящее время можно выделить несколько методологий разработки программного обеспечения для встроенных систем и систем реального времени. Одним из самых распространенных и перспективных направлений является методология *MDD (Model Driven Design)* - проектирование, управляемое моделями [1]. Эта методология основана на создании моделей для описания функциональных требований, архитектуры и поведения проектируемой системы. Инструментом моделирования ПО является *UML* – унифицированный язык моделирования. *UML* является открытым стандартом и позволяет строить наглядные модели любой системы, документировать все этапы разработки. Суть этой методологии состоит в том, что на первом этапе строится платформо-независимая модель. Идея заключается в том, что в создаваемых моделях ПО детали технической реализации скрываются. На втором модель трансформируется в платформо-зависимую, и уже после этого генерируется программный код.

Преимущество методологии *MDD* - повышение производительности труда разработчиков, повторное использование результатов проектирования в последующих разработках, повторное использование моделей для реализации ПО на новых платформах, уменьшение трудоемкости программирования на низком уровне, хорошая документируемость проектов и т.д.

Встраиваемые системы (ВсС) продолжают расти по масштабам применения и по сложности. В связи с этим появилась потребность в специалистах, обладающих комплексными знаниями, специальными навыками и способными осуществлять совместную разработку (*Co-Design*), как аппаратного, так и программного обеспечения.

Однако, «несмотря на огромное число выпускников ВУЗов по направлениям информатики и ВТ, в области создания ВcC ощущается серьезная нехватка квалифицированных специалистов, владеющих как технологиями низкоуровневого проектирования, так и методологией, и опытом высокоуровневого, архитектурного проектирования» [1].

На кафедре Автоматики НГТУ в курсе Автоматизированное проектирование информационных систем и в курсе по введению в проектирование встраиваемых систем магистранты (ААМ) знакомятся с основами CASE и MDD - технологии. В нем они выполняют проект по моделированию встраиваемой системы управления по теме диссертационной работы, или, если это нецелесообразно, проект по индивидуальному заданию.

Цели:

- уметь применять системы автоматизированного проектирования и технологию MDD,
- помочь в работе над магистерской диссертацией, поскольку в рамках курсового проектирования нужно сформулировать постановку задачи, обосновать функциональные требования к проектируемой системе, техническое задание и пр.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] MDD - Общий обзор и концепция разработки, управляемой моделями. – Режим доступа:

<http://www.ibm.com/developerworks/ru/library/mdd/ch1/ch1.html>.

- [2] Встраиваемые системы управления, Алексей Платунов, д. т. н., профессор кафедры вычислительной техники НИУ ИТМО генеральный директор ООО «ЛМТ» Опубликовано в номере: Control Engineering Россия – Февраль 2013- Режим доступа: <http://www.controlengrussia.com/programmnye-sredstva/vstraiyaemy-e-sistemy-upravleniya>

Тюнина Людмила Васильевна – Доцент кафедры Автоматики НГТУ, к.т.н.
E-mail: sibluda@ngs.ru

Embedded Control Systems. The Specifics of Specialist Training

L.V. Tyunina

REFERENCES

- [1] MDD – Total review and concept of the development, controlled models. – URL: <http://www.ibm.com/developerworks/ru/library/mdd/ch1/ch1.html>.
- [2] Embedded control System. A Platonov: Control Engineering, Russia, February-2013. URL: <http://www.controlengrussia.com/programmnye-sredstva/vstraiyaemy-e-sistemy-upravleniya>

Tyunina Lyudmila – Assistant Professor of the Department of Automation in NSTU.
E-mail: sibluda@ngs.ru

Информационный подход к задачам метрологии и физики

В.А. Жмудь

ФГБОУ ВПО НГТУ (Новосибирск, Россия)

Аннотация: В статье обсуждается обязательность наличия источников ошибок во всех случаях измерений. На этом основании предлагается философия измерений. Дан экскурс в некоторые физические теории [1–13], не учитывающие тот факт, что любое измерение имеет инструментальные ошибки, как и ошибки метода. В предлагаемом философском подходе ошибки метода даже в том случае, когда они неизбежны. Если бы указанный подход был бы учтен, вероятно, указанные теории были бы совсем иными, или вовсе не существовали¹.

Ключевые слова: Измерения, физика, философия, теория относительности, информатика

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что всякое измерение любой физической величины осуществляется с ошибкой. Причины для возникновения ошибки много, и если какие-то причины субъективны, и от них можно избавиться путем использования более эффективной методики и инструментария, то существуют и такие погрешности, устранить которые невозможно принципиально. При решении задачи измерения всегда должна использоваться «философия измерений», то есть априорный обоснованный выбор теории процессов, которые протекают в процессе измерения.

Простейшая и идеализированная схема «измерения» видится в следующем: исходное явление наблюдается наблюдателем, на основе чего он может однозначно охарактеризовать такое явление. Даже такая схема вызывает множество нареканий.

Пример 1. Казалось бы, невозможно ошибиться в утверждениях наподобие тезисов «идет дождь» или «взошло Солнце». Но даже такие утверждения для того, чтобы быть научными, требуют оговорок. Дождь идет не везде, а лишь на ограниченной территории. Также это утверждение не столь категорически однозначно, поскольку между абсолютным

отсутствием дождя и несомненным наличием его в виде ливня может существовать множество переходных форм, к некоторым из которых можно применить утверждение о том, что невозможно однозначно сказать, идет ли дождь, или не идет, как например, для состояния «накрапывает». Также в отношении восхода Солнца, требуется увязка к определенным географическим координатам, но и это не исключает неоднозначности, поскольку на т же широте в гористой местности Солнце может уже показаться, а в низине до его восхода еще далеко. Кроме того, само утверждение о движении Солнца ошибочно, поскольку оно в сравнении с Землей неподвижно, и это вовсе не Солнце взошло, а Земля повернулась к нему другим боком. Но и Солнце нельзя назвать неподвижным. Поэтому мы приходим к такой ситуации, когда ни одно утверждение без множества оговорок невозможно признать истинным, и даже эти оговорки не всегда спасают ситуацию. Вместе с тем невозможно отказаться от измерений, от категорических утверждений, поскольку такой отказ влечет отказ от научных исследований и научных выводов, на которых строится любая теория. Поэтому для описания природы вполне уместно использовать указанные утверждения безо всяких оговорок, для научного описания необходимы оговорки, которые строятся на философии измерений.

Можно предложить более детальную схему измерения, как показано на *Рис. 1*.

Исходная измеряемая величина преобразуется средствами измерения, вследствие чего приобретает искажения. Эти искажения можно разделить на два вида: мультипликативное и аддитивное. При мультипликативном явлении искажается масштаб измеряемого явления, а при аддитивном искажении к нему добавляются величины, никак не связанные с природой измеряемого явления, называемые шумами измерения, или помехами, или возмущениями. Оба вида искажения неотделимы от результата измерения. Эти искажения отнесем к природе измерительного устройства. Каждое из таких измерений можно разделить на методические и инструментальные. Методические искажения связаны с методом измерения и не зависят от конкретного выбора измерителя. Их уменьшение возможно лишь в случае принципиально иного метода измерений. Инструментальные искажения порождаются

¹ Данная статья носит дискуссионный характер, она размещена в разделе «Дискуссии. Форум», ответственность за ее содержание и окончательную редакцию несет исключительно автор. В соответствии с декларацией о разделе «Дискуссии» аргументированные отклики на эту статью, включая отрицательные, должны размещаться в этом же разделе.

несовершенством конкретного выбранного измерителя и могут быть уменьшены, если использован более совершенный измеритель.

Далее этот результат интерпретируется исследователем на основе применяемой им теории. Если теория верна, то интерпретация вносит несущественные (пренебрежимо малые)

искажения. Если же теория ошибочна, то интерпретация может столь существенно исказить результаты, что они превысят искажения, вносимые природой измерительного устройства.

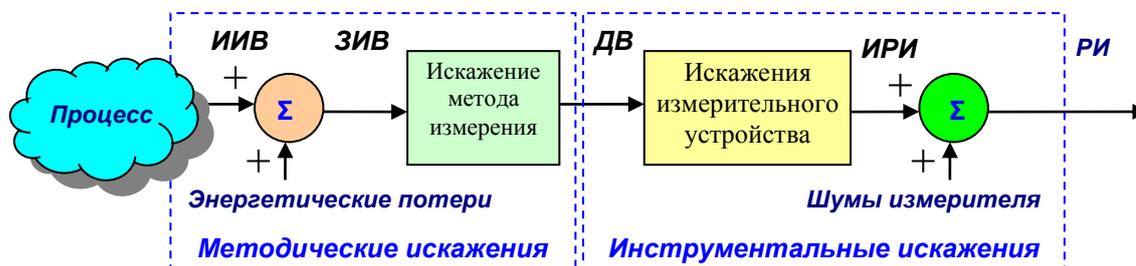


Рис. 1. Упрощенная схема процесса измерения: ИИВ – исходная измеряемая величина, ЗИВ – зашумленная измеряемая величина, ДВ – доступная для измерений величина, ИРИ – идеализированный результат измерений, РИ – результат измерений (сырой результат измерений)

Среди сказанного выше крайне важно, что методические ошибки не являются неизбежными в принципе, они неизбежны только при использовании выбранного метода измерения. Даже если они неизбежны при нынешнем состоянии развития науки, из этого не следует, что на новом этапе науке они не будут устранены или существенно снижены. Но следует отметить, что само существование методических ошибок неизбежно. Устранение одних методических ошибок может быть осуществлено отказом от данного метода измерений, но другой метод имеет свои методические ошибки, может быть, на много порядков меньше, но все же существующие.

Пример 2. Например, звуковая эхо-локация позволяет исследовать движение объекта, то есть определять его положение, скорость, ускорение, как функции времени, хотя и с некоторой погрешностью. Методическая погрешность связана в данном случае с ограниченной скоростью звука, а также с зависимостью скорости звука от состояния атмосферы. Если бы не существовало других методов измерения, кроме звуковых, эти методические погрешности можно было бы считать непреодолимыми искажениями результата. Информация о положении объекта пришла бы с запаздыванием, которое равно расстоянию до этого объекта, деленному на скорость звука.

Но, даже если бы эти искажения были непреодолимыми в процессе измерения, из этого отнюдь не следовала бы их неизбежность в окончательных результатах измерений. Дело в том, что при измерениях по схеме, показанной

на Рис. 1, получается лишь «сырой» результат измерения, но его еще следует обработать, то есть использовать для расчета исходной измеряемой величины. Было бы ошибочным полагать, что обработка результата может исключить все погрешности и ошибки, добавляющиеся в результат измерения в ходе всех измерительных операций. Но часть компонент ошибок, безусловно, можно исключить. Например, если даже использовался бы только звуковой метод измерения расстояния, но при этом точно известна скорость звука, можно было бы учесть это запаздывание, и приписать результат измерения расстояния до объекта не тому моменту времени, когда это измерение осуществлено, а предшествующему времени, которое на указанную величину задержки отличается в меньшую сторону. Соответствующая полная схема измерений показана на Рис. 2.

Безусловно, обратные преобразования, используемые для компенсации искажений метода измерения и измерительного устройства, не могут полностью исключить эти искажения, но они, по крайней мере, устраняют наиболее существенную величину этого влияния, что позволяет существенно повысить точность измерения.

Рассмотренные на Примере 2 методические погрешности могут быть исключены, если использовать оптические методы измерения расстояний и скоростей. Но в этом случае возникнут новые методические ошибки, связанные с особенностями прохождения света в среде.

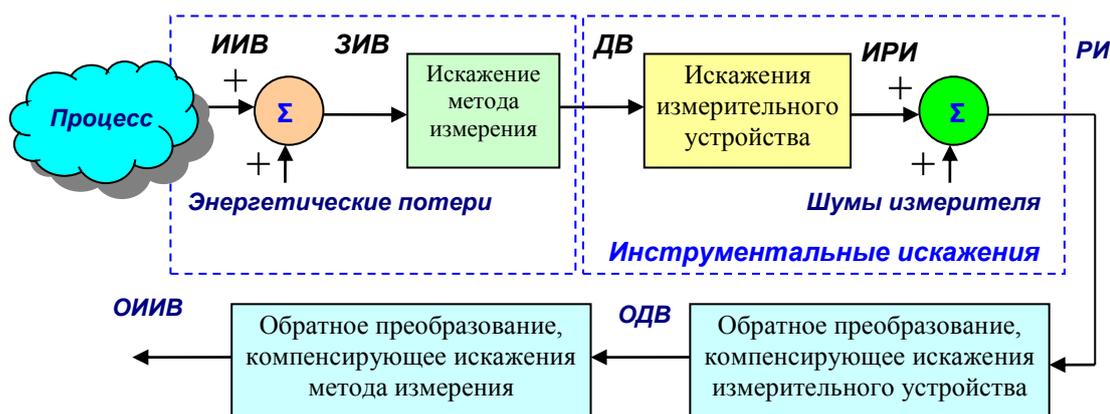


Рис. 2. Упрощенная полная схема процесса измерения: ИИВ – исходная измеряемая величина, ЗИВ – зашумленная измеряемая величина, ДВ – доступная для измерений величина, ИРИ – идеализированный результат измерений, РИ – результат измерений (сырой результат измерений), ОДВ – оценка доступной величины, ОИИВ – оценка исходной измеряемой величины

Пример 3. Может оказаться, что состояние среды не пропускает свет, но пропускает звук, например, вследствие сильного задымления. В этом случае звуковая эхо-локация даст меньше ошибки, несмотря на то, что принципиально этот метод существенно уступает по точности оптическому методу.

Пример 4. В других условиях ситуация может стать противоположной, например, звуковая локация неприемлема в вакууме, тогда как методы оптических измерений в вакууме наиболее точны.

Если на сегодняшний день оптический метод измерения видится наиболее точным и даже единственно возможным методом для ряда измерений, то это лишь является неизбежным следствием того, что современной науке не известны виды излучений, которые распространяются со скоростью, превышающей скорость света, и которые можно приспособить для измерений. Поскольку световые волны являются частным случаем электромагнитного излучения, общность данного утверждения не нарушается возможностью использования электромагнитных волн в других диапазонах частот.

Существует гипотеза о том, что гравитационные волны распространяются со скоростью равной скорости света в вакууме, или даже с более высокой скоростью. Но поскольку в настоящий момент еще не научились использовать их для точных измерений, которые могли бы составить альтернативу измерениям с помощью электромагнитных (или оптических) волн, измерения с использованием света или электромагнитных полей остается в настоящее время наиболее быстрым способом получения информации о процессах и явлениях, находящихся на расстоянии от измерителя. Вне зависимости от масштабов этого явления, является ли оно микроскопическим или макроскопическим, идет ли речь о движении галактик или о взаимодействии элементарных частиц, **ограниченность скорости света**

вносит свои ошибки в измерения, и с этим необходимо считаться.

Философия «принятия неизбежности ошибки» отличается от философии принятия результата измерения с неизбежной ошибкой как объективного. Обозначим кратко философию принятия неизбежности ошибки – «ПНО», а философию принятия результата как объективного «ПРКО».

Пример 5. Философия ПНО может утверждать: «Ни один из имеющихся у нас амперметров не может измерить ток больше 100 А ни в какой из исследуемых нами цепей». Философия ПРКО в этом случае гласит: «Ни в какой из исследуемых нами цепей ток не может быть больше 100 А».

Пример 6. Философия ПНО может утверждать: «Невозможно зафиксировать известными методами измерений движение объекта со скоростью, больше чем скорость света в вакууме». Философия ПРКО в этом случае гласит: «Невозможно движение объекта со скоростью, больше чем скорость света в вакууме».

Пример 7. При наблюдении звездного неба с Земли некоторые звезды кажутся близкими, а иные видятся далеко отстоящими друг от друга. При отсутствии других средств измерения, кроме, скажем, телескопа, ученые вынуждены были бы принимать расположение звезд только на основе их видимого с Земли положения. На сферических картах звездного неба, истинные координаты звезд искажены. Если использовать полярную систему координат с центром в центре Солнечной системы, можно сказать, что угловые координаты звезд в этом случае даны достаточно точно, но третья координата – расстояние – опускается вовсе и задается для всех звезд единой. Таким образом, все звезды как бы располагаются на некоторой сфере, центр которой находится в центре Солнца. Близкие по угловым координатам объекты видятся при таком представлении объективно близкими, хотя не являются близкими. Эта близость субъективна. Далекие по угловым

координатам звезды на самом деле могут оказаться намного ближе, чем такие «близкие». При отсутствии знаний о расстоянии до этих звезд, философия ПНО утверждала бы, что эти звезды визуально близки, а о реальной их близости судить нельзя. Если в другой системе отсчета эти звезды окажутся далекими, то это ничему не противоречит, поскольку каждая из таких систем наблюдения несовершенна, до тех пор, пока не измерятся расстояния до звезд тем или иным способом. Философия ПРКО утверждала бы, что эти звезды в нашей системе наблюдений близки объективно, и если даже в другой системе наблюдений эти звезды окажутся далекими, то оба результата наблюдений равноправны, а, следовательно, оба они истины.

Пример 8. Современные методы исследований позволяют с некоторой степенью точности определить расстояние до каждой звезды в отдельности. В этом случае вместо сферической карты звездного неба уместно строить ее трехмерную модель, где используется не только набор угловых координат, но и расстояние от Солнца до каждой звезды. В этом случае звезды, которые виделись близкими друг к другу астронавтам, использующим только телескопы, могут оказаться намного дальше друг от друга, чем другие звезды, которые виделись далекими, а на самом деле не столь далеки. Но расстояния до звезд могут быть определены и в этом случае с некоторой ошибкой. Обе философии должны были бы признать, что в рамках существующих погрешностях расстояния между звездами могут быть определены, исходя из их угловых координат и расстояния до центра Солнечной системы, то есть из полного набора трех координат в полярной системе отсчета. Философия ПНО при этом все же допускает погрешность определения каждой из указанных координат, что дает и погрешность в определении расстояний. Философия ПРКО эти погрешности игнорирует вследствие невозможности их оценить и учесть на данном конкретном этапе науки.

Примеры 7 и 8 показывают, что восприятие результата измерений с ошибкой не является объективно окончательной. При наличии дополнительных средств измерения, которыми в данном случае являются методы спектрального анализа, можно дополнить информацию об угловом положении звезд информацией о дальности до них. Тогда то, что воспринималось близким, становится далеким, а то, что воспринималось далеким, становится близким. При этом восприятие звезд в телескопе не изменилось. То есть результат измерений остался тем же самым. Но дополнился инструментарий обработки измерений. Поэтому оценка исходной измеряемой величины стала существенно отличаться от результата измерений.

Воспринимаемый результат не является объективным. Если даже в настоящий момент наука не располагает средствами для исключения искажений метода или измерительного устройства, это не означает, что она не будет располагать этими средствами в будущем. Кроме того, если имеется средство оценки указанных искажений, их компенсацию можно осуществить при обработке результата измерений. Таким образом, нет никакой необходимости принимать результат измерений за истину. В терминах Рис. 1, не следует отождествлять РИ и ИИВ. Всегда следует стремиться определить механизмы искажений измерения и компенсировать эти искажения. В терминах Рис. 2, используя РИ и все знания обо всех видах искажений, следует определить ОДВ из РИ, а затем ОИИВ из ОДВ, либо сразу ОИИВ из РИ.

