

# МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

№ 12 (129)

декабрь

2011

## Редакционный совет:

КУЗНЕЦОВ Н. А.  
МАКАРОВ И. М.  
МАТВЕЕНКО А. М.  
ПЕШЕХОНОВ В. Г.  
СОЛОМЕНЦЕВ Ю. М.  
ФЕДОРОВ И. Б.

## Главный редактор:

ТЕРЯЕВ Е. Д.

## Заместители гл. редактора:

ПОДУРАЕВ Ю. В.  
ПУТОВ В. В.  
ЮЩЕНКО А. С.

## Выпускающий редактор:

ФИЛИМОНОВ Н. Б.

## Ответственный секретарь:

ПЕТРИН К. В.

## Редакционная коллегия:

АЛЕКСАНДРОВ В. В.  
АНТОНОВ Б. И.  
АРШАНСКИЙ М. М.  
БОГАЧЕВ Ю. П.  
БУКОВ В. Н.  
ВИТТИХ В. А.  
ВОСТРИКОВ А. С.  
ГРАДЕЦКИЙ В. Г.  
ГОЛУБЯТНИКОВ И. В.  
ИВЧЕНКО В. Д.  
ИЛЬЯСОВ Б. Г.  
КАЛЯЕВ И. А.  
КОЛОСОВ О. С.  
КОРОСТЕЛЕВ В. Ф.  
КРАСНЕВСКИЙ Л. Г.  
КУЗЬМИН Н. Н.  
ЛЕБЕДЕВ Г. Н.  
ЛЕОНОВ Г. А.  
ЛЁВИН Б. А.  
ЛОХИН В. М.  
НОРЕНКОВ И. П.  
ПАВЛОВСКИЙ В. Е.  
ПРОХОРОВ Н. Л.  
РАПОПОРТ Э. Я.  
РАЧКОВ М. Ю.  
РЕЗЧИКОВ А. Ф.  
СЕБРЯКОВ Г. Г.  
СИГОВ А. С.  
СИРОТКИН О. С.  
СОЙФЕР В. А.  
ТИМОФЕЕВ А. В.  
ФИЛАРЕТОВ В. Ф.  
ФУРСОВ В. А.  
ХИМЕНКО В. И.  
ЮРЕВИЧ Е. И.  
ЮСУПОВ Р. М.

## Редакция:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.  
ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.  
ЧУГУНОВА А. В.

## СОДЕРЖАНИЕ

### ПРОБЛЕМЫ АНАЛИЗА И УПРАВЛЕНИЯ В СЛОЖНЫХ СИСТЕМАХ

- Виттих В. А. Управление ситуациями в сложных развивающихся системах с применением интересубъективных теорий. . . . . 2

### МЕТОДЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

- Теряев Е. Д., Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б., Петрин К. В. Концепция "гибких кинематических траекторий" в задачах терминального управления подвижными объектами. . . . . 7

### ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ И ПРЕОБРАЗУЮЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

- Свинов А. В., Турыгин Ю. В., Гартянски Р., Ситар Я. Изучение характеристик и разработка дистанционной системы управления линейным асинхронным двигателем. . . . . 16  
Буканова Т. С. Способ управления и модель электрической машины с дифференциальным торможением. . . . . 21  
Малинин Л. И., Кондратьев В. А., Малинин В. Л. Исследование моделей процесса энергопреобразования в электромагнитном механизме постоянного тока. . . . . 28  
Афонин С. М. Исследование электромеханического преобразования энергии пьезо-актюаторами нано- и микроперемещений. . . . . 34  
Бусурин В. И., Казарьян А. В., Чижов В. С., Звей Нэй Зо. Исследование характеристик преобразователей электрического напряжения и температуры на основе оптического туннелирования. . . . . 40

### МЕХАТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

- Шемакин А. Н., Рачков М. Ю., Соловьев Н. Г. Исследование влияния натекания воздуха в газовый контур на мощность излучения лазерного технологического комплекса. Часть 2. . . . . 45  
Чикуров Н. Г., Мавлютов М. С. Высокоскоростной сплайновый интерполятор повышенной точности для компьютерных устройств ЧПУ. . . . . 51  
Аршанский М. М., Ганюшин Р. С., Зазвонных А. В. Адаптация технологических возможностей ЧПУ к условиям обработки на основе интегрированной клиент-серверной системы. . . . . 56

### Журнал в журнале "УПРАВЛЕНИЕ И ИНФОРМАТИКА В АВИАКОСМИЧЕСКИХ И МОРСКИХ СИСТЕМАХ"

- Пономаренко А. В., Василец В. М., Кулабухов В. С., Халтобин В. М. Автоматизированные системы обучения для летного и инженерно-технического составов самолетов-истребителей пятого поколения. . . . . 61  
Указатель статей, опубликованных в журнале "Мехатроника, автоматизация, управление" в 2011 году. . . . . 65  
Contents. . . . . 71

*Журнал входит в Перечень периодических изданий, рекомендованных ВАК РФ для публикации основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук; журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования*

Информация о журнале доступна по сети Internet по адресу:  
<http://novtex.ru/mech>, e-mail: [mech@novtex.ru](mailto:mech@novtex.ru)

# ПРОБЛЕМЫ АНАЛИЗА И УПРАВЛЕНИЯ В СЛОЖНЫХ СИСТЕМАХ

УДК 62-5:004.8

**В. А. Виттих,**

д-р техн. наук, проф., научный советник,  
vittikh@iccs.ru,

Институт проблем управления  
сложными системами РАН, Самара

## Управление ситуациями в сложных развивающихся системах с применением интерсубъективных теорий

*Обосновывается необходимость использования коммуникативной рациональности при решении проблем управления ситуациями в сложных развивающихся системах, создаваемых человеком и функционирующих при его участии. Предлагается структура интерсубъективной теории, выполняющей роль "интеграционной платформы" для достижения консенсуса неоднородных акторов. Отмечается, что для управления ситуациями в реальном масштабе времени требуется применение специальных информационно-коммуникационных технологий, в том числе систем поддержки коммуникативных действий и средств оперативного распределения ресурсов.*

**Ключевые слова:** развивающаяся система, неоднородный актор, коммуникативная рациональность, проблемная ситуация, коммуникативное действие, самоорганизация, социальное партнерство, интерсубъективная теория, управление в реальном масштабе времени

### Введение

Человеческое бытие есть всегда бытие в некоторых ситуациях [1]. В сложных развивающихся системах (в производственных системах, муниципалитетах, регионах и целых государствах) [2] *проблемные ситуации* (когда неудовлетворительное состояние дел уже осознано, но еще неясно, что нужно делать для его изменения [3]) обладают неопределенностью. Нахождение выхода из проблемной ситуации, ее урегулирование, является главной задачей *управления ситуацией* [4], при решении которой (во избежание волюнтаризма в принятии решений) стремятся использовать принципы рациональности, базирующейся на вере в способность человеческого разума постичь окружающий мир и устроить его на разумных началах [5].