Не следует отрицать принципиальную возможность других методов измерений, кроме электрических и оптических методов. В будущем они могут быть найдены. Следовательно, утверждение о том, что оптический способ измерений является наиболее точным и быстрым – столь же ошибочно, поскольку базируется лишь на современных возможностях и лишь на современном состоянии науки, техники, технологий. Широко известный «великий запрет» специальной теории относительности столь же ошибочен, поскольку его автор, Альберт Эйнштейн, не открывал новых носителей информации и не создавал новых измерительных устройств, он лишь анализировал теоретически те сведения, которые были ему известны из опубликованных экспериментов.

Экспериментальная физика и до настоящего времени не предложила методов измерений более быстрых, чем оптические. Этот факт не принципиален с позиции философии измерений. Важным является лишь то, что известные методы обладают методической погрешностью, и то, что эту методическую погрешность можно оценить и учесть, следовательно, исключить из результата измерений. Если некоторые процессы столь быстры, что исключение этой погрешности не может быть сделано надежно, из этого вовсе не следует, что необработанный результат мы обязаны принимать как единственно верный.

НЕВОЗМОЖНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ НЕ ТОЖДЕСТВЕННА НЕВОЗМОЖНОСТИ ФАКТА

Невозможность измерения величины не тождественна невозможности наличия этой величины.

Невозможность регистрации факта не тождественна невозможности факта.

Невозможность явления достижения

величиной какого-то критического значения и превышения его не тождественна невозможности достижения этой величиной этого критического значения и превышения его.

Пример 9. Возвращаясь к схеме Рис. 2, предположим, что стоит задача измерения температуры воздуха, и при этом погрешность используемого термометра намного больше, чем получаемое значение по шкале Цельсия. Например, погрешность составляет два градуса, и при этом термометр показывает ноль. В этом случае мы не можем точно сказать, положительная ли температура в данной местности, или отрицательная. Следовательно, мы не можем сказать, замерзла ли вода в мелких лужах, или не замерзла. Из этого вовсе не следует, что вода находится в двух состояниях одновременно, или ни в одном из них. Если наблюдатель будет иметь возможность взглянуть непосредственно на лужи, он сможет определить, замерзла ли в них вода, или нет, то есть определить знак температуры по шкале Цельсия. В данном случае наблюдение глазом может быть в некотором смысле точнее, чем измерение недостаточно качественным измерительным средством. Данный пример дает модель «невозможности» измерения при ограниченном инструментарии, которая при всем том не делает само явление невозможным.

Пример 10. Невозможно на данном этапе развития техники измерить скорость распространения гравитационного поля. Здравый смысл утверждает, что эта скорость ограничена. Эксперимент может лишь показать, что эта скорость не меньше, чем скорость света в вакууме. Даже это утверждение недостаточно надежно, если эта скорость на самом деле несколько ниже, эксперимент это не позволил бы выявить. Если эта скорость равна или больше, эксперимент также не может это выявить. Для простоты принято считать, что она совпадает со скоростью света в вакууме.

ПРИНЯТИЕ ГИПОТЕЗ ПРИ НЕВОЗМОЖНОСТИ НАУЧНОГО УСТАНОВЛЕНИЯ ФАКТА ОСУЩЕСТВЛЯЕТСЯ НА ОСНОВЕ ЗДРАВОВОГО СМЫСЛА (ЛОГИКИ)

Некоторые физики и не только, не зная или забыв исходную ситуацию «соглашения» о равенстве скорости распространения гравитационного поля скорости света, считают, что этот «факт» научно установлен.

На самом деле это не факт, и это не установлено научно, только лишь принято.

Можно лишь условно считать научно установленным на основе теории представление о том, что гравитационное поле распространяется в пространстве не мгновенно, а с некоторой ограниченной скоростью. Это научное положение не из чего не следует, кроме

как из «здравого смысла».

Это предположение следует из ряда предположений.

1. Предполагается, что массивные тела, удаленные друг от друга, взаимодействуют друг с другом не непосредственно, а посредством гравитационного поля.

2. Предполагается, что поле является волной.

3. Предположительно поле распространяется в некоторой среде². Эта среда и является носителем взаимодействия. По сути каждое из тел взаимодействует с полем, а через это поле – с другим телом.

a. Взаимодействие «объект – поле – другой объект» является притяжением двух объектов друг к другу.

b. Взаимодействие «объект – поле – этот же объект» является взаимодействием, обеспечивающим инерционность этого объекта.

4. Поля не взаимодействуют друг с другом.

5. В плане гравитационного взаимодействия, тела непосредственно не взаимодействуют друг с другом, а только посредством поля. В случае соприкосновений, непосредственных или опосредованных, взаимодействие имеется, но этот вид взаимодействия – не является гравитационным взаимодействием.

Указанные научные положения могут опираться лишь на логику, на здравый смысл, на индукцию. Индукция – это метод научной интуиции, который позволяет формировать и выдвигать гипотезу, но не является доказательством.

Для того чтобы метод индукции был доказательством, требуется, чтобы было доказано следующее:

1. Индукция распространяется по одному из выбранных параметров, например, утверждение для объекта с конкретной массой распространяется на объекты с большей (или с меньшей) массой.

2. Справедливость утверждения для произвольного значения параметра является достаточным условием справедливости этого

² Релятивисты считают, что гравитационная волна распространяется не в веществе и не в пространстве, а в некоторой инерциальной системе отсчета, которая может иметь место лишь там, где ее можно хотя бы с чем-то связать. Этим чем-то должно быть «массивное тело» - то есть тело, настолько более массивное, чем остальные тела, что массой остальных тел можно пренебречь в сравнении с его массой. Впрочем, Эйнштейн указывал, что среда, которую он даже называл «эфир», все же существует в том смысле, что она является носителем полей – гравитационного и электромагнитного. Он отрицал наличие среды лишь в том смысле, что ей нельзя (по его мнению) приписать какое-либо конкретное значение скорости. Также он полагал, что движение среды невозможно отличить от покоя никакими путями, в том числе и опытами со светом и с гравитацией. Этот вывод основан лишь на опыте Майкельсона, то есть на опыте со светом. Опытов с гравитацией с целью отличить покой от движения никто не ставил.

утверждения и для большего (или меньшего) значения этого параметра.

3. Доказана справедливость утверждения для стартового параметра.

Таким образом, видим, что метод математической индукции, который широко применяется в математике для доказательств свойств рядов, практически невозможно применять в физике, поскольку он чрезвычайно сложен в формулировках, требует большой строгости, которую невозможно обеспечить на практике.

Поэтому в физике очень часто действует правило: «Мы принимаем этот тезис как аксиому лишь потому, что иначе мы не можем рассуждать дальше, мы делаем это даже в том случае, когда имеются основания доказательно опровергнуть этот тезис».

В математике действует несколько иное правило: «Мы принимаем это за аксиому, поскольку это несомненно на интуитивном уровне, и без этого мы не можем далее рассуждать; мы точно знаем, что это так, и нет никакой возможности опровергнуть это положение теоретически».

Пример 11. Например, в математике принимается за аксиому тезис, что две параллельные прямые могут быть продлены сколь угодно далеко, но никогда не пересекутся. Некоторые философы считают, что бесконечные прямые пересекаются «в бесконечности», но это представление приходит из геометрии криволинейных или многомерных пространств, оно никоим образом не вяжется с евклидовой геометрией.

Пример 12. В физике считают, что процесс осреднения по множеству измерений с разными инструментами (усреднение по ансамблю) во многих случаях тождественен процессу усреднения по времени с единственным инструментом. Под инструментом может подразумеваться измеритель, генератор и так далее. На самом деле можно строго показать, что это далеко не одно и то же почти для любой ситуации. Однако, такая гипотеза зачастую используется, ансамблю приписывается свойство «эргодичности», которое в том и состоит, что эти два вида усреднения тождественны. Утверждение о том, что ансамблю присуще свойство эргодичности основано на необходимости: нет никакой возможности создания ансамбля генераторов или измерителей в количестве, достаточном для статистической достоверности. Зато имеется возможность длительного эксперимента с единственным инструментом. Эргодичность выгодна, поэтому она принимается без доказательства.

ОБЪЕКТИВНОСТЬ РАССТОЯНИЙ И ВРЕМЕНИ В ФИЛОСОФИИ ИЗМЕРЕНИЙ

Философия измерений и здравый смысл

подсказывают, что не только излишне большая погрешность измерения, но даже принципиальная невозможность измерения какой-то величины не делает саму эту величину невозможной. В частности, невозможность объективно установить, какая из звезд ближе к другой, а какая дальше, является лишь субъективной проблемой экспериментатора, но при научном подходе данный экспериментатор должен был бы признать, что объективно ответ на этот вопрос единственный.

Пример 13. Расстояние между звездами объективно существует и не зависит от возможности его измерения каким бы то ни было исследователем. Любые три звезды в пространстве могут располагаться лишь так, что расстояние между любой парой объективно, не зависит от направления измерений, и может быть выражено в любых единицах расстояния каким-то конкретным числом. Никакого философского значения не имеет тот факт, имеется ли способ определения этого числа, или не имеется, в любом случае это число существует, оно единственно для данного момента времени. Следовательно, для любого момента времени для любых трех звезд можно составить соотносить эти расстояния, указав, которое из них больше, а которое меньше, либо равно. Невозможность объективно измерить эти расстояния, как и невозможность объективно составить неравенство, не доказывает отсутствия объективного значения этих расстояний и отсутствие объективного соотношения этих расстояний.

Философия материализма утверждает, что материя существует объективно, то есть не зависимо от сознания любых наблюдателей. Это же следует отнести и к любому свойству материи, включая расстояния между ее крупными скоплениями.

Невозможность объективного измерения расстояний не делает неизбежным отказ от признания объективно единственной величины расстояния для каждого момента времени.

Говоря о расстоянии или о любой физической величине, которая может изменяться, мы вынуждены говорить и о времени, к которому следует привязать данное измерение. Поэтому признание объективности существования времени как такового, не зависимо от того, можем ли мы его измерить объективно, или не можем, является основой правильного философского подхода.

Невозможность объективного измерения времени не делает неизбежным отказ от признания объективно единой шкалы времени. Время не зависит от пространства. Время не зависит от скорости объекта или системы.

Ход часов может зависеть от движений.

Если часы основаны на использовании силы гравитации, например, песочные, или ходики, то

в невесомости такие часы остановятся.

**Из остановки часов отнюдь не следует
остановка хода времени.**

Кажется, нет необходимости доказывать, что в невесомости песочные часы остановятся, но время в невесомости продолжает свое течение, все другие процессы, кроме движения под действием гравитационных сил, продолжают. В том числе, происходят химические процессы, развиваются процессы движений взаимодействующих тел, идут процессы старения биологических объектов. Часы – это всего лишь инструмент.

В другой ситуации часы могут продолжать идти точно, но поскольку их показание наблюдатель получает с задержкой, порождаемой движением этого наблюдателя относительно часов, то эта задержка может изменяться во времени. Если наблюдатель от часов удаляется, у него сложится ощущение, что часы замедляют свой ход, поскольку задержка поступления показаний будет расти по мере удаления часов. Если часы приближаются, у наблюдателя сложится впечатление, что часы ускоряются, поскольку задержка будет уменьшаться.

Пример 14. Пусть часы сначала покоились вблизи наблюдателя, потом стали удаляться с большой скоростью, затем остановились и стали приближаться с большой скоростью, после чего опять остановились вблизи наблюдателя. При этом у наблюдателя оставалась другая копия часов. Предположим, что физические процессы (ускорение, торможение) не оказывали никакого влияния на ход часов, совершающих движение. Это предположение не имеет достаточных оснований, но для «мысленного эксперимента» вполне допустимо. В начале эксперимента наблюдатель получал информацию по показаниям часов без задержки, поэтому их ход совпадал с ходом его контрольных часов. Далее по мере их удаления появилась нарастающая задержка. Поэтому наблюдателю казалось, что удаляющиеся часы замедлили свой ход. Если бы он учел расстояние до часов, например, зная программу их перемещения, он смог бы вычислить их истинный ход, и нашел бы, что часы по-прежнему исправны и идут синхронно с контрольными часами. По мере приближения часов задержка получения информации об их показаниях уменьшалась, поэтому наблюдателю должно показаться, что ход часов ускоряется, но, если бы он вносил соответствующие поправки, он опять бы нашел, что часы идут синхронно с контрольными. Наконец, когда часы приблизились, их информация об их показаниях снова стала полностью совпадать с показанием контрольных часов. Если бы наблюдатель вносил поправку на дальность, эта поправка в этом случае стала бы нулевой, поэтому вычисленные показания также совпали бы с показаниями контрольных часов. Никакого

парадокса во всем этом мысленном эксперименте нет. Поэтому данный мысленный эксперимент демонстрирует, что при удалении двух систем в каждой из них время другой системы воспринимается как замедляющееся, при их приближении в каждой из них время в другой системе воспринимается как ускоряющееся. Учет методических погрешностей дает основание восстановить в правах универсальный характер времени во всей вселенной.

Пример 15. Известный из литературы по теории относительности «парадокс близнецов» имеет дело с мысленной ситуацией, где вместо вторых часов используется брат-близнец наблюдателя, остающегося в покоящейся системе, а скорость движения второго близнеца соизмерима со скоростью света, например, равна ее половине. При этом сам эксперимент длится несколько десятков лет. Трактовка этого мысленного эксперимента теоретиками теории относительности такова. Покоящийся близнец будет стариться, поскольку время в его системе течет тем же темпом.

ФИЛОСОФИЯ ОДНОВРЕМЕННОСТИ

Одновременность событий – это тоже свойство, описывающее процессы в материи. Поэтому невозможность определить одновременность или неодновременность событий на удалении, никак не влияет на то, одновременны ли эти события, или не одновременны, произошло ли одно из них раньше, или позже.

В теории относительности утверждается, что одновременность может быть объективна лишь по отношению к объектам, находящимся на крайн малом расстоянии и покоящимися в одной и той же системе. Иными словами, эти объекты составляют части единого целого. Во всех остальных случаях одновременность может быть подвергнута сомнению, и даже больше: всегда можно так выбрать систему отсчета, чтобы одновременные события на расстоянии друг от друга стали неодновременными. Коль скоро в одном случае события А и Б можно считать одновременными, и при этом можно выбрать новую систему отсчета так, чтобы событие А стало опережать событие Б, то можно выбрать и другую систему отсчета так, чтобы событие Б стало бы опережать событие А. То есть любые два события, близкие по времени, но далекие по расстоянию, могут быть в зависимости от выбора системы отсчета выстраиваться по произвольному «хронологическому» порядку. Декларируется некоторый произвол результата.

Одно событие может быть причиной другого. При принятии теории относительности причинно-следственную связь можно нарушить путем выбора системы отсчета. Это парадокс. Парадокс следует исключить. Единственный

путь исключения этого парадокса – признание инвариантности и независимости времени.

Время, не зависимо от системы отсчета, имеет универсальный инвариантный характер.

ВЛИЯНИЕ НАСЫЩЕНИЯ ПРЕОБРАЗУЮЩЕЙ ФУНКЦИИ

Если в схеме, показанной на *Рис. 2*, какое-либо преобразование хотя бы в одном из элементов является математической функцией, вносящей большие искажения, из этого отнюдь следует, что выводы о значении ИИВ могут быть крайне неверны и необъективны. Искажение может быть столь сильным, что выводы могут быть неоднозначными, или даже кардинально ошибочными. Но сколь бы ни были сильными искажения, согласно философии информационного подхода, при получении парадоксального результата расчета ИИВ более правильно было бы объяснить парадоксальность этими большими искажениями и снять ее, нежели принять ее как таковую.

Пример 16. Функция, преобразующая ИИВ в ДВ, может иметь насыщение. В этом случае при росте входной величины ИИФ, начиная с некоторого порогового значения, доступная величина ДВ не будет расти, а будет оставаться неизменной. В этом случае из анализа этого результата можно сделать ошибочный вывод, что ИИВ не изменяется. Но гораздо логичнее такого вывода не делать, если имеются основания для того, чтобы указать на такую особенность данной функции.

Пример 17. Продолжая рассуждения Примера 16, в частности, если допустить, что скорость частицы превышает скорость света, и досконально проанализировать механизм получения информации о такой частице, получится, что результат измерения скорости этой частицы все равно будет указывать на скорость, которая не превышает скорость света. Если элементарная частица будет удаляться от детектора даже с бесконечной скоростью, результат измерения ее скорости покажет скорость, равную скорости света. Если описывать математикой подобные методы измерений, такая математика неизбежно будет указывать на невозможность получения информации из природы со скоростью больше, чем скорость света, либо эта математика будет ошибочной, поскольку не будет соответствовать эксперименту. Поэтому неизбежно получение формул, из которых следует невозможность материальному телу двигаться быстрее, чем со скоростью света в вакууме. Но эта неизбежность этих формул следует лишь из методов эксперимента, то есть она сама является методической ошибкой. Не следует ее считать неотъемлемым свойством природы, это лишь неотъемлемое свойство методов

измерений.

Философия ПРКО предполагает принятие результата за истину. Измерение по философии ПРКО соответствует схеме по *Рис. 1*. В терминах этой схемы, если ИИВ – это скорость частицы, и если она больше скорости света, то ДВ – это доступный результат измерения скорости даже в случае идеального измерителя. Эта величина никогда не превысит скорость света. Следовательно, эксперимент по схеме *Рис. 1* будет всегда подтверждать гипотезу том, что скорость частицы не может превысить скорость света.

При измерении по схеме *Рис. 2* можно допустить, что скорость частицы превышает скорость света.

При взаимодействии двух или более заряженных частиц, движение первой частицы воспринимается всеми остальными частицами именно по схеме *Рис. 1*. Поэтому элементарные частицы при взаимодействии друг с другом ведут себя так, как если бы ни одна из них не превышала скорости света.

Таким образом, как бы ни казалось примитивным рассуждение о том, что любому инструменту присущи инструментальные погрешности, обсуждение тонкостей таких измерений не перестало быть актуальным вследствие ошибок, допущенных в толковании классических «решающих экспериментов». Поэтому на основе анализа многих ошибок, которые нередко допускаются при интерпретации результатов измерений, следует признать, что философия измерений крайне важна. В некоторых разделах естествознания наблюдается пренебрежение этой философией, что глубоко ошибочно. Это приводит к парадоксальным выводам.

ПАРАДОКСЫ В ФИЗИКЕ

В отношении парадоксов также сложилась необъяснимая и недопустимая терпимость к их существованию. Само существование этой терпимости стало возможным лишь вследствие отсутствия философии измерений, что привело к ложным выводам, а принятие этих выводов создало парадоксы, которые авторы экспериментов и остальные интерпретаторы не смогли разрешить. На наш взгляд единственным разрешением парадокса является его устранение. Если два утверждения совместно не могут быть истинными, то наука должна опровергнуть хотя бы одно из них, причем руководствоваться не случайным выбором, а научной методикой поиска истины. Опровержение необходимо потому, что парадокс однозначно указывает на несовместность, по меньшей мере, одного из положений, которые привели к парадоксу, либо, по меньшей мере, одного из логических построений, которые использовались в переходе от положений к парадоксальному выводу. Для

единства терминологии методике таких логических построений также назовем «положением» и присоединим к исходным положениям как таковым.

Следовательно, опровержение одного из положений, лежащих в основе парадокса, также необходимо, как, например, необходимо исправление любой очевидной ошибки, опечатки.

Пример 17. Пусть имеется парадоксальный результат при подсчете общего количества орехов, про которые известно, свидетель № 1 поклялся, что в первом мешке 100 орехов, свидетель № 2 поклялся, что во втором мешке 100 орехов, свидетель № 3 поклялся, что в третьем мешке 50 орехов, и свидетель № 4 поклялся, что общее число орехов равно 200. Логика предполагает, что общее число орехов равно сумме числа орехов, которые лежат в каждом мешке. Получаем $100 + 100 + 50 = 250$. Двести пятьдесят не равно двумстам. Но как быть, если каждое из утверждений «подтверждено с клятвой на Библии», и мы не имеем права не доверять ни одному из них. Казалось бы, парадокс не разрешим. Мы просто обязаны опровергнуть кого-либо из «свидетелей». В трудах Альберта Эйнштейна найден метод, согласно которому следовало бы объявить этот парадокс «кажущимся», поскольку каждое из «научных» утверждений не подлежит сомнению, и если все правы, то так оно и есть, и больше тут не о чем рассуждать. В данной задаче кажется, что невозможно предложить решение, которое бы признавало правоту всех четырех свидетелей, поэтому кого-то надо признать лжецом.

Оказывается, что парадокс не является парадоксом, просто часть информации не сообщена в условиях задачи, и при ее анализе мы не догадались допустить такую возможность. Оценка этого парадокса изменится, если в явном виде добавить оговорку, что не исключается, что какие-то мешки вложены друг в друга. Тогда можно предложить решение этой задачи. Например, третий мешок вложен во второй, внутри второго мешка, но вне третьего лежит 50 орехов. Итого, в мешке № 1 те же 100 орехов, в мешке № 2 лежат 50 орехов непосредственно, и еще там же мешок № 3, в котором лежат 50 орехов. Итого в мешке № 2 лежит 100 орехов. Общее число орехов – 100, поскольку те орехи, которые лежат в третьем мешке, уже учтены в общем количестве орехов, лежащих во втором мешке. Все свидетели правы. Общее количество верное, и количество орехов в каждом мешке тоже верное. Никакого парадокса нет.

Парадоксы – это инструментальный мысленных экспериментов. В мысленном эксперименте, где невозможно доказать истинность ни одной из набора гипотез, порой удается обнаружить ложность всех других взаимоисключающих гипотез. Допустим,

имеется лишь два взаимоисключающих предположения, назовем такой полный набор возможных гипотез дилеммой. Доказательство ложности одной из дилемм является доказательством истинности другой дилеммы. А ложность следует из парадокса. Поэтому для доказательства на основе проверяемой дилеммы путем рассуждения получаются выводы. Если эти выводы не противоречивы, то мысленный эксперимент не дает новых знаний, поскольку это не доказывает, но и не опровергает истинности ни одной из дилемм. Если же в выводах присутствует парадокс, то следует опровергнуть исходную дилемму, которая привела к парадоксу. Дилемма, возможно, сама состоит из нескольких гипотез, также ошибочным может оказаться метод выведения следствия. Если же он не вызывает сомнений, и если среди гипотез, входящих в дилемму, лишь одна сомнительна, то парадокс является опровержением именно её. В этом и только в этом случае мысленный эксперимент имеет ценность применительно к решаемому вопросу. Если же парадокс не используется как основание для отказа от ложной дилеммы, то следует признать мысленный эксперимент бесполезным, а его автора непоследовательным.

Пример 18. «Мысленный эксперимент Галилея». Галилей решал вопрос, увеличится ли скорость падения тела в вакууме, если его массу увеличить. Эти рассуждения приведены к термину «ускорение свободного падения». Известно, что при падении тела его движение замедляется сопротивлением воздуха, поэтому с одной и той же высоты одни тела падают быстрее, чем другие. Опыт показывает, что при одинаковой форме более тяжелые тела падают все же несколько быстрее. Галилей решил понять, что было бы, если бы не было сопротивления воздуха. Дилемма, таким образом, состоит в том, что увеличение массы тела либо приводит к изменению ускорения свободного падения, либо не приводит к такому изменению. Ставится вопрос о том, как будет падать связка из тяжелого и более легкого тел. Для определенности можно предположить, что более тяжелое тело падает быстрее, а более легкое – медленнее. Если это так, то при связке легкого тела с тяжелым, легкое тело оно должно стремиться тормозить падение более тяжелого тела. Тогда большее тело должно замедлиться. С другой стороны, при связывании, общая масса возрастет, следовательно, новое более тяжелое тело должно падать быстрее, поэтому более тяжелое тело должно еще более ускориться вследствие привязывания к нему более легкого тела. Получается, что, в результате верного рассуждения, исходя из принятой посылки, получены два взаимно исключающих результата: подвязывание к тяжелому телу более легкого должно одновременно замедлить и ускорить падение более тяжелого тела.

Формально можно было бы предположить и то, что с ростом массы ускорение падения уменьшается, но аналогичные рассуждения привели бы к аналогичному парадоксу. Лишь предположение о том, что масса не влияет на ускорение свободного падения, не дает парадоксального результата. Действительно, в этом случае связывание любых тел не должно изменить этого ускорения, что уже не является парадоксом. По этой причине (а вовсе не из экспериментов со сбрасыванием разных шариков с пизанской башни) Галилей сделал вывод, что в вакууме все тела падают вблизи поверхности Земли с одинаковым ускорением. Этот вывод до сих пор остается верным, поскольку он сделан на основе безупречной логики. Даже зная о том, что в различных местах поверхности Земли это ускорение разное, мы можем лишь добавить этот факт к теории, но он никак не опровергает общий закон о том, что в любой точке гравитационного поля ускорение тела не зависит от массы. Сказанное справедливо, конечно же, при условии, что размеры тела пренебрежимо малы в сравнении с расстояниями, на которых изменение гравитационного поля существенно для решения этой задачи.

Вывод 1. Любой парадокс должен быть использован для опровержения хотя бы одной исходной посылки, либо метода выведения следствия.

Пример 17. Может ли быть, чтобы от «А» до «Б» было одно расстояние, а от «Б» до «А» - другое? Очевидный ответ отрицателен. Но утверждается, что от понедельника до среды два дня, а от среды до понедельника – пять дней. Здесь при рассуждении допущен ряд огрехов. Во-первых, «расстоянием» называется время между событиями, трактуемое как расстояние между объектами. Во-вторых, понятие дня недели используется и как абстрактное, и как конкретное. Вследствие первого огреха принимается как очевидное, что время может двигаться лишь в одном направлении. Это справедливо для времени, но это не справедливо для расстояния. Из второго огреха один из конкретных понедельников подменяется другим конкретным понедельником. В первом случае речь идет о понедельнике, предшествующем среде, во втором – о понедельнике, следующим за средой. Естественно, что это разные понедельники. Правильно бы вопрос был поставлен так: «Может ли быть, чтобы расстояние от одного объекта типа «А» до объекта типа «Б» не совпадало с расстоянием от объекта типа «Б» до другого объекта типа «А»?» Естественный ответ: «может». Время от одного понедельника до какой-то среды может быть другим, чем время от этой самой среды до другого понедельника. Если же в решении этой задачи рассуждать корректно, то следует учесть, что объектом «А» был назван некий понедельник, предшествующий среде, а

впоследствии это понятие подменено другим понедельником, следующим за этой средой. Если вернуться к исходному объекту «А», то до него – те же самые два дня, только их отсчитывать надо в обратном направлении. Тогда условие задачи звучит так: «Возможно ли, чтобы от «А» до «Б» было расстояние «L», а от «Б» до «А» оно было бы равным «минус L»?» Ответ очевиден: «да, возможно, поскольку знак указывает направление, а величина остается той же самой». И, наконец, если бы в условиях задачи было бы оговорено, что «расстоянием» называется не кратчайшее расстояние, а то расстояние, которое возможно преодолеть вследствие естественных ограничений (в данном случае ограничением является невозможность движения во времени в обратную сторону), то оказывается, что даже положительный ответ не было бы парадоксальным. Подобная ситуация не будет парадоксальной не только в отношении дней недели, но она также не будет парадоксальной в отношении, например, географических пунктов, или районов города. Окажется возможным, что от одного городского адреса до другого расстояние больше, чем расстояние обратно, если отсчитывать его по показанию спидометра такси, которое едет с соблюдением всех дорожных правил. Действительно, если от «А» до «Б» имеется короткая дорога с односторонним движением, а обратной дороги столь же короткой нет, а под расстоянием подразумевается длина пути, который можно проделать в соответствии с правилами движения, то при таких оговорках расстояние от «А» до «Б» может отличаться от расстояния от «Б» до «А».

Вывод 2. Может оказаться, что парадокс возникает от неверного использования терминов. На разных этапах рассуждения одними и теми же терминами называют, по сути, разные явления или предметы. Наведя порядок в терминологии, мы бы избавились от парадокса.

Пример 18 (из практики). В электрической схеме имеются точки А, В, С. Напряжение между точками А и В равно $U_{AB} = 2,5 \text{ V}$, напряжение между точками В и С равно $U_{BC} = 3,4 \text{ V}$, напряжение между точками С и А равно $U_{AC} = - 3,8 \text{ V}$. Парадокс состоит в нарушении Закона Ома, который гласит, что сумма всех напряжений в замкнутой цепи равна нулю. Должно быть: $U_{AB} + U_{BC} + U_{CA} = 0$. **Решение парадокса состоит в обращении к инструментарию, которым были сделаны измерения.** Оказывается, указанные точки электрической схемы принадлежат устройству, содержащему активные элементы и обратные связи (сверхвысокочастотные транзисторы), и при этом измерения производились осциллографом. При измерениях щуп осциллографа подключается к точке, на которой осуществляется измерения. Подключение щупа

вносит изменения в схему, даже притом, что в сам щуп уходит пренебрежимо малый ток. Хотя входное сопротивление щупа велико, то есть его проводимость мала и он, казалось бы, не должен влиять на работу схемы, все же его емкость достаточно велика для высоких частот, она составляет около 1 pF, поэтому она может оказать существенное влияние на работу схемы. А именно: одна из точек соединена с затвором полевого СВЧ транзистора. Без щупа в этой точке в системе происходит генерация СВЧ колебаний, которые вследствие ограничений их формы приводят к смещению рабочей точки по постоянному току, что вызывает изменение потенциала на выходе транзистора. При подключении щупа генерация прекращается, что изменяет потенциал на выходе транзистора. Данный пример демонстрирует тот факт, что само действие измерения может весьма существенно повлиять на процесс, что приведет к весьма большой разнице между истинным значением измеряемой величины при отсутствии измерителя и ее фактическим (а также ее измеренным) значением при использовании измерителя.

Вывод 3. Процесс измерения может кардинально повлиять на исследуемый процесс.

ИНВАЗИВНОЕ И НЕИНВАЗИВНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ

Если само измерение может вносить кардинальные изменения в исследуемый процесс, следует теоретически оценить возможный уровень этого влияния и минимизировать его до величины, которую можно учесть, либо которой можно пренебречь. В этом действии необходим априорный научный подход, что подпадает под определение «Философия измерений». Рассмотрим два крайних примера.

Пример 19. Явное вмешательство в процесс при измерении. Инвазивное измерение. Пусть осуществляется распределение слабого электростатического поля. Очевидно, щуп вносит изменения в это распределение. Измеряется поле, с которым щуп приходит в непосредственный контакт, и на которое может непосредственно влиять. Доказать влияние щупа можно на основе простого соображения: если использовать множество щупов, результат заведомо будет отличаться от результата с использованием единственного щупа. Следовательно, даже если влияние одного щупа неощутимо, то влияние достаточно большого количества щупов (ста, тысячи и так далее) будет ощутимым.

Пример 20. Явное невмешательство в процесс при измерении. Неинвазивное измерение. Пусть осуществляется оптическое наблюдение астрономических процессов. Сам факт фиксирования оптического поля от

излучения этих объектов не может никак повлиять на состояние этих объектов. При этом не отвергается, что фиксирование света на светочувствительном приемнике, естественно, влияет на дальнейший ход света, и на электромагнитное поле вокруг приемника (поскольку свет является электромагнитным полем). То есть фотоприемник влияет на свет, но он не влияет в данном случае на источник света. Измерение света может внести возмущение в процесс распространения света, но оно не может изменить что-либо в процессах его излучения, которое произошло далеко по расстоянию и давно по времени. Измеряются особенности приходящего издалека излучения от звезды, на которое измеритель влиять не может. Если вместо одного телескопа использовать сто, тысячу телескопов, все равно ни один из них не будет влиять на остальные (если не будет непосредственно перекрывать свет), и никакое количество этих телескопов не приведет к изменениям в самом объекте (каковым является звезда).

Пример 21. Определение пола некоторых птиц. В некоторых случаях определить пол можно лишь путем вскрытия. Хотя после вскрытия пол у птицы не изменится, она перестает быть живой птицей, то есть объект как таковой разрушается, уничтожается вследствие его изучения.

Пример 22. У некоторых других видов птиц пол можно определить достаточно легко просто по виду и раскраске оперения. Такой вид «измерения» никак не может сказаться на дальнейшей судьбе этих объектов исследования. В этом принципиальное отличие инвазивных и неинвазивных методов.

Поэтому измерения можно разделить на инвазивные, как в первом случае и неинвазивные.

Пример 23. Ветеринар для того, чтобы понять, жив ли некий кот в клетке, или не жив, попросту бросает на него свой взгляд. Предоставляем читателю сделать вывод о том, является ли такой метод инвазивным или не является. Не спешите с выводом. Неискушенный читатель скажет, что этот метод неинвазивный. Читатели, прошедшие курс квантовой физики, узнают в этом примере знаменитого «Кота Шрёдингера», про которого утверждается, что достаточно просто посмотреть на него, чтобы узнать, жив он или мертв, чтобы кардинальным образом изменить его состояние, а именно: до того, как на него смотрели, он был частично жив, и частично мертв, а после такого взгляда он примет лишь одно определенное и окончательное состояние. Судите сами, насколько «научно» такое утверждение по дальнейшим рассуждениям.

На подмене неинвазивного наблюдения инвазивным основан широко известный парадокс «Кота Шрёдингера». Псевдонаучные дискуссии около этого парадокса были бы

смешны, если бы не приводили к дальнейшему уходу науки и научных подходов из области теоретической физики. Поэтому целесообразно рассмотреть эти аспекты несколько глубже.

Наряду с определенно инвазивными и определенно неинвазивными методами можно выделить частично инвазивные методы, находящиеся на грани тех и других. Например, для измерения температуры воды в кастрюле в нее помещается термометр. Естественно, что он имеет изначально иную температуру, поэтому в процессе измерения осуществляется уравнивание температуры воды и термометра. Если вода горячей, она отдает часть тепла термометру и поэтому становится чуть-чуть холодней, если же она холодней, то термометр отдает ей часть своего тепла и вода становится чуть-чуть теплей. В данном случае операция измерения вносит тепловое возмущение в процесс, но не изменяет его

качественного состояния. Но вернемся к крайним случаям.

В неинвазивном измерении, как и в любом другом измерении, конечно, присутствуют погрешности измерений. Но они не фатальны, в том смысле, что само действие по измерению не изменяет исследуемый процесс. Из исследуемого процесса изымается и используется та энергия, которая и без измерения была бы потеряна процессом, эта энергия берется тогда, когда она утратила связь с самим процессом. На схеме Рис. 3 показана схема процесса явного инвазивного измерения. Процесс измерения воздействует на исходную измеряемую величину так, что явным образом изменяет ее значение. Это изменение даже может быть фатальным, что означает, что изменение этой величины до начального значения невозможно, или крайне маловероятно.

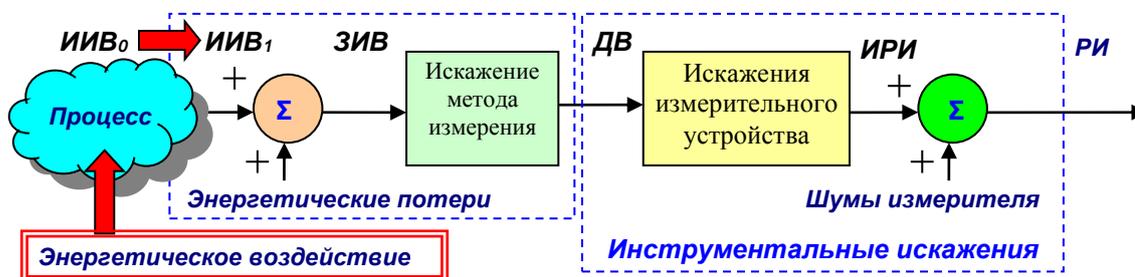


Рис. 3. Упрощенная схема процесса явного инвазивного измерения: IIV_0 – исходная измеряемая величина, IIV_1 – значении исходной измеряемой величины после энергетического воздействия на нее вследствие процесса измерения

В инвазивном измерении для действия измерения из исследуемого процесса изымается энергия (или масса), которая не была бы изъята, если бы не осуществлялось действие по измерению. Это является принципиальным отличием. При этом, естественно, действие по измерению окажет влияние на процесс. Оно может оказаться малым или большим, оно может оказаться и определяющим, в том числе фатальным. Поэтому назовем фатальным такой подвид инвазивного измерения, при котором само действие измерения кардинально влияет на результат, то есть вносит такое изменение в процесс, которым никак нельзя пренебречь, изменяет ситуацию не количественно, а качественно.

Пример 24. Проверка тока, при котором перегорает плавкий предохранитель, состоит в том, что на предохранитель подается увеличивающийся ток до тех пор, пока предохранитель не сгорит.

Пример 25. В сумерках для того, чтобы узнать, застеклено ли окно, в оконный проем кидается камень: если он пролетел через проем, окно не было застеклено, если же стекло разбилось, то оно было застеклено.

Действие измерения в обоих случаях оказало фатальное влияние на процесс, который

исследовался, после этого измерения он пойдет по такому пути, по которому он не пошел бы, если бы измерения не было. В этом и состоит фатальность измерения. Фатальность не обязательно связана с разрушением, она может быть и созидательной, например, если мы не уверены, что в емкости имеется достаточное количество воды, и попросту доливаем ее до тех пор, пока не увидим водную поверхность. По количеству долитой воды мы можем узнать, сколько ее было изначально, но после такого действия емкость будет полностью заполнена, что явилось результатом такого измерения и уже не зависит от состояния емкости до начала измерения.