Один из таких принципов — *целерациональность* (восходящий к работам М. Вебера) — положен в основу программно-целевого метода управления, ориентированного на достижение некоторой конечной цели, построение дерева целей и распре-

деление ресурсов между его отдельными ветвями. Однако реализация целевых программ дает эффект только при регулировании относительно стабильных проблемных ситуаций, в то время как в современном открытом и динамичном мире программно-целевые методы не обеспечивают должной эффективности управления. Причина кроется в той самой "целерациональности", исходящей из того, что в сложной развивающейся системе, созданной и функционирующей при участии людей, любую ситуацию можно неоправданно уподобить "квази-природному" объекту и изучать его "со стороны" при разработке целевой программы "без примеси человеческой субъективности" [6]. Получается парадокс: человек, который своими решениями трансформирует ситуацию, играя в этом смысле ключевую роль, исключается из рассмотрения.

При таком подходе "вырванная" из ситуации и "заостренная" на конечную цель программа, возможно, приведет к запланированному результату, но это вовсе не будет означать, что проблемная ситуация урегулирована, тем более, что в процессе реализации целевой программы ситуация сама по себе может претерпеть значительные изменения. Иными словами, целерациональность и ее инструментальная составляющая (целевые программы), если и дают возможность в рамках причинно-механической картины мира формализовать процессы управления (принятия решений), то только ценой существенной идеализации, ухода от реальности, выступая, таким образом, в роли "ограничителей" познавательных (когнитивных) возможностей человека.

Такому когнитивно-инструментальному сужению разума Ю. Хабермас в своей "Теории коммуникативного действия" противопоставил *коммуникативную рациональность*, в основе которой лежит понятие *коммуникативного действия* — такого взаимодействия по крайней мере двух индивидов, которое упорядочивается согласно обязательным нормам и ориентировано на *достижение взаимопонимания действующих индивидов, их консенсус* [7, 8]. Значимость коммуникативного взгляда на мир возрастает по мере нашего вхождения в информационное общество, которое характеризуется широкомасштабным использованием информационно-коммуникационных технологий в жизни людей.

Важную роль в концепции Ю. Хабермаса играет введенное Э. Гуссерлем понятие "жизненного мира". *Жизненный мир* предшествует научно-теоретическим построениям и тем идеализациям, на которых

эти построения покоятся. Основоположник феноменологической социологии А. Шюц полагал, что жизненный мир в качестве intersубъективной реальности является, прежде всего, социальной реальностью. "Жизненный мир в отличие от науки, где мир как нечто объективное противопоставляется человеку как субъекту, предполагает смещение разрыва между субъектом и объектом: это мир, складывающийся из intersубъективных отношений между людьми, где в ходе непосредственных контактов между индивидами вырабатываются личностно окрашенные значения, которыми наделяются социальные процессы... Согласно А. Шюцу, повседневный мир — это по необходимости intersубъективный мир, и только это делает возможной осмысленную коммуникацию" [9].

Поэтому при разработке теоретических основ управления ситуациями в сложных развивающихся системах будем опираться на коммуникативную рациональность, которая исходит из intersубъективного по своей природе коммуникативного разума.

## 1. Коммуникация в информационном обществе

Роль коммуникации в жизни людей постоянно возрастает. Если изначально коммуникация трактовалась как тип взаимодействия между людьми, предполагающий информационный обмен [7], то в настоящее время, и особенно в грядущем информационном обществе, это понятие приобретает новый смысл. Интенсивно развивающиеся и все более широко используемые информационно-коммуникационные технологии приводят к необходимости рассматривать коммуникацию на качественно ином уровне, не отождествляя ее с более узкими понятиями связи или передачи сообщений. Люди, получившие возможность информационного взаимодействия в реальном масштабе времени, т. е. в темпе развития ситуации, не вступая в прямые контакты друг с другом, оказались в состоянии вести диалог и достигать взаимопонимания. И если предположить, что "Всемирная паутина" "опутает" все человечество, то такая перспектива должна изменить сам характер отношений между людьми, которые станут в значительной степени взаимозависимыми, несмотря на усиливающиеся в информационном обществе проявления индивидуализма.

И вот тогда коммуникативная рациональность из сферы концептуальной, теоретической перейдет в практическую плоскость: люди не только осознают, но и будут реализовывать основную функцию коммуникации — достижение социальной общности при сохранении индивидуальности каждого ее элемента [5]. Имея свою собственную точку зрения на сложившуюся ситуацию, *каждый из неоднородных акторов* (лиц, осознавших ситуацию, свою роль в ней и выполняющих познавательную-деятельностные функции по ее регулированию) [2] *будет включен*

*в коммуникативные действия, создающие основу социальной самоорганизации* [10]. Несмотря на различные жизненные позиции и интересы, *акторы должны быть мотивированы на достижение консенсуса* путем переговоров, направленных на сближение их точек зрения. С этой целью должны получить развитие механизмы *социального партнерства* [11], понимаемые, в частности, как отношения, в которые вступают субъекты социальной коммуникации для объединения усилий и ресурсов в решении социально значимой проблемы в сфере разделяемой партнерами ответственности [12]. Следует подчеркнуть, что социальное партнерство возникает не под воздействием команд какого-то управляющего органа, а является результатом самоорганизации в процессах коммуникаций потенциальных партнеров.

Таким образом, в информационном обществе как в новой общественной формации, равно как и в теории коммуникативного действия Ю. Хабермаса, *коммуникация рассматривается в качестве базового социального процесса*, и поэтому *управление ситуациями* в сложных развивающихся системах следует понимать как *основанное на коммуникативных действиях акторов согласованное принятие решений о способах регулирования этих ситуаций*. Но для достижения консенсуса акторов должна быть разработана "платформа знаний", признаваемых общезначимыми и разделяемых всеми акторами, которая позволяла бы "отслеживать" развитие ситуации в реальном масштабе времени. Решать эту задачу предлагается с применением понятия intersубъективной теории [2].

## 2. Структура intersубъективной теории

Потребность в согласии неоднородных акторов должна удовлетворяться посредством рационально, т. е. аргументированно, достигаемого взаимопонимания. При этом рациональными считают способы поведения и деятельности или концептуальные системы, которые могли бы обеспечить продуктивную интеллектуальную и практическую коммуникацию. *Рациональность в таких случаях обеспечивается intersубъективностью*, которая может выражаться в различных формах. К. Хьюбнер в работе [13] предложил рассматривать пять типов intersубъективности.

*Семантическая intersубъективность* предполагает ясность и общее согласие относительно понятий и построенных из них суждений, т. е. они понимаются всеми одинаково и потому могут употребляться одним и тем же образом.

*Эмпирическая intersубъективность* подразумевает, что высказывания, опирающиеся на эмпирические факты, принимаются за рационально обоснованные. При этом нужно иметь возможность ясно понять данные факты, они должны быть обязательно

приемлемы и признаны кем-то, т. е. признается необходимой обоснованность суждений фактами и наблюдениями.

*Логическая intersубъективность* считает рационально обоснованными такие высказывания, которые являются результатом логического вывода. При этом также предполагается понятность, ясность и общая приемлемость.

*Операциональная intersубъективность* исходит из воспроизводимости образцов действия или рассуждения. Предполагается, что некоторая последовательность действий всегда ясным и общеобязательно приемлемым образом основана на данном образце. Отдельные элементы такой технологии и их последовательность, составляющие данный образец, понимаются всеми однозначно и в принципе могут быть воспроизведены в том же виде.

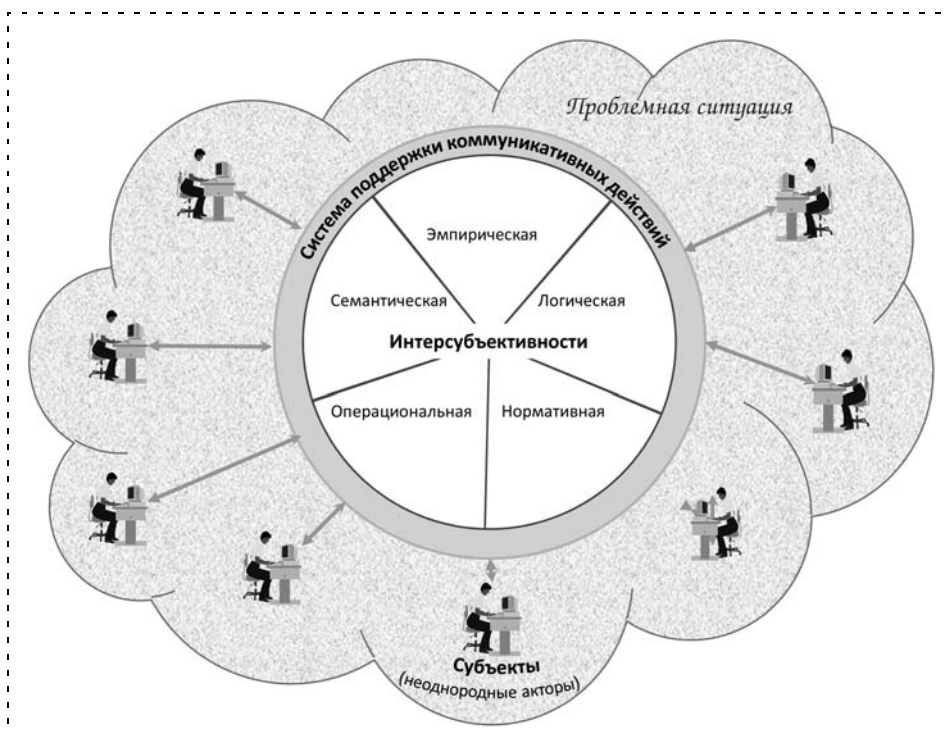
*Нормативная intersубъективность* предполагает общепринятость норм и правил поведения или оценки. Если некоторая деятельность руководствуется нормами, это также рассматривается как рациональное обоснование. Хотя норма и является одновременно руководством к действию и в операциональном смысле часто не отличается от последнего, но тем не менее со словом "норма" обычно связаны определенные ценностные предпочтения.

Исходя из вышеизложенных соображений можно представить структуру intersубъективной теории (см. рисунок).

В приведенной на рисунке структуре сразу же обращает на себя внимание тот факт, что в отличие от классической научной теории в intersубъектив-

ной теории присутствуют субъекты (неоднородные акторы, оказавшиеся в проблемной ситуации) и средства организации их взаимодействия (система поддержки коммуникативных действий [10, 14]). Однако это нельзя рассматривать как какое-то методологическое противоречие, поскольку развитие науки, ее философских оснований влечет за собой изменение самих принципов научной рациональности. Так, в работе [15] отмечаются три исторических типа научной рациональности: *"классический тип научной рациональности"*, центрируя внимание на объекте, стремится при теоретическом объяснении и описании исключить все, что относится к субъекту, средствам и операциям его деятельности. Такое исключение рассматривается как условие получения объективно-истинного знания о мире... *Неклассический тип научной рациональности* учитывает связи между знаниями об объекте и характером средств и операций деятельности... *Постнеклассический тип рациональности* учитывает соотношенность получаемых знаний об объекте не только с особенностью средств и операций деятельности, но и с ценностно-целевыми структурами... Это связано с тем, что современная наука на переднем крае своего поиска поставила в центр исследований уникальные, исторически развивающиеся системы, в которых в качестве особого компонента включен сам человек".

Поэтому intersубъективную теорию следует рассматривать как теорию, соответствующую представлениям постнеклассической научной рациональности, разработка которой начинается с осозна-



Структура intersубъективной теории

ния неоднородными акторами проблемной ситуации в сложной развивающейся системе. Каждый из них изучает и оценивает ситуацию со своей субъективной точки зрения, хотя решение об урегулировании проблемной ситуации должно быть принято ими согласованно, коллегиально. С этой целью самоорганизующиеся акторы предпринимают коммуникативные действия для достижения взаимопонимания, не дожидаясь какой-либо команды "сверху", самостоятельно образуя "холоны" [2, 16], которые могут объединяться или, наоборот, распадаться в зависимости от текущего положения дел. Управление организуется, таким образом, не иерархически "сверху вниз", а "снизу вверх", когда "нижестоящие"

элементы являются источниками ресурсов и власти для "вышестоящих". При таком подходе, который в противоположность иерархии базируется на *лоуархии* (lowerarchy) [17], в процессе разработки интересубъективной теории и, соответственно, при подготовке и принятии согласованного решения о выборе способа выхода из проблемной ситуации используются интеллектуальные и волевые ресурсы множества акторов, "погруженных" в ситуацию, а не узкого круга руководителей верхних эшелонов власти.

В основу переговоров неоднородных акторов при построении интересубъективной теории целесообразно положить понятие *дискурса* — формы коммуникации, которая, по Ю. Хабермасу, требует, чтобы все мотивы, кроме готовности к рационально обоснованному соглашению, были исключены [9]. Соглашение достигается в результате аргументации, а не принуждения. При этом любые высказывания тщательно проверяются, понимаются, уточняются, критикуются и, наконец, принимаются или отвергаются [12, 18]. Результатами соглашений будут являться упомянутые выше типы интересубъективности: семантическая интересубъективность (соглашение об используемых понятиях и суждениях), эмпирическая интересубъективность (признание обоснованности суждений фактами и наблюдениями), логическая интересубъективность (признание рационально обоснованными таких высказываний, которые являются результатом логического вывода), операциональная интересубъективность (соглашение о воспроизводимости образцов действия или рассуждения), нормативная интересубъективность (общепринятость норм и правил поведения или оценки).