В данной классификации не играет роли тот факт, сколько вещества или энергии используется при измерении, а играет роль лишь то, как это действие по изъятию или добавлению энергии и (или) вещества влияет на сам исследуемый процесс.

Пример 26. Если осуществлять подсчет количества яиц определенного вида птиц на заданной территории простым визуальным наблюдением с достаточного расстояния, то яйца останутся в гнезде, и такой подсчет не окажет влияние на дальнейшее количество вылупившихся птенцов.

Пример 27. Если же изымать яйца из гнезда, не возвращая их обратно, то понятно, что такой способ подсчета окажет фатальное влияние на количество вылупившихся птенцов.

Но не все так просто, можно привести пример, когда изъятие яиц не фатально, а оптическое наблюдение фатально.

Пример 28. Если яйца домашней курицы можно вытащить, взвесить, и положить обратно, если наседка позволяет это делать и будет продолжать их высиживать, то даже полное изъятие всей массы яиц (временное) не является фатальным, можно говорить о неинвазивном измерении, процесс подсчета яиц не влияет на их дальнейшую судьбу.

Пример 29. Если же неаккуратно осуществлять простой «бесконтактный» осмотр яиц какой-либо чрезвычайно пугливой птицы, которая может оставить кладку только потому, что увидела поблизости человека, то в этом случае такой, казалось бы, бесконтактный процесс на самом деле является не только инвазивным, но и фатальным.

На интуитивном уровне понятно, явно неинвазивное наблюдение не может стать явно инвазивным. Поэтому, когда возникают примеры, опровергающие это интуитивное понимание, возникает особого рода парадокс, в котором то, что не может принципиально оказать влияния на процесс, якобы влияет на него фатально.

Скажем, утверждение: «стоит вам лишь взглянуть на мишень, и в ней будет дырка» вызовет протест вследствие своей антинаучности. Оптическое наблюдение мишени не инвазивно. Теоретически можно дополнить устройство неинвазивного наблюдения устройством, осуществляющим инвазивное вмешательство в исследуемый процесс, то есть искусственно превратить неинвазивное наблюдение в инвазивное. Допустим, установлено ружье, направленное в центр мишени, а спусковой механизм задействован от датчика, определяющего положение глаза некоторого оператора. Если оператор не смотрит на мишень, она остается целой. Как только оператор посмотрит на мишень, датчик определит этот факт и запустит спусковой механизм, ружье выстрелит, мишень будет продырявлена. Можно было бы утверждать, что одного взгляда этого оператора на мишень достаточно для того, чтобы ее продырявить. Но это не является свойством взгляда, это не является обязательным последствием любого взгляда любого человека, это лишь результат изготовления хитроумного устройства, и его действия. Такое развлечение может быть интересно с технической точки зрения, но это не является объектом научных исследований и не заслуживает дискуссии на тему наличия или отсутствия инвазивного свойства в оптическом наблюдении мишени.

О ПАРАДОКСЕ КОТА ШРЁДИНГЕРА

Вышеприведенные рассуждения помогают разоблачить парадокс, известный как «Кот Шрёдингера». Заодно разъясним, почему, собственно, в этом парадоксе использован кот.

Суть этого «опыта» состоит в том, что за счет некоторого устройства кот якобы находится в двойном состоянии – он одновременно и жив, и мертв, и ни то, ни другое, то есть ни жив, ни мертв. При этом речь не идет о том, что с некоторой вероятностью он жив, утверждается именно то, что он одновременно находится в двух этих состояниях. Наблюдение за котом по мысли автора этого парадокса переводит неопределенную функцию в определенную, то есть после наблюдения он уже не будет жив лишь наполовину и мертв лишь наполовину, а будет достоверно жив, либо достоверно мертв. Это наблюдение осуществляется именно в том смысле, какой вкладывается в этот глагол, то есть всего лишь ознакомление взглядом. Таким образом, взгляд оператора не только способен убить полуживого кота, но и оживить полумертвого кота. И все это при том, что понятие «полуживой» и «полумертвый» означает не болезнь на грани гибели, не какую-то стадию или фазу гибели, не ветеринарный диагноз, а именно состояние, в котором одновременно присутствует и абсолютная жизнь, и безусловная смерть.

Интуитивно понятно, что эксперимент «Визуальное наблюдение за котом, с целью понимания, жив ли он, или не жив» не может повлиять на результат. Глаз исследователя всего лишь фиксирует небольшую часть света, отражающегося от кота, и это никак не может повлиять на здоровье и жизнь этого кота. Этот пример апеллирует к хорошо знакомой жизненной ситуации, любой читатель согласится, что, взглянув на кота, невозможно его убить. Также как, взглянув на мертвого кота, невозможно его оживить. Поэтому наблюдение за котом не может изменить его состояния, визуальный осмотр не может живого кота убить или мертвого кота оживить.

Далеко не так очевидна ситуация с элементарными частицами. Ведь измерение электрического поля связано с получением электрического тока, а электрический ток – это направленное движение заряженных частиц. Поэтому каждому интуитивно понятно, что наблюдение в каком-либо эксперименте состояния элементарных частиц вполне может повлиять на дальнейшее состояние этих частиц.

Эксперимент с элементарными частицами относится к группе инвазивных измерений, тогда как оптическое наблюдение кота следует отнести к группе неинвазивных измерений.

Известный парадокс с котом Шрёдингера приписывает свойства инвазивного наблюдения неинвазивному наблюдению. В его выводах

утверждается, что само по себе наблюдение этого «кота» повлияет на его состояние, он окажется живым или мертвым в зависимости от того, наблюдали ли мы его или нет, и в зависимости от того, с каким результатом мы его наблюдали. То есть результат наблюдения якобы влияет на само состояние, которое определялось этим наблюдением. Жизнь кота и наблюдение за ним – это процесс и измерение, которые в случае с котом должны определяться явной и однозначной причинно-следственной связью: процесс – причина, измерение – следствие. И вдруг оказывается, что измерение – это причина, а процесс – это следствие.

Ситуация, с которой можно было бы согласиться в случае с элементарной частицей, преобразуется в ситуацию, с которой трудно согласиться, будучи в здравом уме, в случае с котом.

Выбор кота обусловлено, по-видимому, тем, что понятия «живой» и «не живой» не допускают промежуточного состояния, это две взаимно исключающие гипотезы, дилемма. Этим примером делается атака на «чувство здравого смысла» читателя, который не готов эту дилемму признать чем-то большим, чем дилемма, допустить одновременное существование жизни и смерти одного и того же живого существа.

Скажем, если бы речь шла о показании прибора, то наряду с крайними показаниями могло бы присутствовать некоторое среднее. Если перевести на язык показания прибора состояние кота Шрёдингера, то следовало бы утверждать, например, что исправный стрелочный индикатор, обладающие единственной стрелкой, одновременно этой своей стрелкой показывает на самое нижнее показание шкалы и на самое верхнее ее показание. Отдельно следует оговорить, что это вовсе не тождественно тому, что стрелка показывает какое-то среднее значение, а также не тождественно тому, что стрелка постоянно колеблется от одного состояния в другое. Парадокс состоит в том, что стрелка должна быть одна, но она одновременно должна показывать оба показания, и при этом, ни показывать ни одного из них. Казалось бы, указанное утверждение уже само по себе парадоксально, и нет никакой нужды изобретать механизмы, истребляющие кошачьих, но автору парадокса кот приглянулся больше, а его состояние и жизни, и смерти, и, при этом, ни того, ни другого, кажется наиболее убедительным. Одна из возможных причин такого выбора – апелляция к чувственной стороне психики читателя. Требуется шокирующее утверждение, поскольку только шок способен сломать здравый смысл.

Хитроумное изобретение, известное как «Кот Шрёдингера» состоит в мысленном создании устройства, которое убивает или не убивает кота в зависимости от состояния

элементарной частицы. То есть состояние элементарной частицы фиксируется прибором, например, счетчиком Гейгера, а этот прибор приводит в действие механизм, убивающий кота в случае одного состояния этой частицы, и не убивающей его в случае иного состояния этой частицы. Утверждается, что состояние элементарной частицы по-прежнему зависит от факта наблюдения, и поэтому до тех пор, пока «исследователь» не заинтересовался здоровьем кота, кот наполовину жив, наполовину мертв, и при этом ни жив и не мертв. В результате наблюдения, якобы, элементарная частица примет лишь одно определенное состояние, а это означает, что в результате устройство, убивающее кота, либо достоверно сработает, либо достоверно не сработает. Поэтому кот достоверно будет либо живым, либо мертвым, и ранее неопределенное состояние перейдет в строго определенное состояние именно как следствие факта наблюдения за состоянием здоровья кота.

Совершенно очевидно, что в данном парадоксе заключается ошибка. Именно так мы должны рассуждать с позиции науки: указать и разоблачить ошибку. Здесь даже не обязательно соглашаться или опровергать зависимость состояния указанной частицы от факта наблюдения.

Для определенности, чтобы снять часть аргументов возможных оппонентов, можем не оспаривать предположение о том, что факт наблюдения состояния частицы переводит ее из неопределенного состояния в определенное состояние.

Допустим, что наблюдение состояния частицы переводит ее из одного состояния в другое. В этом нет ничего парадоксального, поскольку мы знаем, что существуют инвазивные методы измерений. Состояние частицы не определяется глазом оператора. Для этого требуется некоторый прибор, например, счетчик Гейгера. Именно данный прибор осуществляет инвазивное преобразование энергии. Если частица попала в счетчик, он ее зафиксировал. Факт фиксирования состояния частицы может оказать влияние на ее дальнейшую серию взаимодействий, то есть на ее состояние. Но это всего лишь факт возможности влияния некоего устройства на элементарную частицу. В этом еще нет никакого парадокса. Далее к счетчику подключается некоторое детерминированное устройство для обработки сигналов и, возможно, для срабатывания какой-либо механической, химической или иной аппаратуры. Факт этого срабатывания зависит только от входного сигнала, то есть от выходного сигнала счетчика Гейгера. Это срабатывание никак не связано с фактом наблюдения за результатом оператором. Поэтому, когда читатель, обладающий здравым смыслом, изучает мысленное описание

эксперимента, он понимает, что если устройство действует по выходным сигналам счетчика Гейгера, то счетчик и только счетчик определяет состояние устройства – осуществило ли оно свое фатальное действие, или нет. Для этого нет никакой необходимости заключения кота в клетку с устройством для его умерщвления. Достаточно использования любого триггера или иного электрического, механического, химического или другого устройства с двумя устойчивыми состояниями, исключаящими любое промежуточное состояние. Устройство сработает или не сработает в зависимости от выходного сигнала счетчика Гейгера и только от него, наблюдение результата срабатывания этого устройства не есть инвазивное измерение.

На данном примере можно указать, что имеется некоторая совокупность устройств (и измерителей), часть из которых является заведомо инвазивными, часть является заведомо неинвазивными. Цепочка из последовательно включенных инвазивных и неинвазивных средств измерений и наблюдений является неинвазивной по отношению к первичному наблюдению, если первый датчик в этой цепочке неинвазивный, и эта цепочка является инвазивной по отношению к первому измерению, если первый датчик инвазивный.

Пример 30. Если при подсчете яиц по примеру 26 мы будем переламывать спичку после наблюдения каждого нового яйца, то в отношении спичек такое действие будет инвазивным, но по отношению к яйцам оно осталось неинвазивным.

Пример 31. Рассмотрим пример 27, в котором яйца изымаются из гнезда. Если по результатам такого подсчета мы для запоминания результата подсчитываем, сколько можно заполнить коробок, каждая из которых рассчитана на десяток яиц, то в отношении этих коробок мы не совершаем инвазивного действия. Коробки остаются нетронутыми, используется лишь их образ. Но все измерение в целом остается инвазивным, поскольку на входе действия измерения используются изъятые из гнезда яйца, которые туда более не возвращаются.

Поэтому в цепочке устройств и действий оператора первым и инвазивным стоит устройство, превращающее состояние элементарной частицы в выходной сигнал датчика. Именно это устройство делает измерение инвазивным. Дальнейшее не существенно по отношению к исходному процессу – будет ли кот убит коварным устройством, или не будет, осуществит ли оператор наблюдение за состоянием кота или нет, это никак не влияет на состояние частицы. Поэтому наблюдение за состоянием кота не влияет на его состояние. Следовательно, никакого парадокса в данном выдуманном устройстве нет, и не может быть.

Вывод 4. Если мысленный эксперимент можно реализовать, то результат в нем должен быть не парадоксальным.

Вывод 5. Если результат мысленного эксперимента парадоксален, то либо этот эксперимент невозможно реализовать, либо методы рассуждения в нем ошибочны, либо хотя бы одно из исходных предположений ошибочно.

Необходимая оговорка. В мысленном эксперименте с «Котом Шрёдингера» присутствует устройство, которое осуществляет это самое «наблюдение» или «измерение» состояния частицы. Именно оно взаимодействует с элементарной частицей и влияет на ее состояние. Любое дальнейшее устройство, подключенное к этому устройству, будь то устройство для убийства кота, или устройство для запуска ракеты или попросту монитор компьютера – это всего лишь индикатор. Индикатор не может влиять на процесс, который он индицирует, поскольку нет такого механизма. Данный тезис требует оговорки. Имеется в виду именно индикатор, а не интерактивный монитор, обладающий сенсорными свойствами, или иными датчиками. Интерактивный монитор неправомерно называть «индикатором», поскольку он не только индикатор, он является интерактивным интерфейсом, устройством для общения в обе стороны, не только от компьютера к пользователю, но и от пользователя к компьютеру. В этой терминологии индикатор – однонаправленное устройство. Сигнал в однонаправленном устройстве движется в одном направлении. Считывание глазами информации с него без каких-либо воздействий на другие средства управления компьютером, прямо или косвенно, не могут влиять на процесс, который явным образом является причиной, тогда как считанная информация явным образом является следствием.

Поэтому гипотетический кот может не опасаться того, наблюдают ли за ним, или нет, поскольку никакое наблюдение само по себе убить его не может. А теоретики, которые всерьез, а не в шутку, обсуждают указанные виды экспериментов, ничего не добьются такими рассуждениями, они всего лишь напрасно тратят свое время и средства, выделяемые на их исследования. И напрасно выделяются эти средства таким горе-теоретикам. Было бы лучше, если бы они задумались на тему философии своих измерений, и вернулись с почвы материалистической абстракций на почву материалистической и научной методики исследований.

Можно придумать много разных видов устройств, которые влияют на что-либо вследствие действия глаз оператора, но тогда оператор будет действовать не как пользователь индикатора, а как пользователь интерактивного

управляющего устройства, и нет ничего парадоксального в том, что такое устройство может влиять на состояние любых объектов – было бы устройство считывания команды от глаз оператора и устройство для приведения в действия соответствующего механизма или электрического устройства. Такое устройство можно сделать, работу такого устройства можно предсказать и рассчитать, в нем нет ничего парадоксального, для его работы не требуется привлечение никаких тезисов из теории вероятности или квантовой физики. Подобное устройство никак не связано с идеей об устройстве, известном в парадоксе «Кота Шрёдингера».

Вывод 6. Технически можно многое, но все известные науке устройства не парадоксальны.

Вывод 7. Устройство, известное как «Кот Шрёдингера», может быть сделано так, как оно описано, но предсказываемый результат ошибочен, парадоксального действия такого устройства не будет. Поскольку устройство фатально, его действия будут фатальны. В этом нет парадокса. Поскольку наблюдение за устройством не фатально, такое наблюдение не приведет ни к каким изменениям ситуаций в этом устройстве, в этом также нет никакого парадокса.

ЯВЛЯЕТСЯ ЛИ НЕПРОТИВОРЕЧИВОСТЬ ДОКАЗАТЕЛЬСТВОМ?

Рассмотрим утверждения некоторых современных ученых. «Также не противоречит экспериментам ученых ретропричинная интерпретация, согласно которой будущее может влиять на прошлое» [<http://universe-tss.su/>]. Хотя очень напрашивается фраза: «Любопытно было бы указать, каким именно экспериментам не противоречит утверждение о том, что будущее может влиять на прошлое», мы сформулируем свое пессимистическое отношение иначе: непротиворечивость какого-либо утверждения экспериментам далеко не доказывает истинность этого утверждения.

Во-первых, может оказаться, что библиотека известных экспериментов не полна, и на определенной стадии развития науки и техники будет сделан эксперимент, которому данное утверждение противоречит.

Во-вторых, можно выдвинуть гипотезу или создать систему гипотез, которые не могут быть опровергнуты в рамках ограничений по пространству, времени или по тому и другому вместе, или по иным причинам, например, энергетическим.

Пример 32. Можно осмелиться утверждать, что если осуществить высвобождение энергии в размере десяти в миллионной степени Джоулей, то после такого взрыва время пойдет вспять. Понятно, что человечеству не под силу эксперимент или даже наблюдение за процессами, которые одновременно

высвобождают такое количество энергии.

Экспериментально опровергнуть данное утверждение невозможно. Для сравнения энергия взрыва сверхновых звезд может оцениваться на уровне порядка десяти в сорок пятой степени Джоулей.

Данное утверждение можно отнести к разряду непротиворечивых гипотез. Но нет никаких оснований для того, чтобы считать такое утверждение научным.

Многие гипотетические явления можно объявить не противоречащим известным экспериментам, если отнести их в область ненаблюдаемых экспериментально явлений, а, следовательно, и не опровергаемых ничем. Эти области скрыты от наблюдений каким-либо непреодолимым ограничением.

Непреодолимы ограничения по времени (в прошлом и в будущем, а также по длительности эксперимента). Непреодолимы ограничения по энергии, как в Примере 18, или по массе, или по плотности поля, и так далее. Непреодолимы ограничения по расстоянию. Также непреодолимы ограничения по возможностям (разрешению) измерительных устройства, например, по минимальным размерам, воспринимаемым датчиками, по минимальным интервалам наблюдений, по минимальным величинам измеряемых масс, энергий и так далее.

Поэтому некоторым теоретикам удается бездоказательно, но авторитетно рассуждать о том, что происходило во Вселенной задолго до появления Солнечной системы, а также о том, что происходит в ней сейчас далеко за пределами видимой ее части, и о том, что будет с ней происходить после того, как авторы подобных рассуждений получат все незаслуженные материальные и моральные гонорары за плоды своих ошибочных рассуждений, потратят их скроются от ответственности за фантазмагорические идеи уходом на пенсию или вовсе покинув этот мир. Эти рассуждения тиражируются средствами массовой информации, откуда попадают в научно-популярную литературу, проникают в школьные и вузовские учебники, в учебные программы. А студенты вынуждены это нагромождение схоластических выводов, дискредитирующее понятие логики и здравого смысла, изучать и даже сдавать по нему экзамены. Лишь непосвященному эта ситуация может показаться безобидной, поскольку каждая необоснованная теория так или иначе, хотя бы своим краешком, оказывает влияние на практическую сторону жизни. «Шила в мешке не утаишь» – гасит поговорка, и ошибочное мировоззрение приводит не только к тотальному оглулению школьников, студентов, аспирантов, то и к авариям на искусственных космических объектах, к неразумным тратам гигантских денежных сумм на поиск того, чего найти нельзя по причине его

отсутствия.