### 3. Регулирование проблемных ситуаций

В результате построения "интеграционной платформы" — интересубъективной теории, т. е. на основе достигнутых соглашений в процессе коммуникативного дискурса, могут приниматься практические решения об управлении проблемной ситуацией, а точнее о ее регулировании, поскольку термин "управление" (менеджмент) чаще всего предполагает наличие у одних людей власти навязывать свою волю другим людям, в то время как "регулирование" обозначает возможность (в соответствии со "Словарем русского языка" С. И. Ожегова) "направлять развитие с целью привести в порядок", совсем не обязательно используя для этого механизмы власти, а опираясь на принципиально *ненасильственные принципы коммуникативной рациональности*, исходящей из идеи равенства партнеров и запрета какого-либо их принуждения к согласию. Поэтому в тех случаях, когда мы будем говорить об управлении ситуацией, то будем подразумевать ее регулирование. Отметим, что Ю. Хабермас наряду

с государственной властью и централизующим воздействием рынка выдвигает в качестве третьего (и преимущественного) источника общественной интеграции "солидарность, ориентирование общей воли" [8].

Любая ситуация в сложной развивающейся системе имеет тенденцию к изменению, а это означает, что *управление* (ее регулирование) должно осуществляться в *реальном масштабе времени, т. е. в темпе развития ситуации*. Поэтому акторы, располагающие в своих холонах необходимыми ресурсами [2], должны оперативно распределять (или перераспределять) их таким образом, чтобы реализуемые на их основе действия трансформировали ситуацию в согласованном со всеми акторами направлении. Тем самым вслед за познавательной функцией (разработкой интересубъективной теории) акторы выполняют свою деятельностьную функцию. Но дело на этом не заканчивается, поскольку последующий анализ ситуации, сопровождающийся возможными изменениями позиций самих акторов, может привести к пересмотру ранее разработанной интересубъективной теории, а соответственно, и к принятию новых управленческих решений, *персональную ответственность* за последствия реализации которых *несут акторы — каждый в сфере своей деятельности*. Здесь уместно отметить, что, наряду с гетерархическими отношениями равноправных акторов, самими же акторами (по принципу "снизу вверх", а не "сверху вниз") могут создаваться и иерархические структуры, если того требуют интересы дела.

У приверженцев целерациональности изложенный подход к организации процессов управления может вызвать негативную реакцию, поскольку в его основе лежат не "объективные" критерии оптимальности, а "субъективные" позиции неоднородных акторов, не "жесткие" целевые программы, а "либеральные" коммуникации для достижения взаимопонимания, не классические научные теории, а интересубъективные теории, создаваемые в процессах дискурсивных переговоров, и, наконец, не иерархия, а лоуархия. Однако не тяга к философским спорам или абстрактным теоретическим построениям привела нас к коммуникативной рациональности, а практическая потребность в решении проблем управления "неклассическими" научными объектами — сложными развивающимися системами. И здесь ключевую роль должны сыграть специальные информационно-коммуникационные технологии, в том числе системы поддержки коммуникативных действий [14], распределения ресурсов в реальном масштабе времени [19] и другие, без использования которых принципиально невозможно "владеть ситуацией", т. е. управлять в темпе происходящих в ней изменений.

## Заключение

Появление в поле зрения науки "неклассических" объектов — сложных развивающихся систем, созданных человеком и функционирующих при его участии, привело к необходимости перехода от классического к неклассическим и постнеклассическим типам научной рациональности, к числу которых относится коммуникативная рациональность, исходящая из интерсубъективного по своей природе коммуникативного разума. Именно коммуникативная рациональность положена в основу теоретических положений, нашедших отражение в данной статье.

Поскольку в теории коммуникативного действия Ю. Хабермаса коммуникация рассматривается в качестве базового социального процесса, управление ситуациями в сложных развивающихся системах следует понимать как основанное на коммуникативных действиях неоднородных акторов согласованное принятие решений о способах регулирования этих ситуаций. Для достижения консенсуса необходима "интеграционная платформа", содержащая признаваемые и разделяемые всеми акторами знания о проблемной ситуации, в качестве которой предлагается использовать интерсубъективную теорию.

В интерсубъективной теории рассматривается, следуя К. Хюбнеру, пять типов интерсубъективности: семантическая интерсубъективность (соглашение об используемых понятиях и суждениях), эмпирическая интерсубъективность (общее признание обоснованности суждений фактами и наблюдениями), логическая интерсубъективность (признание рационально обоснованными таких высказываний, которые являются результатом логического вывода), операциональная интерсубъективность (соглашение о воспроизводимости образцов действия или рассуждения), нормативная интерсубъективность (общепринятость норм и правил поведения или оценки).

Поскольку любая ситуация в сложной развивающейся системе имеет тенденцию к изменению, то управление должно осуществляться в реальном масштабе времени, т. е. в темпе развития ситуации. Поэтому акторы, располагающие в своих холонах необходимыми ресурсами, должны оперативно распределять (или перераспределять) их таким образом,

чтобы реализуемые на их основе действия трансформировали ситуацию в согласованном со всеми акторами направлении. Тем самым вслед за познавательной функцией (разработкой интерсубъективной теории) акторы выполняют свою деятельностную функцию.

## Список литературы

1. **Зотов А. Ф.** Современная западная философия. М.: Проспект, 2010.
2. **Виттих В. А.** Когнитология развивающихся систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 10. С. 45—50.
3. **Новиков А. М., Новиков Д. А.** Методология. М.: Синтег, 2007.
4. **Савченко А. Б.** Искусство управления ситуацией: опыт Востока и Запада. М.: Маркет ДС, 2006.
5. **Всемирная энциклопедия.** Философия. М.: АСТ; Мн.: Харвест, Современный литератор, 2001.
6. **Кохановский В. П., Лешкевич Т. Г., Матяш Т. П., Фатхи Т. Б.** Основы философии науки. Ростов н/Д: Феникс, 2004.
7. **Социальная философия:** Словарь. М.: Академический Проект; Екатеринбург: Деловая Книга, 2006.
8. **Новая философская энциклопедия** (в четырех томах). М.: Мысль, 2010.
9. **Современный философский словарь.** Лондон, Франкфурт-на-Майне, Париж, Люксембург, Москва, Минск / ПАНПРИНТ, 1998.
10. **Виттих В. А.** Механизмы социальной самоорганизации. Проблемы управления и моделирования в сложных системах // Тр. XIII Междунар. конф. Самара, Самарский научный центр РАН, 2011. С. 10—17.
11. **Виттих В. А.** Социальное партнерство как основа организации процессов управления в информационном обществе. Проблемы управления и моделирования в сложных системах // Тр. XIII Междунар. конф. Самара, Самарский научный центр РАН, 2011. С. 365—368.
12. **Соловьева Е. В.** Понятия "общественность" и "коммуникативное действие" Юргена Хабермаса как инструмент анализа социального партнерства // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского (серия "Социальные науки"). 2009. № 1. С. 62—66.
13. **Хюбнер К.** Истина мифа. М.: Республика, 1996.
14. **Виттих В. А., Игнатьев М. В., Смирнов С. В.** Системы поддержки коммуникативных действий. Проблемы управления и моделирования в сложных системах // Тр. XIII Междунар. конф. Самара, Самарский научный центр РАН, 2011. С. 369—371.
15. **Степин В. С., Горохов В. Г., Розов М. А.** Философия науки и техники. М.: Гардарики, 1996.
16. **Koestler A.** The Ghost in the Machine. Arcana books, London, 1989.
17. **Акоф Р. Л.** За пределами социализма и капитализма: развивающееся общество // Проблемы управления в социальных системах. 2009. Т. 1. В. 1. С. 112—140.
18. **Хабермас Ю.** Моральное сознание и коммуникативное действие // СПб.: Наука, 2006.
19. **Виттих В. А., Скобелев П. О.** Метод сопряженных взаимодействий для управления распределением ресурсов в реальном масштабе времени // Автометрия. 2009. № 2. С. 78—87.

УДК 62-50; 629.7.05; 681.51

**Е. Д. Теряев**, чл.-корр. РАН, гл. науч. сотр.,

**А. Б. Филимонов**,

д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотр.,

**Н. Б. Филимонов**,

д-р техн. наук, проф., вед. науч. сотр.,

**К. В. Петрин**, зав. лаб.,

mech@novtex.ru,

Институт машиноведения им. А. А. Благодатова РАН

## Концепция "гибких кинематических траекторий" в задачах терминального управления подвижными объектами

*Рассматриваются задачи терминального управления подвижными объектами. Отмечается несостоятельность принципа "невозмущенного-возмущенного движения" в условиях больших возмущений. Анализируется альтернатива — принцип "гибких траекторий". Выдвигается идея пространственной синхронизации кинематических траекторий управляемых движений. Предлагается концепция "гибких кинематических траекторий". Обсуждается задача управления посадочным маневром самолета.*

**Ключевые слова:** управление подвижными объектами, терминальное управление, концепция "невозмущенного-возмущенного движения", принцип "гибких траекторий", кинематический аспект управляемых движений, пространственная синхронизация процессов управления, управление летательными аппаратами

*"...всякая цель управления движением может быть сформулирована при помощи некоторых условных уравнений, связывающих координаты управляемого объекта", т. е. "всякое управляемое движение заранее запрограммировано" и "всякая программа носит кинематический характер"*

Г. В. Коренев

### Введение

Важное проблемное направление развития современной теории автоматического управления составляют задачи управления подвижными объектами (ПО) [1—12]. Самостоятельность и актуальность данного направления исследований обусловлены рядом причин.

Действительно, управляемые ПО составляют важную часть техносферы. К современным управляемым ПО относятся разнообразные типы технических объектов: транспортные средства (автомобили, летательные аппараты, речные и морские суда),

мобильные роботы (автомобили-роботы, робокары), телеуправляемые аппараты (сухопутные, подводные, воздушные) и др. В связи с этим представляет несомненный научный интерес и имеет большое прикладное значение изучение общих проблем и закономерностей в процессах управления ПО разных типов и разного назначения с целью сформировать единый теоретический базис для решения конкретных задач управления.

Задачи управления ПО имеют следующие особенности:

- ♦ для ПО первостепенное значение имеют кинематические характеристики движения в окружающем *физическом* пространстве, которые должны учитываться в моделях управляемых процессов и, естественно, лежать в основе постановки решаемых задач управления;
- ♦ динамика ПО описывается нелинейными дифференциальными уравнениями, что существенно усложняет задачи управления;
- ♦ процессы управления ПО имеют многостадийную и многорежимную структуру, в которой доминируют переходные режимы и терминальные маневры.

Вследствие этого задачи управления ПО выходят за рамки существующих теоретических схем, и, поскольку определяющим для них является механический аспект движений, то их целесообразно рассматривать и решать с единых позиций — на общей теоретической платформе, интегрирующей инструментальные средства теории управления и теоретической механики.

Такой подход развивается в данной статье, и его теоретическую основу составляют следующие вопросы:

- кинематическая формализация задач управления движением;
- пространственная синхронизация процессов терминального управления;
- концепция "гибких кинематических траекторий".

### Задачи терминального управления и принцип "невозмущенного-возмущенного движения"

Понятие терминального управления (от лат. *terminus* — конечная цель) зародилось в середине 50-х гг. прошлого столетия в области управления полетом, а задачи терминального управления, именуемые часто "задачами управления конечным состоянием", выделены в 1961 г. Беллманом (R. Bellman) в специальный класс задач управления.

Задачи терминального управления динамическими объектами отличаются двумя характерными

особенностями: во-первых, это конечное время протекания процесса управления и, во-вторых, наличие целевых ограничений на терминальное состояние.

Остановимся подробнее на математической формализации задач данного типа для класса конечно-мерных управляемых объектов. В рамках формализма пространства состояний динамика объекта описывается векторным дифференциальным уравнением вида

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(t, \mathbf{x}, \mathbf{u}), \quad (1)$$

где  $t \in \mathbf{T} = [t_0, t_F]$ ,  $\mathbf{T}$  — интервал времени протекания процесса управления;  $\mathbf{u} \in \mathbf{U} = \mathbf{R}^r$  — управляющий вход;  $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$  — состояние;  $\mathbf{f}: \mathbf{T} \times \mathbf{R}^n \times \mathbf{U} \rightarrow \mathbf{R}^n$  — заданная функция,  $\mathbf{U}$  — область допустимых значений управляющего входа (область управления),  $\mathbf{R}$  — поле вещественных чисел.

Допустимыми считаются кусочно-непрерывные управляющие воздействия  $\mathbf{u}(t)$ . Они наряду с заданием начального состояния  $\mathbf{x}(t_0)$  определяют задачу Коши для дифференциального уравнения (1).

В постановках задач терминального управления посредством тех или иных ограничивающих соотношений задается целевое множество  $\mathbf{X}_F^*$  для терминального состояния объекта:

$$\mathbf{x}(t_F) \in \mathbf{X}_F^*.$$

Во многих случаях задается терминальное значение состояния:

$$\mathbf{x}(t_F) = \mathbf{x}_F^*. \quad (2)$$

В теории и практике терминального управления в настоящее время главенствует принцип "невозмущенного-возмущенного движения" Ляпунова—Летова [2], согласно которому задача управления декомпозируется на две подзадачи: планирование управляемого невозмущенного движения и стабилизация запланированного движения в условиях действия возмущений.