Непротиворечивость – это необходимое, но не достаточное условие принятия какой-либо гипотезы. Если гипотеза противоречива, этого достаточно, чтобы снять ее с рассмотрения по этой причине. Если она непротиворечива, то снять ее с рассмотрения по причине противоречивости нельзя. Непротиворечивость доказывает истинность только в случае с дилеммой и при неперемennom условии противоречивости, парадоксальности альтернативной гипотезы.

Пример 33. Если бы все мысленные эксперименты теории относительности были непротиворечивыми, и если бы не существовало возможности построения иной теории на основе всех тех же известных фактов, тогда непротиворечивость этой теории можно было бы принять за ее доказательство (по крайней мере, на данном этапе развития науки). Но ситуация с теорией относительности в корне противоположна. Теория относительности Ритца является непротиворечивой, поскольку не приводит ни к одному из известных парадоксов теории относительности Эйнштейна. Поэтому если бы имелась возможность принятия только одной из этих двух теорий, и не имелось бы возможности построения какой-либо иной теории принципиально, то следовало бы, скорее, признать теорию Ритца истинной, а теорию Эйнштейна ошибочной. Все же в данном случае мы не имеем дилеммы, кроме теории Ритца и Эйнштейна можно предложить и иные подходы.

Принятие парадоксов как «кажущиеся противоречия» - это антинаучный подход, и теория, приводящая хотя бы к одному парадоксу, уже противоречива, по крайней мере, поэтому. Если же из теории следует целая серия парадоксов, она никак не может считаться непротиворечивой. В настоящее время из теории относительности Эйнштейна следует такое количество парадоксов, что точное их число назвать не представляется возможным.

Во-первых, непротиворечивую теорию, в будущем можно снять с рассмотрения по иным причинам, например, явные логические или математические ошибки.

Пример 34. К математической ошибке следует отнести утверждение о том, что квадратное уравнение имеет лишь один действительный корень. В действительности если квадратное уравнение имеет один действительный корень, то оно имеет и второй действительный корень. Поэтому утверждение, что преобразование Лоренца, которое базируется на квадратичной форме, единственно, само по себе ошибочно с математической точки зрения. Из квадратного преобразования, из которого может следовать «сокращение» длины, с такой же математической точностью может следовать и «увеличение длины», при этом там, где следует «замедление времени» столь же математически

обоснованно может следовать «ускорение времени».

Во-вторых, противоречивость непротиворечивой в настоящее время теории может открыться позже при рассмотрении иных взаимодействий этой гипотезы с другими научными положениями.

Пример 35. При опровержении теории Ритца было сказано, что если бы она была справедлива, астрономы наблюдали бы мигающие звезды. Коль скоро мигающих звезд не обнаружено, следовательно, теория Ритца ошибочна. На этом же самом основании была объявлена непротиворечивость теории относительности Эйнштейна. Но с развитием астрономии мигающие объекты в космосе обнаружены, ими являются квазары и пульсары. На этом основании следует признать непротиворечивой теорию Ритца, и противоречивой теорию Эйнштейна.

В-третьих, даже принципиальное отсутствие противоречий и невозможность опровержения гипотезы путем указания на противоречие не делает гипотезу доказанной. Непротиворечивости недостаточно. Необходимо основание для принятия гипотезы. В отношении одного и того же набора фактов может быть построено несколько непротиворечивых гипотез, и это не является поводом для принятия их всех или выбора из их числа единственной. Можно сказать, что список непротиворечивых гипотез прошли как бы первую ступень отбора, но ни одна из них не стала победителем до тех пор, пока не осталась единственной в списке непротиворечивых.

Единственность непротиворечивой гипотезы может служить основанием для ее принятия, если список возможных гипотез действительно полон, и если противоречивость всех остальных гипотез действительно доказана.

Так в Примере 18 полный перечень гипотез таков: а) увеличение массы увеличивает ускорение свободного падения тела; б) увеличение массы уменьшает ускорение свободного падения тела; в) увеличение массы не изменяет ускорения свободного падения тела. Мысленный эксперимент Галилея опроверг гипотезы а и б, поэтому доказанной становится гипотеза в. Если бы к моменту рассуждений Галилея не было бы известно о существовании воздуха, и воздух приравнивался бы к пустоте, а также если бы при этом имелись в распоряжении Галилея, например, воздушные шары, наполненные гелием, Галилей мог бы подумать, что масса этих шаров отрицательна, и экспериментально мог бы доказать, что тела «с отрицательной массой» удаляются от центра Земли, а при увеличении массы тел, их ускорение падения возрастает, и даже мог бы так подобрать «массы», что их соединение бы не падало и не взмывало вверх, а зависало бы на какой-то высоте. В этом случае с позиции современной науки надо было бы признать, что

исходный перечень гипотез не верен, или не полон, или не достаточен. А именно, необходимо добавить, что речь идет о ситуации, когда ничто не препятствует падению тел, и что в бытовых экспериментах эта ситуация не воспроизводится, поскольку имеется воздух, который всегда препятствует падению тел вследствие сопротивления, а также вследствие выталкивающей силы. Поэтому птичье перо падает медленней чем свинцовая дробь, а шар с гелием взмывает вверх.

Следовательно, при мысленном эксперименте необходимо не только иметь полный перечень возможностей, перечень гипотез, которые исключают друг друга но совместно образуют все возможные варианты объяснений явления, но также необходимо опираться на несомненные знания о тех особенностях эксперимента, которые доказывают полноту набора выдвигаемых гипотез. Достаточно наличия одной неучтенной возможности и все доказательство со своими посылками и выводами становится бездоказательным или вовсе ошибочным.

О «МАШИНЕ ВРЕМЕНИ»

Ретропричинная интерпретация [12] – это, по сути, апелляция к «машине времени». Это еще один парадокс. Время не является одной из координат пространства, или «пространственно-временного континуума». Время вообще не является координатой. Его можно использовать так, как можно использовать координату, для того, чтобы указать время события наряду с тем, что координаты указывают место события. Если ставится задача достижения точки с указанными координатами, нет принципиального физического запрета на это. Ограничения могут быть связаны лишь с требуемым ресурсом времени, энергии и так далее, чтобы это сделать. Имеется множество способов перемещаться по координатам, изменять свое местоположение. Имеется множество способов покинуть любое место с данными координатами и занять место с другими координатами. Если же ставится задача достижения времени с заданными координатами, то никак повлиять на решение этой задачи невозможно. Если указанный момент принадлежит прошлому, он недостижим принципиально, если он принадлежит будущему, он будет достигнут ровно тогда, когда наступит его срок, ни мгновением раньше, ни мгновением позже. Никто никогда не мог и не сможет перемещаться во времени произвольно. Никто не может покинуть свое время и появиться в другом времени, самопроизвольно переместиться даже ни на малую величину. Время связывает всех «одной упряжкой», оно универсально, течет одинаково во всей Вселенной, никогда не идет вспять, никогда не замедляется и не ускоряется, время нельзя

уловить, можно лишь измерять его ход между одним событием и другим, можно измерять приращение времени. Влиять на него нельзя.

В уравнение распространения волны время входит в такой же форме, как и координата.

Одинаковое математическое описание не доказывает одинаковости природы явления. Свет отражается от зеркала по такой же траектории, по какой идеальный упругий точечный объект отскакивает от плоскости, но природа этих явлений принципиально различна. Два световых пучка при пересечении друг с другом никак не повлияют на дальнейший ход каждого из пучков. Если два потока частиц пересекаются (например, вода из двух шлангов), они повлияют на дальнейшую траекторию полета частиц в них.

Время и координата позволяют указать, где и когда явление имело место или будет иметь место. Если описывать распространение волны, эти величины могут входить в уравнение похожим образом. Но из этого вовсе не следует, что время и координата имеют одинаковую или хотя бы сходную природу.

Существует множество механизмов, позволяющих передвигаться в пространстве, но никогда не будет существовать механизм, который бы позволил перемещаться во времени. Ни назад, ни вперед двигаться во времени невозможно, а можно лишь двигаться вместе с ним, совместно от прошлого к будущему через настоящее, ровно тем темпом, которое задает оно, и никак иначе. Все остальные возможности составляют богатейший материал для писателей-фантастов, но из науки должно быть устранено обсуждение такой возможности. Историк изучает результаты процессов, которые были в прошлом, включая летописи, и свидетельства, как материальные, так и литературные. Мысленно он может перемещаться в то время, посредством воображения воссоздавая картины ушедших времен. Но эти картины нигде не существуют объективно, в них невозможно попасть, вернуться. Они прошли, и их нет. След о события может распространяться в пространстве, как например, распространяется свет звезды, даже если сама звезда уже не существует. Этот свет – посланник прошлого. Изучая его, можно «заглянуть в прошлое», но присутствовать в прошлом нельзя, вернуть прошлое невозможно, посетить его, исправить в нем что-либо, привнести туда новую информацию или осуществить воздействие над прошлым – все это лишь мечты писателей и, к сожалению, раздел лженауки, который незаконно прижился большой вервью на здоровом теле истинной науки. Наука должна создаваться и развиваться не без использования здравого смысла и скептицизма, которые мы назвали «философией измерений».

ПАРАДОКС КАК НАУЧНЫЙ

ИНСТРУМЕНТАРИЙ

Один из эффективнейших примеров использования парадокса приведен в Примере 18, где инструментарий ученого составил мысленный эксперимент, парадокс и последний важнейший шаг: выбор, устраняющий парадокс.

Следует использовать парадокс именно так, и только так. При получении парадокса следует осуществить выбор набора гипотез, руководствуясь целью устранения парадокса. От парадоксов следует избавляться, устраняя ошибки в исходных допущениях.

Пример 36. Ахиллес пытается догнать черепаху. Он находится на некоем расстоянии за ней и движется в N раз быстрее черепахи. В свое время философ Зенон утверждал, что при таких условиях Ахиллес никогда не догонит и не обгонит черепаху. Он рассуждал следующим образом. За некоторый интервал Ахиллес пройдет указанный путь. Поскольку черепаха не стоит на месте, она за этот же интервал времени продвинется расстояние, в N раз меньшее. Таким образом, Ахиллес пока еще не догонит черепаху. За следующий интервал времени он пройдет указанный новый отрезок пути, отделяющий его от черепахи, но черепаха за это время пройдет новый отрезок, пусть даже и в N раз меньше. Пока Ахиллес будет проходить оставшийся путь, черепаха пройдет новый, и так далее, и так далее, до бесконечности. Вывод Зенона состоит в том, что никогда Ахиллесу не догнать черепаху. Ошибка рассуждения кроется в том, что время разбивается на интервалы, каждый из которых меньше предыдущего в N раз. Если первый интервал Ахиллес покрывает за время T , то следующий интервал он покрывает за время T/N , следующий – за время T/N^2 , следующий за время T/N^3 , и так далее. Поскольку время постоянно увеличивается новыми добавками, то создается ложное впечатление, что такое рассуждение покрывает все возможное время, то есть рассуждение касается времени, которое якобы длится до бесконечности. На самом же деле рассматриваемый интервал времени конечен, он составляет предел суммы всех этих приращений. Например, если $N = 2$, а $T = 1$ мин., то следующий интервал равен 0,5 мин., затем 0,25 мин., 0,125 мин., и так далее. Сумма бесконечного ряда из этих интервалов равна 2 мин. То есть вывод Зенона в данном случае относится к интервалу в пределах двух минут, в пределах этого интервала Ахиллес, действительно, не догонит черепаху, поскольку он ее догонит по окончании этого интервала, ровно через две минуты. Рассуждения же Зенона за двухминутный интервал не выходят, и не выйдут никогда, сколько бы он ни продолжал добавлять половину от оставшейся половины.

В данном примере важно найти и указать причину парадокса, после чего парадокс перестает быть парадоксом. Что интересного в

том, что бегун догонит и перегонит черепаху? В этом нет ничего интересного, поскольку тут нет парадокса. Но этот вывод важен, поскольку исследователь не должен пасовать перед парадоксом, не должен уступать ему, признавая за парадоксом право на дальнейшее существование. Если парадокс признается таковым, но не разрешается, не снимается, не объясняется причина его возникновения, не вносятся изменения в исходные посылки, то парадокс как инструмент научного исследования не работает. И если создатель гипотезы, приводящей к парадоксу, вместо того, чтобы искать ошибки после того, как парадокс доказал их наличие, считает свой труд законченным, а парадокс имеющим право на существование, является никуда не годным ученым. Ему следовало бы избрать другую профессию, например, писателя-сказочника.

Но со времен торжества ошибочных теорий Эйнштейна парадоксы стали заносить в классический перечень достижений науки. Так и получилось, что науку заполняют ошибочные утверждения, которые уже льются через край, тогда как доля истинно научных сведений неуклонно уменьшается. Наука превращается в особого рода религию, где имеется и иерархия священнослужителей, и священные писания, критиковать которые запрещено, и система догм, которые принято признавать истиной, как бы смехотворны они не были, и сколько бы раз ни были разоблачены. Имеются тут и свои идолы-истуканы, и суеверия, и табу, и шаманство, и одурманивание, и изгнания дьявола. Самое неприятное в подобного рода религиях – это упорное признание невозможного возможным и столь же упорное отрицание возможного как невозможное.

Сколько бы раз ни разоблачались явно ошибочные утверждения о гравитационных линзах, о квантовой природе энергии, о замедлении времени, о сжатии пространства, о расширении вселенной, о черных дырах, о невозможности движения материальных частиц со скоростями выше скорости света, о запутанных частицах, об антивеществе, о двойных звездах, о разбегании галактик и о первовзрыве, о теории струн и прочем, прочем «илистом наслоении» на чистом научном мировоззрении, все эти ошибочные наслоения не только разрастаются, но, что самое ужасное – на них отпускается все больше и больше средств, они пропагандируются все шире и шире, и уже нет надежды на то, что когда-либо победит светлая и ясная мысль, что возвратится научный подход в физику, астрофизику, физику элементарных частиц, в теорию света. Ложный дуализм природы света уже настолько вошел в учебники, как и теория относительности, что любой, кто сомневается в этом, должен немедленно быть изгнанным из науки и подавлен нравственно без какой-либо попытки понять его точку зрения и увидеть в

ней здравый смысл, научный подход, позитивный результат.

В настоящее время более безопасно утверждать о существовании порталов для перемещения во времени-пространстве, о девятнадцатимерной вселенной, о множественности миров, похожих друг на друга и существующих одновременно в параллельных пространствах. То, что ранее было уделом фантастов или религии, теперь популяризируется и выдается за результаты научных исследований, утверждается, что весь этот бред обоснован научно и доказан. И все это – всего лишь вследствие ошибочной трактовки опыта Майкельсона Эйнштейном. Эта трактовка привела к принятию ошибочного тезиса о том, что скорость света в вакууме постоянна во всех инерциальных системах отсчета, и что не имеется и не может принципиально существовать какого-либо способа, чтобы отличить покоящуюся систему от системы, которая движется равномерно и прямолинейно.

Несмотря на то, что автор этих строк получил патент на устройство, которые опровергает совокупность этих тезисов уже одной своей возможностью существовать, поскольку если такое устройство сделать и исследовать (а это не представляет принципиальной проблемы), то результат неизбежно будет опровергать первый постулат теории относительности, либо ее второй постулат. Никакой результат его использования не может одновременно не вступать в противоречие с обоими этими постулатами.

Речь идет об интерферометре, заполненном оптической средой, не вакуумом. Если при движении такого интерферометра полосы будут перемещаться, следовательно, опровергнут постулат о невозможности отличить движущуюся систему от неподвижной. Если же при движении полосы все же не будут перемещаться, следовательно, будет опровергнут постулат о постоянстве скорости света в вакууме, поскольку такой интерферометр даст те же самые основания для утверждения о постоянстве скорости света в этой оптической среде, что и в вакууме. То есть тезис о том, что опыт Майкельсона опровергает возможность существования эфира, будет опровергнут, поскольку ровно такие же результаты с оптическим веществом должны были бы дать основание для опровержения существования этого вещества, тогда как известно, что вещество в интерферометре есть, и при этом достоверно известно из опыта Физзо, что скорость света в веществе (в оптической среде) все же зависит от скорости этой среды.

ОБ ОПРОВЕРЖЕНИИ ГИПОТЕЗ И ТЕОРИЙ

Возникает у любого, читающего эти строки, закономерный вопрос: «С чем автор спорит, и

что положительного он может предложить взамен?»

Сама по себе «Теория относительности» или «Квантовая теория света» кажется весьма далекой от жизни простого обывателя, и, казалось бы, какая разница, сколько там парадоксов, есть ли там вообще парадоксы или их там нет, какова доля истины в этих теориях, кому надлежит эти теории развивать, в какую сторону, за какие средства, и с каким результатом,

Широко распространено ошибочное мнение, что квантовая теория и теория относительности неоднократно экспериментально доказаны. Также широко распространено мнение, что эти теории позволили создать нечто новое, полезное, научное.

То есть предполагается, что эти теории способствуют развитию науки, и даже развитию техники, помогают не только «понять», но и «создать».

На самом деле все это далеко не так.

Ничего технического не создано с использованием теории относительности и (или) квантовой теории света из того, что невозможно было бы создать без использования этих теорий или с использованием другой теории, более верной. Доказательства теории относительности – это наслоение мифов и легенд, ровно такие же, как доказательства существования бога, или доказательства посещения Земли инопланетянами. Впрочем, возможно, доказательства визита инопланетян или существования «снежного человека» более научны.

Следует осознать, что доказательства ошибочности теории относительности имеется достаточно. Также следует осознать, что даже одного доказательства ошибочности теории достаточно для того, чтобы эту теорию признать ошибочной.

При этом речь не идет о доказательстве ошибочности доказательства. Речь идет о доказательстве ошибочности именно теории.

Ошибочность доказательства доказывает лишь необоснованность теории, ошибочность всех доказательств теории попросту переводит ее из разряда теории в разряд гипотез, но не опровергает ее как таковую. Но доказательство ошибочности теории – это совсем иное. Достаточно одного такого доказательства, чтобы теорию признать ошибочной.

Пример 37. Пусть если три землемера, пользуясь каждый своей рулеткой, измерили каждый свою сторону одного общего треугольника, и оказалось, что квадрат наибольшей стороны равен сумме квадратов двух других сторон. Для них это является достаточным доказательством, что данный треугольник – прямоугольный, даже если зрение и «здравый смысл» указывает на иное. Можно сказать, что три землемера выдвигали гипотезу о том, что треугольник прямоугольный, и

измерениями эта гипотеза подтвердилась, поэтому гипотеза перешла в ранг теории. Выдвижение доказательства превращает гипотезу в теорию.