Для первой подзадачи наиболее распространена постановка с фиксированным конечным состоянием (2). Ее решением является номинальная (планируемая) траектория движения  $\mathbf{x}^*(t)$  и соответствующее ему программное управление  $\mathbf{u}^*(t)$ .

В условиях действия возмущающих факторов фактическое движение объекта не совпадает с номинальным:

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{x}^*(t) + \Delta\mathbf{x}(t),$$

где  $\Delta\mathbf{x}(t)$  — возмущение, т. е. отклонение движения от номинальной траектории. Соответственно, управление также разбивается на две составляющие — номинальную  $\mathbf{u}^*(t)$  и стабилизирующую  $\Delta\mathbf{u}(t)$ :

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{u}^*(t) + \Delta\mathbf{u}(t).$$

Для решения задачи стабилизации применяется линеаризованная модель возмущенного движения:

$$\Delta\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(t)\Delta\mathbf{x} + \mathbf{B}(t)\Delta\mathbf{u}. \quad (3)$$

Функциональные матрицы  $\mathbf{A}: \mathbf{T} \rightarrow \mathbf{R}^{n \times n}$ ,  $\mathbf{B}: \mathbf{T} \rightarrow \mathbf{R}^{n \times r}$  рассчитываются через матрицы Якоби правых частей уравнения (1):

$$\mathbf{A}(t) = \left. \frac{\partial \mathbf{f}(t, \mathbf{x}, \mathbf{u})}{\partial \mathbf{x}} \right|_*, \quad \mathbf{B}(t) = \left. \frac{\partial \mathbf{f}(t, \mathbf{x}, \mathbf{u})}{\partial \mathbf{u}} \right|_*,$$

где символ "\*" означает вычисление матриц Якоби для невозмущенного движения.

Применительно к задачам терминального управления принцип "невозмущенного-возмущенного движения" приемлем для малых возмущений номинальной траектории, однако становится *несостоятельным* в условиях больших возмущений состояния объекта.

Данное обстоятельство хорошо иллюстрируется на примере задач маршрутизации движения транспорта: при больших отклонениях от запланированного маршрута экономичнее выбирать новые маршруты, а не возвращаться к исходно запланированному.

### Принцип "гибких траекторий"

Принцип "гибких траекторий" заключается в отказе от привязки управляемого движения объекта к заранее запланированной (номинальной) траектории и формировании (при необходимости) более выгодных траекторий движения из текущего состояния к целевому состоянию. Данный принцип означает включение механизма планирования траекторий движения в контур управления.

Качественное различие стратегий терминального управления на основе принципов "невозмущенного-возмущенного движения" и "гибких траекторий" поясняет рис. 1. Здесь показана номинальная тра-

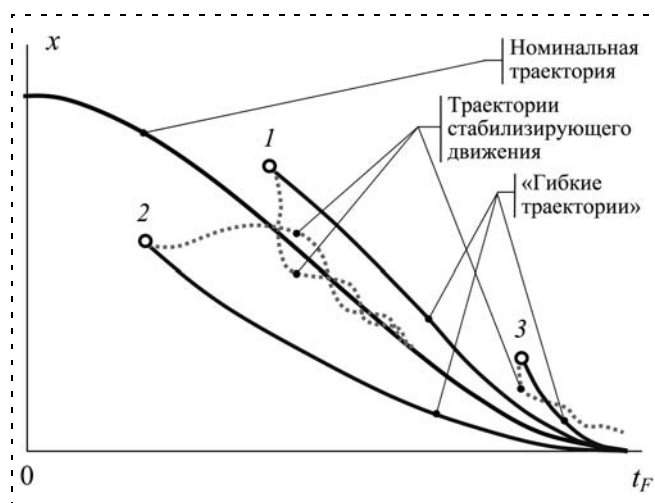


Рис. 1



ектория и реализации данных принципов для трех различных стартовых ситуаций (1, 2, 3). Стабилизирующие движения, отвечающие принципу "невозмущенного-возмущенного движения", обозначены пунктиром. Ясно, что применение данного принципа оправдано в ситуации 1, нерационально в ситуации 2 и неприемлемо в ситуации 3. Напротив, для двух последних ситуаций принцип "гибких траекторий" эффективен.

Касаясь ретроспективы идей терминального управления, следует отметить, что принцип "гибких траекторий" впервые был реализован в 1962 г. в американской системе автоматической посадки самолета, разработанной Донигером (J. F. Doniger), Бельским (Belsky), Рейнольдсом (G. Reynolds), Ханисчем (B. Hanisch) и Флитом (A. Flit) [13, с. 505—506]. Среди первых отечественных исследований в области управления ПО на основе принципа "гибких траекторий" следует указать работы Г. С. Поспелова и В. И. Толокнова (управление посадкой самолета), Д. Е. Охоцимского, Ю. Ф. Голубева и др. (управление посадкой космического аппарата), В. Н. Бородовского, А. П. Разыграева и др. (управление маневрами ракет и космических аппаратов на активных участках полета). Дальнейшее развитие принципа "гибких траекторий" связано с работами зарубежных и отечественных специалистов: Эллерта (F. J. Ellert) и Мерриэма (C. W. Merriam III), Несбита (R. A. Nesbit), Роуза (N. J. Rose) и Бронсона (R. D. Bronson), Н. Н. Красовского, Г. С. Поспелова, В. И. Толокнова, А. П. Батенко, А. А. Жевина, А. Б. и Н. Б. Филимоновых [14, 15] и др.

Основу метода "гибких траекторий" составляют два инструмента: алгоритм решения двухточечной краевой задачи программного управления и принцип "размораживания начальных условий". В зависимости от того, используется или нет измерительная информация о состоянии объекта в законе управления, различают два базовых типа стратегий управления: *позиционные*, реализующие принцип обратной связи, и *программные*. Традиционно принято данные стратегии противопоставлять, рассматривая

их как взаимоисключающие и отдавая бесспорные преимущества первым. Иной подход воплощает концепция *программно-позиционного* управления. Она была предложена Дрейфусом (S. E. Dreyfus) в виде идеи "размыкаемых обратных связей", которые характерны тем, что управляющее воздействие формируется не как "жесткая", заранее рассчитанная программа, а как "гибкая", периодически обновляемая программа.

Таким образом, именно принцип "гибких траекторий" лежит в основе стратегий *программно-позиционного управления*. Первые попытки их обоснования принадлежат Бертраму (J. E. Bertram) и Сарачику (P. E. Sarachik), которые подчеркивали, что использование информации о текущем состоянии управляемого объекта как раз и характеризует процесс управления с обратной связью. Отметим также, что идея программно-позиционного управления формулировалась также в работах отечественных авторов: Н. Н. Красовским в виде принципа локальной эквивалентности позиционного и программного управлений в дискретных системах [1, § 28], В. Н. Калининым при секвенциальной трактовке процессов управления [16], а также авторами в виде концепции циклического управления [17].