Пример 38. Пусть после выполнения всех условия Примера 37 пришел метролог и исследовал примененные землемерами рулетки. Результат его заключения состоит в том, что у каждого землемера рулетка имеет свою собственную шкалу, масштабы этих шкал не совпадают, то есть один измерял, например, длину в дюймах, другой – в сантиметрах, а третий – в вершках. Тем самым опровергнуто доказательство, что треугольник прямоугольный. Опровержение доказательства возвращает исследователей к стадии, когда теория становится гипотезой, поскольку ее доказательств нет, так как то, что считалось ее доказательством, опровергнуто. Этот треугольник может быть прямоугольным, а может и не быть таковым. Опровержение доказательства теории превращает ее в гипотезу.

Пример 39. После выполнения всех условий Примера 37 и Примера 38, допустим, что метролог выдал всем землемерам проверенные рулетки, проградуированные в сантиметрах, и они заново измерили стороны треугольника, каждый свою. И теперь квадрат наибольшей стороны не равен сумме квадратов двух других сторон. Из этого следует, что опровергнута теория о том, что данный треугольник – прямоугольный. То есть доказано, что он прямоугольным не является. Доказана ошибочность теории. Нет никакой нужды в других доказательствах ее ошибочности или в других опровержениях ее безошибочности. Никакой полезности нет в непротиворечивости этой теории каким-либо иным исходным тезисам и посылкам, поскольку вопрос решен однозначно, окончательно и бескомпромиссно. Опровержение теории или гипотезы прекращает ее существование даже как гипотезы. Опровергнутая гипотеза не должна рассматриваться даже как гипотеза, а тем более, как теория.

Опровержение может быть также опровергнуто вследствие отыскания в нем ошибок, или в результате более надежных экспериментов, основанных на новой технологии.

Теоретическое опровержение можно опровергнуть лишь теоретически. Экспериментальное опровержение можно опровергнуть лишь более тщательным экспериментом. Опровержение синтетическое (на основе использования как теории, так и эксперимента), можно опровергнуть путем отыскания ошибки в любой части этого опровержения, но, по-видимому, оно должно содержать все компоненты рассуждений.

Пример 40. Если опровержение гипотезы, что треугольник прямоугольный, совершено

экспериментально, то есть на основании достоверного измерения его сторон с последующей проверкой выполнения условия теоремы Пифагора, то экспериментальное опровержение может быть сделано путем более точных измерений, но тогда более точные данные следует опять использовать в новом расчете, то есть опровержение в этом случае будет комплексным. Теоретическое опровержение для данного случая могло бы иметь место в случае указания на ошибку в вычислениях, при этом экспериментальные данные сомнению не подвергались бы.

Если само опровержение опровергнуто, то отвергнутая вследствие исходного опровержения гипотеза вновь станет всего лишь гипотезой.

Если опровергнуто опровержение теории, то восстановленная в правах теория может вновь стать теорией, либо она может стать гипотезой.

Если опровергнута единственная приемлемая теория, то есть все другие гипотезы также были опровергнуты, то наступает кризис теории. То есть данный раздел науки на данном этапе ее развития не располагает ни одной достоверной теорией, которая бы не опровергалась.

Состояние кризиса теории – это состояние на пороге новых открытий, поскольку оно указывает на необходимость дополнительных исследований для снятия кризисной ситуации.

РАДИ ЧЕГО И ЗА ЧТО СРАЖАЕМСЯ?

Опровержение доказательств – всего лишь повод к сомнениям, но опровержение теории ставит на этой теории крест раз и навсегда. Поэтому наличие опровержения теории не дает никакой возможности игнорировать его, не позволяет уклоняться от ответа, запрещает дальнейшее использование этой теории как верной, поскольку доказана ее ошибочность.

Тот, кто использует ошибочную теорию, действует хуже, чем тот, кто не имеет никакой теории, поскольку тот, кто теории не имеет, имеет шанс создать верную теорию, а тот, кто доверяет заведомо ошибочной теории, такого шанса лишен.

Вопрос об опровержении теории относительности встал вовсе не вследствие найденных «шероховатостей» в рассуждениях её автора, а вследствие тех дебей, в которые заводит эта теория. Эти дебри таковы, что любой разумный человек откажется принять все её утверждения в совокупности. К счастью или к несчастью, в мире достаточно мало людей, которые знают и понимают всю совокупность утверждений теории относительности и ее следствий. Возможно, в мире таких людей нет ни одного. Возможно также, что в мире никогда и не было ни одного такого человека, включая самого Эйнштейна. Но даже и малой толики следствий этой теории достаточно для её

интуитивного отрицания. Эйнштейн понимал, что здравый смысл большинства людей не позволит согласиться с его теорией, поэтому многократно в его трудах и в других книгах по теории относительности говорится о том, что читатель не должен доверять здравому смыслу, а должен доверять уравнениям и их толкованию.

Отказ от здравого смысла в позиции бритвы Оккама. Если отказаться от «здравого смысла», то вообще следует отказаться от любых теоретических исследований, выводов, гипотез. Именно здравый смысл, и только он приводит любого исследователя к гипотезе о том, что всякое движение (развитие, действие) в неживой природе (по крайней мере) подчиняется некоторым объективным законам этой природы. Только здравый смысл говорит о том, что любой такой закон может быть описан математически. Лишь здравый смысл утверждает, что если закон описан математически, то далее, преобразуя это описание с помощью законов математики (а не физики), можно рассчитать интересующую нас величину в интересующем нас виде взаимодействия, и на основании здравого смысла мы делаем вывод о том, что этот расчет должен подтвердиться экспериментально.

Пример 41. Можно рассмотреть траекторию тела, падающего вблизи поверхности Земли в вакууме. Имеется некоторый математический закон, увязывающий ускорение тела с силой через массу. Также есть закон, увязывающий силу с положением тела в гравитационном поле и также с его массой. Сила равна массе, умноженной на константу g , называемую ускорением свободного падения. Соответственно, ускорение равно силе, деленной на массу. Следовательно, масса сокращается, если она не равна нулю. Следовательно, ускорение любого тела с массой одинаково (при отсутствии других сил) и равно ускорению свободного падения g . Неверным было бы утверждение о том, что любое тело в данной точке пространства при отсутствии других сил движется с ускорением, равным g . Действительно, возьмем гипотетический объект с нулевой массой. Этот объект вовсе не должен двигаться с указанным ускорением. Из приведенных теоретических сведений не следует, что объект должен так двигаться, но из них и не следует утверждения, что объект не должен так двигаться. Вопрос движения объекта с нулевой массой остается открытым, данная теория его не решает. Поэтому вернемся к объектам с реальной, не нулевой массой. При этих рассуждениях мы многократно апеллировали к понятию «здравый смысл», даже не вспоминая об этом. Действительно, сначала мы предположили, что закон гравитации действует применительно к интересующему нас объекту. Но, возможно, что никогда никто не делал экспериментов с

объектом данной природы. Например, мы можем рассуждать об объекте, состоящем из вновь открытого вещества. Весь предыдущий опыт всех ученых мира не затрагивал объекты из этого вещества. Поэтому чисто теоретически нет никаких оснований (кроме здравого смысла) предполагать, что объект из нового, ранее неизвестного вещества будет вести себя точно также, как объекты из всех других веществ. Здравый смысл, и только он, убеждает нас, что совершенно не важно, из какого материала сделан предмет, важно лишь то, что объект обладает массой, поскольку она описывает вид данного взаимодействия. Также лишь здравый смысл убеждает нас, что в математической записи решения данной задачи масса сокращается, и результат не входит. Лишь здравый смысл говорит нам о том, что если математически доказано отсутствие влияния массы на ускорение, то и на практике масса в тех же условиях не будет влиять на ускорение. Если эту же задачу решать в условиях наличия среды, например, воздуха, то здравый смысл указывает нам на то, что этот фактор следует учесть, как минимум, двумя поправками. Во-первых, на тело действует выталкивающая сила. Во-вторых, на тело действует сила сопротивления, зависящая от скорости и от формы тела, а также от свойств ее поверхности. Поэтому необходимо все же рассчитать силу притяжения, далее учесть все остальные силы, и потом обратно вычислить ускорение. Только здравый смысл убеждает нас в том, что если мы учтем все факторы, то результат будет надежный. Здравый смысл подсказывает нам, что набор известных законов взаимодействия достаточен для решения этой задачи. Можно предположить, что выталкивающая сила не так уж важна, однако, если в качестве объекта избрать воздушный шар с гелием, оказывается, что выталкивающей силой никак нельзя пренебрегать. Итак, даже самая простейшая физическая задача опирается на ряд гипотез, которые иначе, как здравым смыслом, обосновать невозможно, строго доказать их нельзя.

И если уж утверждать, что здравый смысл – не советчик и не помощник в решении физических задач, то можно оспорить и утверждение о том, что если из математического преобразования какой-либо математической записи какого-либо закона следует какой-либо результат, то этот результат имеет физический смысл, и описывает возможные физические явления.

Рассмотрим **Утверждение 1:** «Математика, примененная к математической записи физических законов, дает требуемые новые знания о физических явлениях». Только здравый смысл является основанием для его принятия. Утверждение «математика – царица наук» основано именно и только на этом основании. Но еще выше математики тут стоит

логика, которая утверждает, что если имеется математическая связь физических величин, то ее использование дает верный прогноз. Это утверждение логическое, то есть утверждение из области «здорового смысла». Если мы последуем совету Эйнштейна и откажемся от здравого смысла, нам также следует и отказаться от математики для описания явлений физики.

Мало того, это Утверждение 1 не столь строго, чтобы его можно было бы принять без оговорок даже при большом доверии здравому смыслу. Действительно, все несколько иначе. Если имеется некоторый физический закон, то надо помнить, что выведен он для какого-то ограниченного набора явлений, и его применимость имеет свои границы. Поэтому его математическая запись правильно отражает его суть лишь в ограниченной области, в некоторых рамках. Следовательно, преобразования математической записи этого закона должны сопровождаться и преобразованием границ этого закона, и полученный результат ни в коем случае не должен переноситься в ту область, в отношении которой не было достаточно убедительных исследований.

Пример 42. Закон Кулона сформулирован для точечных заряженных частиц, также называемых «точечные заряды». Формулировка этого понятия предполагает, что геометрические размеры таких частиц столь малы в сравнении с расстояниями между ними, что без большой потери точности и без влияния на качественное описание процесса можно принять размеры этих частиц нулевыми, то есть приравнять их форму к форме шара с бесконечно малым диаметром. В формулировке закона Кулона сила притяжения пропорциональна произведению зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между этими телами. Если подставить нулевое расстояние, то получим в знаменателе дроби нуль, то есть сама дробь должна принимать бесконечное значение. Некоторые авторы всерьез считают, что такая подстановка правомочна. Но ведь закон Кулона сформулирован для точечных частиц, то есть для того случая, когда расстояние между частицами намного больше, чем размеры частиц. Безусловно, нулевое расстояние не может быть много больше, чем размеры частицы. Следовательно, в закон Кулона принципиально нельзя подставлять нулевое расстояние. Следовательно, есть область электростатики, в которой закон Кулона не справедлив. Его следует исправить, прежде чем применять в этой области. Уравнение, описывающее силу взаимодействия заряженных частиц в том случае, когда расстояние между ними соизмеримо с их размерами, должно быть другим. Это должно быть, видимо, такое соотношение, которое переходит в закон Кулона, если расстояние подставить большим, на несколько порядков больше, чем размеры

тел.

Поэтому сформулируем уточненное утверждение, а именно: **Утверждение 2:** «Математика, примененная к математической записи физических законов, дает требуемые новые знания о физических явлениях лишь в том случае, если эти законы действуют в условиях, используемых при вычислении».

Иными словами, всякая математическая запись закона справедлива в ограниченных рамках, и лишь в этих рамках справедливо Утверждение 1.

Но сама справедливость Утверждения 1 следует лишь из здравого смысла, из свойств человеческого мозга воспринимать, понимать и описывать явления живой и неживой природы. Поэтому стоит лишь отказаться от здравого смысла как аргумента науки, следует отказаться и от Утверждения 1, как от необоснованного умозаключения.

Таким образом, отказ от теории относительности есть отказ отказываться от здравого смысла. Возвращение в теорию здравого смысла есть возвращение на научную почву.

ШАТКОСТЬ АРГУМЕНТОВ ПРОТИВ ЗДРАВОВОГО СМЫСЛА

Прежде чем согласиться отказать доверии здравому смыслу, давайте порассуждаем, насколько далеко готовы мы зайти в отказе здравому смыслу на существование. Почему уравнения, которые, возможно, выведены из не вполне корректных оснований, должны для нас представлять большую убедительность, чем, скажем, здравый смысл, который помимо всего прочего является единственным основанием для того, чтобы вообще пытаться объяснить что-либо с помощью какой-либо теории.

Ничто кроме здравого смысла не является основанием для того, чтобы верить уравнению больше, чем свидетельству какой-либо гадалки. Только пресловутый здравый смысл является основанием для того, чтобы считать законы физики познаваемыми, уравнения, выражающие эти законы в математической форме хоть сколь-нибудь полезными для исследований процессов. Если мы не доверяем здравому смыслу, не следует доверять и уравнениям. Если же мы доверяем уравнениям, то не следует отказываться в доверии здравому смыслу, поскольку это – две неразрывные компоненты познания явлений природы.

Естественные законы изучаются на следующих основах.

Во-первых, на основе философского предположения, что таковые законы существуют, обладают неким единством, и соблюдаются всегда.

Во-вторых, на основе того, что таковые законы можно приближенно описать некоторыми математическими соотношениями

(поскольку всех величин, характеризующих физические процессы и явления знать невозможно).

В-третьих, на основе понимания, что любое математическое выражение любого закона имеет ограниченные пределы применимости.

Именно это в совокупности называется «здоровый смысл». В арсенал здравого смысла входят следующие тезисы.

Природа, мир, все внешнее по отношению к любому человеку, является объективно существующей данностью. Не зависимо от отношения любого конкретного человека к этой данности, она существует, движется своими частями (развивается) по своим законам, которые также не зависят от понимания или непонимания их любым конкретным человеком в частности и всем человечеством в совокупности.

Даже если все человечество ошибается в отношении какого-то закона или факта, данный закон или факт не будет подстраиваться под мнение человечества о нем, и в этом смысле он объективен, а понимание его субъективно. Понимание закона природы может измениться, закон природы изменяться не может.

Природа состоит из материи – вещества во всевозможных ее формах, которое заполняет пространство. Количество вещества характеризуется массой. Но даже если мы ошибаемся в количественной оценке вещества, это не дает повода или причины отказаться от концепции того, что материя существует объективно.

Материя обладает энергией. Энергия может переходить из одной формы в другую и передаваться от одной материальной субстанции к другой.

Пространство трехмерно и безгранично. Невозможно представить конец пространства. Невозможно представить четырехмерное пространство, и пространство еще большей размерности. Можно представить двумерное подпространство, но оно неразрывно связано с пониманием трехмерного пространства, в котором только и может существовать двумерное подпространство. Рассуждение, распространяемое «вниз» от трехмерного к двумерному, и от двумерного к одномерному, не имеет продолжения по аналогии (по индукции) в верх от трехмерного к четырехмерному и выше, кроме как в области абстрактной математики. В реальном физическом мире четырехмерного пространства нет и быть не может. Тот факт, что можно придумать и математически описать пространство большей размерности, не дает никакого основания считать это реальностью. Имеется множество всяческих продуктов полета фантазии, которые можно описать, в том числе и математически. Возможность математического описания не доказывает истинности, реальности того образа, который может быть

изложен в уравнениях.

Движение или развитие имеет свою причину, которая состоит, во-первых, в законах природы, во-вторых, в фактическом состоянии той части материи, в которой данное движения происходит.

Координата в пространстве – это искусственно вносимое понятие для получения меры удаленности предметов друг от друга. Координаты позволяют указывать местоположение объектов друг относительно друга. Поскольку пространство не ограничено во всех направлениях, у координат нет объективного начала и объективного конца. Поэтому начало координат можно привязать к чему угодно. Это же относится и к ориентации осей по направлению.

Привязка координат к любому физическому телу или объекту, хотя и понятна интуитивно, оправдана практически, и имеет свои давние традиции, все же недостаточно корректна, поскольку такая привязка всегда вносит свои искажения в получаемые математические соотношения, описывающие физические законы.³

Привязка координат к естественным ориентирам (Земле, Солнцу) имеет свои традиции, в большинстве задач оправдана или может быть оправдана малостью влияния движения системы в целом. Для создания и использования безошибочной теории в этом вопросе требуется тщательность, а ее отсутствие может быть причиной нестыковки некоторых экспериментальных данных с теоретическими. Приходится признать, что выделить единственную неподвижную систему во множестве вариантов, с учетом всеобъемлющего движения всех астрономических объектов, крайне сложно или вовсе невозможно.

Поскольку координатные оси – это мыслительная абстракция, совершенно бессмысленно говорить о сжатии или растяжении этих координат, также как об их искривлении, поскольку любое искривление или изменение масштаба может быть обнаружено, продемонстрировано или опровергнуто лишь относительно абстрактной неизменной системы координат, каковой эта система и является.

Если бы даже координатная система искривлялась, это никак невозможно было бы выявить экспериментально, поскольку вместе с ней искривлялось бы все сущее, и друг

³ Привязка системы отсчета к центру масс Солнца, например, не тождественна привязке к центру масс Солнечной системы. В системе, связанной с центром масс Солнечной системы, Солнце также движется, откликаясь на совокупность притяжения всех тел этой системы, и это подтверждает первый закон Ньютона, согласно которому в данном случае не только Солнце притягивает планеты, но и планеты притягивают Солнце. Если же привязаться к центру масс Солнца, то Солнце остается неподвижным при всех взаимодействиях его с планетами, то есть в такой системе не выполняется первый закон Ньютона.

относительно друга они оставались бы не искривлёнными. Поэтому здравый смысл отказывается признавать искривление координатной системы, как основы для описания всех явлений в пространстве. При этом не возбраняется обсуждать искривление любых физических объектов, но это иное дело, и в этом случае именно так и следует говорить.

Не существует принципиального запрета перемещений в пространстве. Это отличает пространственные координаты от времени.

Время – это искусственно вносимая абстракция для описания очередности событий и явлений в природе. Время не имеет никакого физического смысла кроме как «ось отсчета». Это роднит понятие времени с понятием координаты в пространстве.

Невозможно перемещаться во времени иначе, как вместе с ним. Это принципиально отличает время от координат пространства. Это отличие не единственное, но важнейшее.

У времени нет начала и не будет конца. Время не замедляется и не ускоряется, оно течет своим темпом, универсально для всей вселенной. Время не стареет и не изнашивается, ход времени не связан с потреблением или выделением энергии, движение всего сущего во времени не изменяет ни количества материи, ни количества энергии во вселенной.

Количество материи сохраняется во всех процессах, так же, как и количество энергии.