Выделим три возможных способа реализации принципа "гибких траекторий":

1. *Циклическое планирование* (рис. 2, а). Осуществляется периодическое обновление плана: процесс управления разбивается на временные циклы и на каждом цикле рассчитывается желаемая траектория движения исходя из измерительной информации о фактическом состоянии объекта в начале этого цикла с учетом терминальных условий (2). В итоге получаем семейство планируемых траекторий:

$$\{x_P(t|t_\theta), t_\theta \leq t < t_{\theta+1}, \theta = 0, 1, 2, \dots\},$$

где  $t_\theta = t_0 + \theta T_P$  — моменты перепланирования;  $T_P$  — длительность циклов. В течение цикла расчетная (плановая) траектория стабилизируется.

2. *Пороговое планирование* (рис. 2, б). Переход на новую плановую траекторию (перепланирование)

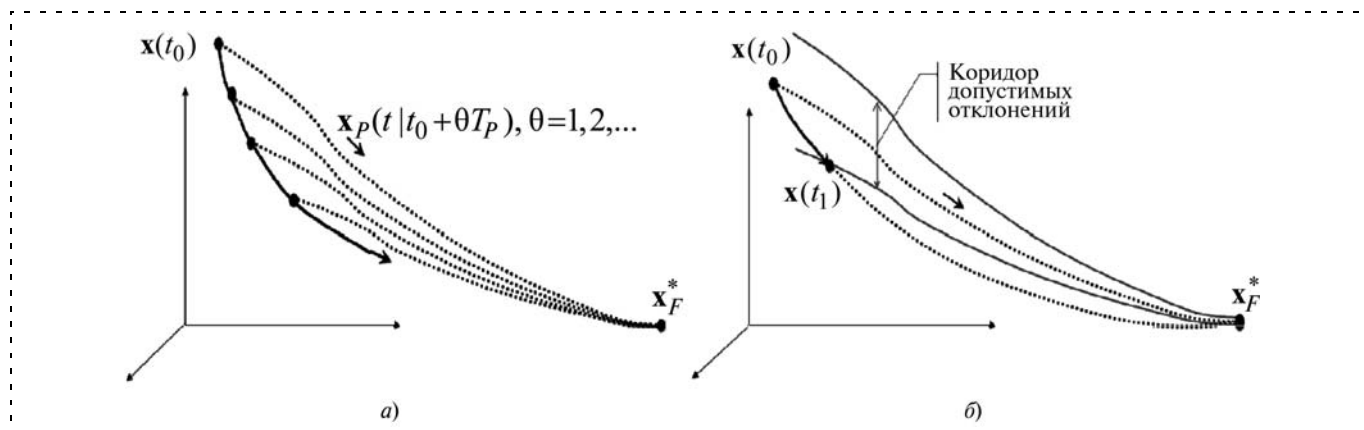


Рис. 2

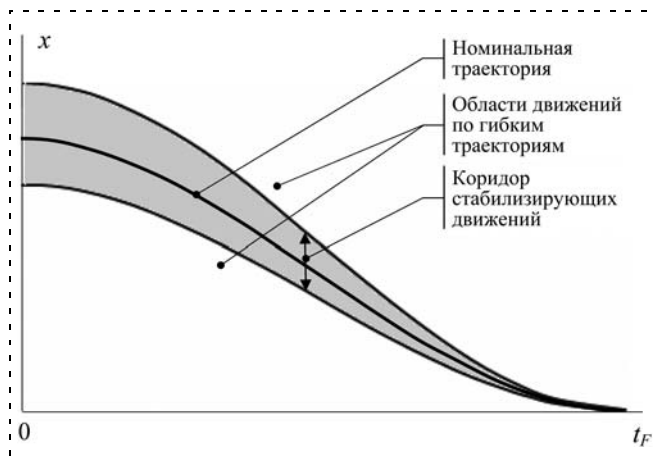


Рис. 3

осуществляется лишь в ситуациях *больших* возмущений расчетной траектории  $\mathbf{x}_p(t)$ , т. е. возмущений, превышающих заданный порог. Момент времени наступления такой ситуации  $\tilde{t}$  можно, к примеру, выразить в следующем виде:

$$\|\mathbf{x}(\tilde{t}) - \mathbf{x}_p(\tilde{t})\| > \Delta(\tilde{t}),$$

где  $\|\cdot\|$  — некоторая векторная норма;  $\Delta$  — величина порога.

Идею порогового планирования возможно совместить с принципом "невозмущенного-возмущенного движения". Такой подход иллюстрирует рис. 3: стабилизация номинальной траектории осуществляется в заданном *коридоре*, окружающем номинальную траекторию; вне этого коридора включается механизм действия гибких траекторий.

3. *Перманентное планирование.* Планирование траекторий осуществляется в каждый момент времени для каждого состояния объекта. Его можно интерпретировать как "размораживание" начальных условий, т. е. замену начальных условий текущими в программном решении задачи. Именно, если построен алгоритм управления для фиксированных начального момента времени  $t_0$  и начального состояния  $\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0$

$$\mathbf{u} = \mathbf{h}(t|t_0, \mathbf{x}_0),$$

то искомый закон управления получаем заменой начальных условий текущими:

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{h}(t|t, \mathbf{x}(t)).$$

#### Кинематический аспект процессов управления подвижными объектами

Как правило, изучение проблематики терминального управления основывают на нелинейных (1) либо линейных (3) моделях управляемого объекта. Однако такие модели носят весьма общий характер

и не учитывают главную специфику задач управления подвижными объектами — кинематику их движения в физическом пространстве. Далее к пространственным траекториям движения ПО будем применять термин "*кинематические траектории*" для их терминологического различения с понятием фазовых траекторий, описывающих динамику объекта в пространстве состояний.

Первым акцентировал внимание на кинематический аспект в задачах управления движением Г. В. Коренев. В разработанной им в начале 1960-х гг. целенаправленной механике управляемого тела [18] в качестве основной выдвинута гипотеза (ее формулировка вынесена в качестве эпиграфа к настоящей статье): *всякая программа целенаправленного движения носит кинематический характер*. Он ввел понятия кинематически достижимой и недостижимой целей и особо подчеркивал [19, с. 26], что "условные уравнения, задающие программу, допускают наглядное геометрическое или кинематическое толкование" и что в отличие от уравнений динамики естественных движений "уравнения кинематики универсальны в том смысле, что им, вообще говоря, подчинены как естественные движения, так и движения, достигающие наперед заданной цели". При этом "оригинальным является задание программы движения объекта управления не только как функции времени, а в самой общей форме — в виде функционального соотношения между его переменными состояниями".

Заметим, что автоматические системы, учитывающие кинематический характер целевого управляемого движения, правомерно относить к классу так называемых систем *согласованного, координированного или функционального регулирования (управления)* динамическими объектами (см., например, [20, 21]), обеспечивающих поддержание определенной функциональной зависимости между управляемыми переменными.