В некоторых опытах выявляется, что эффективная масса тел может изменяться вследствие изменения видов движения, в котором эти тела задействованы – это относится к области элементарных частиц, к массе ядер. Это дает основание предположить, что движение может изменить (например, увеличить) инерционность системы, в которой это движение происходит. Тем самым возникает основание для того, чтобы некоторым образом установить аналогию между массой (которая является мерой количества вещества) и энергией (которая является мерой количества движения). Это пока не дает оснований полностью отождествлять энергию и массу, однако, может дать ключ к пониманию сути того, что называется элементарными частицами. А именно: элементарными частицами можно предположительно назвать системы движущихся более мелких частиц в такой форме движения, которая сохраняет свою устойчивость крайне долго, практически бесконечно (за исключением процессов их распада под влиянием внешних столкновений). Это заставляет предположить наличие более мелких структур (мельче самой известной элементарной частицы), существование механизма их полевого взаимодействия, а также предположить, что скорость их движения намного превышает скорость света (в вакууме), поскольку только такое предположение позволяет фиксировать элементарные частицы

как единое целое даже в тех случаях, когда они движутся со скоростями, соизмеримыми со скоростью света. Из этого следует заключить не только возможность, но и необходимость движения некоторых материальных объектов (субэлементарных частиц) со скоростью на порядки более высокой, чем скорость света в вакууме.

Невозможность наблюдать какое-либо явление само по себе не является доказательством невозможности этого явления как такового.

Абсолютно очевидно, что в любой физической задаче можно и нужно указать единственную неподвижную (выделенную, предпочтительную) систему отсчета. Вследствие этого столь же очевидно, что во вселенной объективно существует единственная предпочтительная покоящаяся система отсчета, даже если в настоящее время наука не располагает достаточной методикой для обнаружения этой единственной системы (см. предыдущий пункт).

Вселенная не расширяется. Для того, чтобы наука приняла теорию расширения вселенной, не достаточно всего лишь обнаружения сдвига частоты в излучении от звезд. Этот сдвиг объясняется потерей энергии светом в межзвездном веществе. Наличие вещества в космосе многократно доказано. В том числе многократно доказано наличие разреженного газа. Наличие явления дисперсии света в газах также многократно доказано. Наличие дисперсии света при распространении его в космическом пространстве, таким образом, несомненно, доказано, неопровержимо. Следствием дисперсии должен быть сдвиг спектров излучения в красную область. Это естественное следствие уже известных естественных законов, не имеющих ничего общего с предположением о расширении вселенной. Поэтому предположение о расширении вселенной ни на чем не основано. Также это предположение дополнительно опровергается невозможностью причин. Сама по себе невозможность причин не достаточна для опровержения, но в совокупности с реальностью причин сдвига спектра это является бесспорным и окончательным аргументом, уничтожающим какое-либо основание для принятия гипотезы расширения вселенной.

Ошибочная гипотеза расширения потребовала ошибочного предположения о неких таинственных темных массах, темной материи или темной энергии, что, во-первых, чрезвычайно фантастично, во-вторых, совершенно бездоказательно, в-третьих, даже при условии принятия, никак не объясняет ни расширения, ни ускорения при расширении. Обширная темная масса в совокупности не должна давать никакого дополнительного гравитационного поля, так как все векторы

такого поля от отдельных фрагментов этой массы должны уравновесить друг друга. «Растаскивать» вселенную в разные стороны не может никакая модель «тёмной материи».

Гипотетические «чёрные дыры» - гипотеза, не имеющая ни оснований, ни подтверждений, от ее принятия нет ни пользы, ни украшения.

Гипотеза черных дыр основана на ошибочном предположении о возможности безграничного увеличения массы космического объекта вследствие притяжения частиц из космоса. На практике увеличение не может быть безграничным, поскольку, чем больше масса объекта, тем больше внутреннее давление в нем, тем сильнее сближаются ядра атомов, и при критическом сближении возникает ядерная или термоядерная реакция, что приводит к выбросу вещества из этого тела вследствие взрывного разогрева. По мере накопления массы небесное тело нагревается, по мере дальнейшего накопления массы оно нагревается еще больше, за критической массой тело перестает быть стабильным и может разрушиться, давая начало новым космическим телам. Поэтому в природе не существуют и не могут встречаться объекты с массой, выше некоторой критической величины. Если бы такого явления не происходило, то есть если бы масса объекта могла накапливаться неограниченно, то по мере накопления массы объем, контролируемый силами тяготения этого тела, непрерывно возрастал бы, что приводило бы к ускорению накопления массы. В этом случае возникла бы положительная обратная связь: чем больше масса, тем быстрее она растет, чем быстрее растет масса, тем она больше и так до бесконечности. То есть в этом случае первая же спонтанно возникающая черная дыра постепенно поглощала бы все большее и большее количество материи, что привело бы к схлопыванию всей материи в одной точке пространства, именно в месте существования этой черной дыры. В этом случае всякие иные формы бытия материи закончились бы, мир был бы одной гигантской черной дырой и пустотой вокруг нее. Это не так, в чем любой может убедиться. Поэтому гипотеза черных дыр, выведенная чисто теоретически, ошибочна.

Большое желание физиков добиться известности приводит весьма часто к заявлениям о том, что найдено экспериментальное подтверждение той или иной знаменитой теории. Поэтому публикуются утверждения о том, что найдены черные дыры, даже о том, что в центре каждой галактики имеется черная дыра, и даже о том, что даже непосредственно в Солнечной системе имеется несколько черных дыр. Подобные утверждения категорически ошибочны. Во-первых, их авторы демонстрируют полное непонимание того, какой теоретический феномен называется черной дырой. Во-вторых, зафиксировать «черную дыру» можно было бы лишь по

наличию некоторой непрерывно увеличивающейся в диаметре светящейся сферы, состоящей из вещества, которое с гигантским ускорением притягивается к центру черной дыры, и поэтому, естественно, достигает релятивистской скорости, то есть скорости, большей, чем скорость света в данной газовой атмосфере. Это бы вызвало свечение вследствие эффекта Черенкова.

ГИПОТЕЗА АБСОЛЮТНОСТИ

Теорию относительности правильнее было бы назвать «Гипотеза Абсолютности». Во-первых, теорией называют только то, что доказано. К теории относительности такое название не применимо, она не только не доказана, она многократно опровергнута. Во-вторых, в ней абсолютизируется «скорость света в вакууме» в любой системе, хотя не из каких опытов этого не следует.

Многие ошибочно считают, что в опыте Майкельсона (или Майкельсона-Морли) измерялась скорость света в вакууме, и поскольку опыт не дал сдвига интерференционных полос, то этот опыт указывает на постоянство скорости света в вакууме.

Опыт Майкельсона проделывался не в вакууме, а в воздухе. Между вакуумом и воздухом имеется принципиальная разница. Если вакуум – это в терминах Эйнштейна «ничто», то воздух – это никакое не «ничто». Воздух – это нечто. Воздух – это среда, в которой распространяются звук, тепло, и в которой свет при распространении теряет энергию. Вакуум – это такая часть пространства (среда или не среда), в которой звук и тепло не распространяются. Предположение о том, что в вакууме свет не теряет энергию при своем распространении, не зависимо от верности или ошибочности этого предположения, не имеет никакого отношения ни к опыту Майкельсона, ни к эффекту Хаббла. Эффект Хаббла – это сдвиг частот излучения в спектрах свечения звезд. Этот сдвиг дал основание предполагать, что звезды удаляются от нас. Свет звезд распространяется не в вакууме, а в межзвездном газе. Этот газ вакуумом не является. Дисперсия света в нем – это естественное физическое явление. Удивляться этому явлению по меньшей мере странно. Поэтому странным было бы, если бы свет звезд не имел этого сдвига частот. Наличие этого сдвига всего лишь характеризует оптическую плотность, помноженную на расстояние, которое указанный свет прошел. Расстояния гигантские, столь большие, что воображению человека трудно его адекватно представить. Трудно, но не невозможно, потому что все логично и интуитивно понятно.

В опыте Майкельсона не измеряется скорость света. Он измеряет разность фаз света

в двух пучках. Поэтому результаты опыта Майкельсона никак не указывают на постоянство скорости света. Они указывают на постоянство разности фаз, и при этом совершенно очевидно, что если в каждом плече возникнет приращение фазы, то это никак не повлияет на разность фаз. Одинаковое приращение фаз в каждом плече никак не опровергается, поэтому его нельзя отрицать. Опыт Майкельсона никак не может опровергнуть предположение о том, что скорость света в двух противоположных направлениях отличается. Следовательно, опыт Майкельсона никак не доказывает никаких свойств скорости света, не доказывает ее инвариантность в разных направлениях.

Опыт Майкельсона проводился в воздухе, в нем измерялась разность фаз, так почему же по результатам этого опыта сделаны выводы в отношении скорости света и применительно к этой величине в вакууме? Это же крайне нелогично. И объект не тот (воздух, а не вакуум), и измеряемая величина не та (фаза, а не скорость).

Если изучить основы теории относительности и заглянуть в конец ее изложения, то получается любопытный парадокс. Основами является только опыт Майкельсона. Выводом является искривление пространства, гравитационные линзы, черные дыры, нарушение принципа причинно-следственной связи, невозможность одновременности, замедление времени, сокращение координат при движении, субъективная объективность и многое другое.

Субъективная объективность – это признание объективным каждое из множеств измерений, которые могут быть сделаны в разных системах координат. При этом каждое из указанных измерений может кардинально противоречить другим. Речь вовсе не о том, что в одной системе длина поезда может восприниматься на несколько миллиметров короче или длиннее, чем в другой. Здесь речь идет о том, что, с одной стороны, всякое движение приводит к сокращению предметов (и никогда не приводит к увеличению их длины – что крайне непоследовательно и странно), но при этом всякое подобное измерение абсолютно точно и верно, не субъективно, а объективно. То есть длина поезда в системе А отличается от его длины в системе Б, но при этом оба эти результата верны. Это – субъективная объективность или объективная субъективность.

Что может предложить вместо этого информационный подход: измерение в системе А ошибочно, измерение в системе Б также ошибочно. Отличие всех результатов измерений в разных системах, совершающих движения друг относительно друга, ошибочны вследствие внесения искажений, порождаемых движениями этих систем. При этом обязательно допускается единственное истинное значение любой

измеряемой физической величины, даже при том условии, что ни один эксперимент не дает возможности измерить это истинное значение без ошибок. Невозможность безошибочного измерения не отвергает возможности точного значения этой величины как таковой.

Точное значение какой-то физической величины – это объективный факт природного бытия. Возможность точного измерения – это субъективные особенности восприятия с учетом технических и иных возможностей используемых средств.

Пример 43. Первобытный человек, найдя кусок природного магнита, не смог бы измерить напряженность магнитного поля вблизи этого магнита. Без соответствующих инструментов эта физическая величина была бы принципиально ненаблюдаемой для него. Однако надо признать, что эта величина бы все же существовала, не зависимо от возможности ее измерить. И если бы два подобных куска оказались бы в руках этого человека, то он смог бы обнаружить их притяжение или отталкивание, в зависимости от ориентации. Появление возможности зафиксировать явление не тождественно возникновению явления. Это, видимо, очевидно для всех. Но столь же должно быть очевидным и то, что отсутствие возможности зафиксировать явление не тождественно отсутствию самого явления. Отсутствие возможности точного измерения не тождественно отсутствию объективного единственного точного значения этой величины.

Вернемся к выводам теории относительности. Если с длинами все всего лишь не понятно, то с понятием одновременности получается уже просто невозможная картина. А именно: если в системе А событие С1 происходит раньше, чем событие С2, то в системе Б событие С1 может происходить позже события С2. И опять-таки оба эти результата считаются в равной степени верными. То есть каждое из этих событий одновременно абсолютно объективно является и опережающим, и отстающим. Но если мы признаем, что некоторые события являются прямым следствием других событий, и между ними можно однозначно установить причинно-следственную связь, то оказывается, что наличие такой связи никак не делает необходимым причине быть раньше следствия, а следствию быть раньше причины. Сначала может произойти следствие, а затем – причина. Сначала распадается атом, а затем, в его ядро залетает нейтрон, который как раз и явился причиной этого распада.

Пример 44. Ну это все равно, как если бы сначала сгорает поленица дров, а затем ее поджигают. Или сначала гвоздь входит в доску, а затем мы ударяем по его шляпке. Получается какой-то фатализм, ведь если гвоздь уже забит, мы никак не можем не ударить по нему, поскольку иначе получится, что он сам забился

в доску. Отказ от объективности понятия одновременности тождественен отказу от объективности понятия причинно-следственной связи. Отказ от объективности причинно-следственной связи тождественен отказу от науки как таковой.

В такой нелогичной картине мире, рисуемой теорией относительности, следствие может являться причиной того, что мы ранее считали причиной, а причина может стать следствием того, что мы полагали следствием. Они не просто поменялись во времени, но они уже активно воздействуют друг на друга, только в неверном направлении.

Итак, мы ознакомились с истоками и ознакомились с выводами теории и увидели, что из отсутствия сдвига интерференционных картин в интерферометре опыта Майкельсона делается вывод о субъективности причинно-следственных связей, о том, что следствие может происходить раньше причины. Где логика?

А логика состоит в том, что после того, как создатели теории (точнее гипотезы) получили парадокс, они должны были бы исправить какой-то из исходных тезисов.

Перечислим вкратце противоречия, к которым приводит принятие теории относительности.

1. Нарушение принципа причинно-следственной связи. Получается, что следствие может существовать раньше причины. При этом, не говорится о том, что такое нарушение может иметь место при ошибочном восприятии ситуации вследствие движения какого-либо наблюдателя. Утверждается, что именно так оно и есть.

2. Нарушение принципа сложения скоростей. Можно получить разные результаты, и при этом утверждается, что все они одинаково истинны.

3. Полнейший абсурд в плане строения Вселенной и понимания о том, может ли она иметь начало и конец как во времени, так и в пространстве. Верно сказано, что как бы ни было сложно представить бесконечную Вселенную - это единственное, с чем можно согласиться, поскольку представить конечную Вселенную тем более невозможно, это какое-то безумие.

4. Абсурд в плане начала времени и конца времени. Время бесконечно, оно не сжимается, не растягивается, это – всего лишь система отсчета для разграничения событий по их последовательности. Можно замедлить часы, можно их ускорить, но нельзя замедлить или ускорить время. Часы – инструмент для измерения. Инструмент может давать погрешность. Время – не физическая величина, это абстракция, без использования которой невозможно описать явления. Эта абстракция не может изменяться, она идеальна. А в теории относительности утверждается об изменении темпа времени в зависимости от движения

системы отсчета, все это насильно навязывается как "научный факт", хотя он не является ни фактом, ни научным.

5. Если скорость света можно измерять (и вообще говорить о ней хоть что-то определенное) лишь применительно к системе отсчета, а таковой может быть лишь «массивное тело», то следует поступать, если свет был излучен многие миллиарды миллиардов лет назад далекой звездой? Допустим, что когда-то звезда испустила излучение, потом она взорвалась и перестала существовать. А свет ее продолжал двигаться в пространстве. Предположим, что ни Солнца, ни ее планет тогда еще не было. Скорость света в тот период, когда источника уже не было, а приемника еще не было, невозможно измерять «объективно» относительно хоть какой-то системы отсчета. Таковой системы быть не может. Можно выбирать произвольно какие-то звезды «поблизости», но это неправильно, потому что они могут двигаться друг относительно друга с большой скоростью. И нет основания для предпочтения одной из них перед остальными. Получается, что скорость объективного света не может объективно существовать в тот период, пока источник объективно перестал существовать, а приемник объективно еще не возник. Это антинаучно. Единственный выход из этой проблемы - признать все же существование единственной неподвижной системы, которая связана со средой. Поэтому приходится отказаться от основного постулата теории относительности.

Как ни странно, при некоторых обоснованных дополнениях, получается понятная и логически стройная картина мира. Она стройна и для макромира, и для микромира. Она объясняет «необъяснимые чудеса» и для элементарных частиц, и для галактик.

СУТЬ ИНФОРМАЦИОННОГО ПОДХОДА

1. Вселенная бесконечна во времени и в пространстве. «В среднем» вся ее масса распределена более-менее однородно, и нет никаких оснований утверждать, что она каким-то образом движется в пространстве. Можно принять гипотезу «покоящейся вселенной как таковой», признавая, что и звезды, и галактики и метagalaktiki могут двигаться, никакого запрета на движение нет, но для движения должна быть причина - либо инерция, либо сила гравитации.

2. Никакого «расширения» вселенной нет, не было и не будет, не ожидается. Имеется элементарное замедление света в среде, которая вакуумом, кстати, и не является, поскольку в так называемым «безвоздушном пространстве» между планетами и между звездами все же имеются некие газы, пусть и крайне разреженные. Но ведь и путь света не мал. Поэтому бесконечно малая плотность,

умноженная на бесконечно большое расстояние, преодолеваемое светом, дает конечную величину сдвига частоты. Все предельно просто. Никакого чуда.

3. Поскольку нет расширения, нет оснований утверждать, что был взрыв. А ведь если бы даже мы поверили, что взрыв был, это бы не объяснило того факта, что чем дальше объекты, тем больше сдвиг частоты (или смещение длины волны в иной терминологии). При принятии дисперсии (затухания энергии) света, совершенно очевидно, что чем объекты дальше, тем сдвиг частоты должен быть больше. Это естественно и это правильно. При принятии теории разбегания получается, что вселенная разбегается всеми своими компонентами с ускорением. А откуда может быть ускорение? Причем, ускорение по величине, то есть именно прибавление скорости? Должна быть сила. Внешняя сила! Но внешнюю силу нельзя объяснить даже если предположить внешние большие массы, поскольку их действие бы нейтрализовалось по закону сложения векторов сил.

4. И, наконец, парадоксы. Если в теории возникает парадокс, то это причина искать ошибку в теории.

В известном парадоксе близнецов мы имеем полнейшее право применения принципа относительности, который гласит, что выбор системы отсчета может быть любым. В этом случае, постареть может как близнец, который остался на Земле, так и близнец, который летал. То есть разница в их возрасте может стать как со знаком плюс, так и со знаком минус. Единственное решение этого парадокса состоит в том, что разница равна нулю. Плюс ноль равен минус нулю.

В отношении парадокса близнецов – можно сформулировать суть парадокса: рассуждения приводят как к увеличению, так и к уменьшению интересующей нас величины. Также можно сформулировать необходимый вывод: значит, следует признать, что величина не изменяется.

Пользуясь такой логикой, Галилей открыл закон о равенстве ускорения всех тел вблизи поверхности Земли: если два тела соединить вместе, то их ускорение должно увеличиваться, так как масса возросла, но и уменьшаться, так как тело с меньшей массой должно тормозить тело большей массы. Следовательно, все тела падают в вакууме с одинаковым ускорением и одинаковой скоростью. Никакими экспериментами он такой закон открыть бы не смог, и науке известен тот метод, который он использовал. Правда, об этом предпочитают не писать широко. Этот вид парадоксов позволил Галилею открыть истинный закон о падении тел в безвоздушном пространстве вблизи поверхности Земли. Галилей владел инструментарием мысленного эксперимента в совершенстве.

Этот же вид парадокса ввел Эйнштейна в заблуждение, поскольку он сделал совершенно ненаучный вывод: «Этот парадокс кажущийся, поскольку мои уравнения убеждают меня в моей правоте». Эйнштейн не владел инструментарием мысленного эксперимента. Худшего не придумаешь!

ПРИКЛАДНОЙ АСПЕКТ ТЕОРИИ

О прикладном аспекте теории можно писать много, объем данной статьи не позволяет широко распространяться о нем. Очевидно, что верное описание действительности полезно и при решении практических задач микромира, и при исследовании космоса. Этот аспект полезности верной теории и вредности ошибочной теории можно обсуждать отдельно.

Автору представляется достаточным утверждение о том, что ошибочное мировоззрение вредно само по себе. В данном случае можно обратиться к авторитетам, а именно: в статье [13] сказано: «Несколько лет назад муниципалитет г. Монцы (Италия) запретил любителям домашних животных соержать золотых рыбок в круглых аквариумах. Инициаторы подобного странного решения объяснили, что это жестоко, потому что из-за искривленных стенок их жилища у аквариумных обитателей создается искаженное представление об окружающей мире».

Думаю, читатель согласится, что если обманывать золотых рыбок жестоко, если недопустимо создавать у них впечатление о том, что мир искривлен, тогда как он на самом деле не искривлен, но насколько же жестоко по отношению к человечеству еще со школьной скамьи внушать ученикам представление о том, что вселенная расширяется, что вселенная искривлена, и что ее размерность отличается от трех, что во времени можно путешествовать, что при соответствующем выборе траектории путешествия можно достичь будущего, практически не постарев, что в мире существуют гигантские черные дыры, всасывающие материю безвозвратно, что вселенная когда-то зародилась и что она вся когда-то перестанет существовать или процесс ее формирования пойдет заново. Насколько жестоко внушать, что пространство не бесконечно, что время также не бесконечно, что и пространство, и время имеют свой предел. Глобальная жестокость такого внушения состоит в том, что представить такое принципиально невозможно. Никто не может объяснить, что такое «конец пространства», или «конец времени», или «начало времени». Ведь если существует «конец пространства», то, с одной стороны, далее этого пространства ничего нет, но, с другой стороны, ничто – это тоже пространство, и термин «далее» сам по себе указывает на то, что пространство имеется и

далее, пусть даже оно заполнено иной формой материи. Точно также не может быть объяснено, что такое «начало времени», поскольку само понятие «начало» может иметь смысл только в том случае, если время все же начала не имеет, и оно существует и до этого начала.

Ссылками на многие источники можно доказать, что вся теория относительности основана только и исключительно на опыте Майкельсона [1–9]. Даже там, где говорится о том, что теория относительности основана на большем количестве экспериментальных сведений, например, в работе [5], далее следует признание того, что единственным существенным основанием для нее является все же только опыт Майкельсона. В частности, Бриллюэн [5] приводит как основание теории относительности смещение перигелия Меркурия, а также «искривление» траектории света вблизи Солнца, но далее сам же пишет, что смещение перигелия Меркурия можно объяснить многими другими теориями. Кроме того, это смещение не является прогнозом теории относительности: Эйнштейн при написании заметки об этом явлении знал и использовал готовые экспериментальные данные об этом явлении, в его статье на эту тему нет прогноза как такового, по сути, там содержится лишь утверждение, что известную периодическую функцию, взятую из эксперимента, можно аппроксимировать набором гармонических функций, при этом можно ограничиться лишь первым членом, то есть чистой синусоидой. Далее амплитуда, фаза и частота этой синусоиды вычисляются из известных экспериментальных данных, откуда получается «теоретическая зависимость». В этой статье фактически нет никакого следа от теории относительности или иной теории, вся теоретическая часть состоит в том, что периодическую функцию с определенной степенью точности можно представить ее гармонической моделью. С этим никто не спорит, но теория относительности тут не при чем. Что касается отклонений света вблизи Солнца, то ничего иного нельзя было бы и ожидать, поскольку Солнце окружено плотной прозрачной не светящейся атмосферой, представляющей собой газовую сферическую линзу. Было бы удивительно, если бы свет звезд, проходя через эту линзу, распространялся прямолинейно. Линейная оптика такого не допускает. Такую линзу также называют дисперсионной, поскольку прохождение света в газе сопровождается рассеянием энергии, дисперсией. Совершенно аналогично прохождение света звезд в межзвездном газе (сколько бы ни был он разреженным) следует описать с применением явления дисперсии, поэтому потеря энергии и смещение спектра в красную область является неминуемым следствием такого прохождения света.

Каждый читатель хоть раз наблюдает красное Солнце на закате. Этот красный свет также объясняется свойствами атмосферы Земли. Если бы Земля не содержала атмосферы, но при этом можно было бы наблюдать с ее поверхности Солнце, то наблюдателю Солнце виделось бы белым и при его восходе, и в зените, и на закате. Если бы звезды располагались в идеальном вакууме, не было бы явления красного смещения. Окраска Солнца на закате вовсе не означает, что Солнце в этом случае удаляется от Земли. Эта окраска вызвана тем, что красный свет относительно слабо рассеивается в атмосфере Земли, и поэтому большая его часть распространяется в ней практически прямолинейно, тогда как фиолетовый цвет, а также синий и голубой в основном, рассеиваются, поэтому большая их часть распространяется вследствие многократного рассеяния по самым различным траекториям, и достигают зрения наблюдателя с различных направлений атмосферы. Поэтому небо видится голубым, Солнце в зените – желтым, а на закате – красным. Теория о том, что все объекты вселенной разбегаются, да еще с ускорением, ошибочна, принудительное изучение этой теории (она входит в обязательный курс физики) является более жестоким действием, нежели размещение аквариумных рыбок в круглом аквариуме.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Дж. Тригг. Решающие эксперименты в современной физике. М. Мир. 1974. 160 с.
- [2] С.Н. Артеха. Критика основ теории относительности. М. Едиториал УРСС. 2004. 224 с. ББК 22.313.
- [3] Дж. Вебер. Общая теория относительности и гравитационные волны. М. Изд-во Иностранной литературы. 1962. 272 с.
- [4] В. Курганов. Введение в теорию относительности. М. Мир. 1968 г. 180 с.
- [5] Л. Бриллюэн. Новый взгляд на теорию относительности. М. Мир. 1972. 144 с.
- [6] Дэвид Бом. Специальная теория относительности. М. Мир. 1967. 288 с.
- [7] Климент Дьюрелл. Азбука теории относительности. М. Мир. 1964. 164 с.
- [8] Секерин В.И. Теория относительности – мистификация века. Новосибирск. 1991.
- [9] Ю.Б. Румер, М.С. Рывкин. Теория относительности. М. Учпедгиз. 1960. 212 с.
- [10] И.Д. Новиков. Как взорвалась вселенная. М. Наука. 1988. 176 с. ISSN 5-02-012881-9
- [11] Д. Шама. Современная космология. М. Мир. 1973. Пер. с англ. 254 с.
- [12] <http://universe-tss.su/>
- [13] С. Хокинг, Л. Млодинов. Неудовимая единая теория всего. В мире науки. 2010. № 11 – 12 (ноябрь – декабрь), с. 6–9.

Information Approach to the Problems of Metrology and Physics.

V.A. Zhmud

Требования к публикациям в научном электронном журнале «Автоматика и программная инженерия»

ТЕМАТИКА ЖУРНАЛА

Автоматика, робототехника, автоматизированные системы, программные системы и средства (программная инженерия), защита информации, сетевые технологии, программные платформы, мультиагентные системы, облачные технологии, инновации, информационные технологии, моделирование систем, свободное и открытое программное обеспечение.

ЦЕЛЕВАЯ АУДИТОРИЯ ЖУРНАЛА

Научные, педагогические и инженерные кадры, аспиранты, докторанты и студенты, представители бизнеса в области информационных технологий и автоматике.

ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ

К опубликованию принимаются оригинальные научные статьи, ранее не опубликованные ни в каких средствах информации, включая научные и иные журналы и электронные сайты.

Не допускается дословное цитирование без кавычек из чужих источников (плагиат) и из своих источников (автоплагиат), допускается опубликование ранее опубликованных иллюстраций и уравнений, если это требуется для понимания текста. Иллюстрации из чужих источников не желательны кроме случаев, когда без их дублирования статью невозможно понять; в этом случае они должны быть снабжены ссылками на эти источники.

Статья должна содержать новые научные результаты и соответствовать тематике журнала. Иллюстрации – черно-белые или цветные (цветные – предпочтительно).

Формат страницы: А4, текст в две колонки, шрифт *Times New Roman*, размер 10 пт через один интервал, заголовок – в одну колонку шрифт 24 пт, литература – 8 пт. Если рисунок, формула или таблица требуют использования полного пространства двух колонок, разрешается это делать в разрыве текста из двух колонок с последующим восстановлением двух колонок. Не следует нарушать внешние границы текста.

Информация об авторах дается в конце статьи, желательна фотография, электронная почта. Перечень авторов дается на первой странице (только фамилии, И.О. и место работы).

Статья обязательно должна содержать аннотацию (100 – 200 слов) и ключевые слова (8 – 10 слов или словосочетаний), литературные ссылки, необходимые для понимания статьи и/или с указанием источников цитирования. При этом ссылки на собственные публикации не должны преобладать, желательно, чтобы их количество не превышало 30% общего числа ссылок.

Мы просим авторов не использовать автоматическую нумерацию рисунков, таблиц, разделов. Автоматическая нумерация списка литературных источников допускается. Также мы просим не использовать двойную и более сложную нумерацию таблиц и рисунков, а также следить за соответствием этой нумерации ссылкам на нее в тексте. Не желательно использовать рисунки или таблицы без ссылки на них в тексте. Если рисунок или таблица единственные, они не нумеруются.

РЕЦЕНЗИРОВАНИЕ

Присланные статьи подвергаются внутреннему анонимному рецензированию. Редакционная коллегия вправе отклонить статью от опубликования с указанием причин этого отклонения или предложить доработать статью по замечаниям рецензента.

Статьи, написанные в соавторстве действительных членов РАН или РАЕН, а также статьи, сопровождающиеся положительной рецензией действительных членов РАН или РАЕН (твердая копия с оригинальной подписью, заверенной по месту работы, пересылается по почте), могут быть опубликованы по ускоренной процедуре рецензирования. При этом не исключается предложение редакции о редакторской правке и/или о лучшем качестве иллюстративного материала.

Если по мнению редакционной коллегии к тексту статьи требуются примечания, редакционная коллегия вправе включать таковые, извещая предварительно об этом авторов. Авторы могут по своему усмотрению внести исправления в текст (устраняющие необходимость примечания), либо согласиться с примечанием, либо настаивать на опубликовании статьи без примечаний. В последнем случае редакционная коллегия вправе поместить статью в разделе

«Дискуссии».

ОТВЕТСТВЕННОСТЬ АВТОРОВ

Ответственность за научное содержание статей и за качество перевода на английский язык лежит на авторе (авторах) публикации. Факт направления статьи в редакционную коллегию трактуется редакционной коллегией как заключение устного договора на передачу прав опубликования данного материала редакционной коллегии, в случае, если статья не будет отклонена. При этом редакционная коллегия обязуется обеспечить научное рецензирование, редактирование и опубликование с открытым доступом, а авторский коллектив обязуется обеспечить отсутствие плагиата, включая автоплагиат, и выполнение других требований, опубликованных в этом разделе.

Российские авторы должны присылать перед окончательным опубликованием статьи скан-файл **экспертного заключения** о возможности **открытого опубликования** статьи в ее окончательном виде. Бумажный вариант досылается позже. Если бумажный вариант не получен, ответственность за его наличие и за совпадение электронного варианта с бумажным вариантом лежит на авторском коллективе.

Все вопросы по опубликованию можно уточнить по электронной почте.

ЯЗЫК ПУБЛИКАЦИИ

Научный журнал Автоматика и программная инженерия (АиПИ) издается на двух языках: русском и английском. Английская версия журнала выходит позже. Авторам предлагается присылать на адрес главного редактора oaonips@bk.ru свои статьи для публикации в формате *Word-2003* на двух языках. Допускается присылать статьи для первого рецензирования на одном языке (русском или английском) с последующим обязательным предоставлением окончательной версии статьи на двух языках. Подписи на иллюстрациях также должны делаться на двух языках, или только на английском (в этом случае в русскоязычном варианте статьи в подрисовочных подписях следует давать перевод этих подписей).

В случае предоставления авторами статьи только на одном языке, **опубликование на другом языке не гарантируется**. В этом случае по усмотрению редакции может быть опубликовано только краткие сведения (аннотация, ключевые слова, тезисы) или статья в сокращенном виде.

Сопровождение русскоязычной статьи английским переводом названия, ключевых слов и аннотации, и транслитерации фамилий авторов редакцией приветствуется: в этом случае указанные сведения помещаются в конце

статьи.

Желательно указание индекса УДК и (или) МКИ.

Допускается прием к опубликованию статей только на английском языке для англоязычных авторов. В этом случае по усмотрению редакции либо англоязычная версия публикуется в русскоязычной и англоязычной версии журнала, либо редакция осуществляет самостоятельный перевод статьи на русский язык для русскоязычной версии.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ

Редакционная коллегия предлагает соблюдать сложившиеся стилистические и оформительские признаки стиля АиПИ в части заголовков, подрисовочных подписей, оформления библиографических ссылок и т. д.

Пожалуйста, используйте курсив для латиницы в русскоязычных статьях, для сокращенных наименований физических величин после их численного значения, а также для полных или сокращенных слов «таблица», «рисунок», «приложение», «теорема», «лемма», «пример» и так далее, если после этих слов применена нумерация. При этом полное или сокращенное слово «*Рисунок*», «*Таблица*» и т. д. пишется с заглавной буквы. Между точкой после сокращения и цифрой, означающей нумерацию рисунка или таблицы, пожалуйста, используйте символ «неразрывный пробел», который вставляется в текст при одновременном нажатии клавиш *Shift, Ctrl* и «пробел». Например, «на *Рис. 2* показано».

Для чисел использовать курсив не следует, кроме случаев, когда числами обозначаются блоки или элементы на рисунке.

Например, $F_2 = 33,5 \text{ Н}$.

Не следует использовать наименования физических величин в сокращенном виде в разрыве (вследствие переноса на другую строку) от их численного значения. Чтобы этого избежать, применяйте символ «неразрывный пробел». Также не применяйте эти сокращенные наименования, а также знаки математических операций при отсутствии численного значения.

Например, некорректным по этому признаку является фраза: «Сила тока = 3 А », или «Сила тока составляет несколько А ». Следует применять корректную запись, например, «Сила тока $I = 3 \text{ А}$ » или «Сила тока составляет несколько *Ампер*».

При написании формул используйте соответствующее программное обеспечение *Math (Microsoft Equation)*, встраиваемое в *Word*. Знаки препинания после уравнений, пожалуйста, пишите не в составе формул, а после формул как элементы текста.

В формулах использование курсива и прямого шрифта также имеет больше смысловое значение, а именно: для цифр и русских букв,

скобок, других служебных символов курсив не применяется. Курсив следует использовать для латинских букв, за исключением тех случаев, когда латинские буквы применяются для обозначения стандартных функций: \exp , \sin , \cos , \log , \lg , \ln , \mod , \max , \min и так далее – пишутся без курсива.

Мы просим авторов не использовать без необходимости *Math (Microsoft Equation)* для написания простейших формул в тексте абзаца, например, указание на значение какой-то из величин, или приведение простого соотношения, которое укладывается в половину строки и на которое не делается ссылок в дальнейшем.

Статьи, оформленные с существенными нарушениями требований к оформлению, могут быть отклонены от опубликования на этом основании.

О РАЗДЕЛЕ «ДИСКУССИИ. ФОРУМ»

В раздел «Дискуссии. Форум» принимаются статьи, которые могут положить начало дискуссиям по актуальным вопросам в русле тематики журнала «АиПИ».

Статьи данного раздела не подвергаются строгому научному рецензированию, а именно: при наличии как положительных, так и отрицательных рецензий, либо при несовпадении точки зрения авторов с точкой зрения большинства членов редакционной коллегии, статьи могут быть опубликованы в этом разделе на правах дискуссионного выступления автора. Редакционная коллегия приветствует научные дискуссии сторонников несовпадающих мнений с целью развития теорий. Редакционная коллегия призывает читателей присылать

отклики на статьи, опубликованные в разделе «Дискуссии». Избранные отклики на статьи раздела «Дискуссии» также как избранные мотивированные отклики на другие статьи журнала «АиПИ» будут публиковаться в разделе «Форум» (по усмотрению редакции – в сокращении или в конспективном изложении).

ОФОРМЛЕНИЕ ЛИТЕРАТУРЫ

Мы просим наших авторов при оформлении списка цитируемых публикаций давать два варианта: для русскоязычных читателей (Литература) и для англоязычных читателей (*References*). Во втором случае публикации на иностранных языках записываются так же, как они пишутся в оригинале. Публикации на русском языке следует перевести на английский язык, либо осуществить транслитерацию с помощью сайта <http://translit.net/>. Если вы ссылаетесь на публикацию нашего журнала, пожалуйста, используйте англоязычное название в списке для англоязычных читателей, а именно: *Automatics & Software Enginery*. Аналогично если журнал выходит на двух языках, русском и английском, мы убедительно просим авторов в русскоязычной версии ссылок давать ссылку на русский вариант издания, а в англоязычной версии – ссылку на английский вариант издания. Если при этом страницы соответствующих статей не совпадают, пожалуйста, используйте правильные страницы публикаций. Если вы знакомы со статьей только по англоязычному варианту, либо если статья написана только на английском или другом иностранном языке, в этом случае ссылка на нее в каждом из перечней дается на языке оригинала.

Content

I. Automation. Automated Systems	7
Control of Object with Distributed Parameters. Boris Pyakillya, Vadim Zhmud	9
Control of Object with Feedback Loop Using Imperfect Position and Acceleration Sensors. Vadim Zhmud, Vladimir Semibalamut, Oleg Yadrishnikov, Vitaly Trubin	17
II. Robotics. Software and Systems. Telemechanics and Telemetry	27
Implementation of Software for Digital Holography in Software CUDA. V.I. Guzhov, S.P. Ilyinikh, P.S. Ryzhov	29
III. Innovative Technologies. Promising Technologies. Simulation of Systems. Numerical optimization	38
Accelerating methods of the fabric products assembly. I.E. LANDOVSKAYA, V.D. FROLOVSKY, V.V. LANDOVSKY	41
IV. Measuring Means and Systems. Identification	49
Correct Identification and Control of Object with Time-Delay Link. Boris Pyakillya, Vadim Zhmud	51
V. Popular Papers. Intriduction into Spesialities	64
Comparison of the Contribution of Quantization Error in Level and in Time into the Result of Analog-to-Digital Conversion. VADIM ZHMUD	66
Reverse Overshootings Suppression in Aautomation Systems. VADIM ZHMUD	71
VI. Discussions. Forum. Information for Authors	76
Embedded Control Dystems. The Specifics of Specialist Training. L.V. Tyunina	78
Information Approach to the Problems of Metrology and Physics. V.A. Zhmud	80
Requirements for Publication in Scientific Electronic Journal "Automation and Software Engineering"	110

ISSN 2312-4997