Примером кинематического подхода в области управления летательными аппаратами (ЛА) являются популярные методы наведения: метод кривой погони, метод наведения с постоянным пеленгом цели и др. [22].

**Пример: аэродинамические летательные аппараты.** Обратимся к классу аэродинамических летательных аппаратов. Рассматривая ЛА как абсолютно твердое тело, его движение в соответствии с правилами механики можно разложить на поступательное движение центра масс (ЦМ) и вращательное движение относительно ЦМ. Для определения положения ЛА в пространстве воспользуемся двумя системами координат: нормальной земной системой координат  $O_0X_gY_gZ_g$  и связанной системой координат  $OXYZ$  [22].

Движение ЛА описывается уравнениями

$$\dot{\mathbf{r}} = \mathbf{v}; \quad (4)$$

$$m(\dot{\mathbf{v}} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}) = \mathbf{F}; \quad (5)$$

$$\dot{\mathbf{K}} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{K} = \mathbf{M}; \quad (6)$$

$$\mathbf{K} = \mathbf{I}\boldsymbol{\omega}. \quad (7)$$

Здесь

- $\mathbf{r} = (x_g, y_g, z_g)$  — вектор пространственных координат в системе  $O_0X_gY_gZ_g$ ;
- $\mathbf{v} = (\dot{x}_g, \dot{y}_g, \dot{z}_g)$  — вектор скорости ЦМ ЛА;
- $\boldsymbol{\omega} = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)$  — вектор угловой скорости вращения ЛА, где  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$  — проекции вектора  $\boldsymbol{\omega}$  на подвижные оси координат;
- $m$  — масса,  $\mathbf{I}$  — тензор инерции ЛА;
- $\mathbf{K}$  — кинетический момент ЛА относительно его ЦМ;
- $\mathbf{F}$  — результирующий вектор внешних сил;
- $\mathbf{M}$  — результирующий вектор моментов внешних сил.

Уравнения (5) и (6) выражают теоремы о количестве движения и кинетическом моменте соответственно. Они относятся к подвижной системе координат  $OXYZ$ .

Наряду с векторами  $\mathbf{r}, \mathbf{v}, \boldsymbol{\omega}$  для задания углового положения ЛА относительно Земли вводятся также углы рыскания  $\psi$ , тангажа  $\vartheta$  и крена  $\gamma$ .

Таким образом, при общем рассмотрении процессов управления ЛА его состояние будет описываться вектором

$$\mathbf{x} = (x_g, y_g, z_g, \dot{x}_g, \dot{y}_g, \dot{z}_g, \psi, \vartheta, \gamma, \omega_x, \omega_y, \omega_z).$$

Действующие на ЛА внешние силы определяются состоянием ЛА согласно законам аэродинамики. Управляющие воздействия на динамику ЛА оказывают регулируемая сила тяги двигателей и управляющие моменты, обусловленные положением аэродинамических рулевых органов. Соответствующий вектор управляющих переменных

$$\mathbf{u} = (P, \delta_v, \delta_n, \delta_\epsilon),$$

где  $P$  — сила тяги двигателей;  $\delta_v, \delta_n, \delta_\epsilon$  — углы отклонения руля высоты, руля направления и элеронов соответственно.

Таким образом, физические величины  $\mathbf{F}$  и  $\mathbf{M}$  являются функциями состояния и управляющих переменных ЛА:

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{u}), \mathbf{M} = \mathbf{M}(\mathbf{x}, \mathbf{u}).$$

Согласно уравнениям (4)—(7) движение ЛА разлагается на три составляющие: 1) вращение вокруг ЦМ (6); 2) формирование вектора скорости ЦМ (5); 3) перемещение ЦМ в пространстве (4).

На основе такой структуризации движения ЛА удастся эффективно решать нелинейные задачи управления полетом, что будет продемонстрировано

ниже — в задаче управления посадочным маневром самолета.

Терминальные задачи управления полетом связаны со взлетом и посадкой ЛА, а также маневрированием в соответствии с навигационными и тактическими задачами [23]. При этом предметом исследования в данных задачах является перемещение ЦМ ЛА:

$$\mathbf{r}(t), t = \overline{t_0, t_F}, \quad (8)$$

где  $t_0$  и  $t_F$  — моменты времени начала и конца маневра.

Специфика задач управления ЛА обусловлена двумя обстоятельствами: во-первых, нелинейной структурой уравнений динамики (4)—(7) и, во-вторых, целевыми требованиями именно к кинематике управляемых движений (8).

### Пространственная синхронизация движений

Традиционно планируемые траектории движения ЛА задают в виде желаемого кинематического закона движения (8), описывающего зависимость пространственных координат от времени. Результатом такого формализма является *нестационарная структура* алгоритмов управления.

Однако возможен иной способ формализации траекторий движения ЛА, базирующийся на их представлении как *пространственных кривых* в координатной системе  $O_0X_gY_gZ_g$ . В этом случае желаемую траекторию можно задавать либо посредством системы уравнений:

$$\Phi_i(\mathbf{r}) = 0 \quad (i = 1, 2, 3),$$

либо в параметрической форме:

$$\mathbf{r}(\xi), \xi = \overline{0, \xi_F},$$

причем в качестве параметра  $\xi$  целесообразно использовать одну из пространственных координат координатной системы  $O_0X_gY_gZ_g$ .

К первому способу задания планируемых траекторий будем применять термин "*временная синхронизация*", а ко второму — "*пространственная синхронизация*".

Отметим, что именно механизм пространственной, а не временной синхронизации планируемых траекторий реализуется человеком в процессах управления транспортными средствами.

#### Пример: маневрирование при автовождении.

При выполнении различных маневров водитель мысленно планирует (продумывает) будущую траекторию движения автомобиля — это имеет место при прохождении поворотов на дорогах, обгонах, въезде в ворота и т. п.

В качестве примера разберем технику безопасного выполнения поворотов [24]. На рис. 4 изображена идеальная траектория, по которой надо ста-



Рис. 4

раться вести автомобиль в повороте. Она нацеливается на воображаемый *апекс* — место, в котором автомобиль максимально приближается к вершине поворота. Вход в поворот крутой, а выход пологий. Очень важным моментом в прохождении поворота является взгляд водителя, или точнее, ведение взгляда по самой дальней точке в повороте. Водитель как бы прицеливается, куда направить машину сначала взглядом. В итоге, он выстраивает в уме пространственно синхронизированную кинематическую траекторию движения.

**Пример: маневрирование хищных птиц во время взлета, посадки и охоты.** Кинематический аспект и пространственная синхронизация перемещения лежат в основе поведения хищников. Это наглядно проявляется, например, в маневрах орлана-белохвоста (рис. 5, см. вторую сторону обложки), когда он, совершая приземление, планирует по наклонной линии на неподвижных крыльях, у самой земли разворачивает тело вертикально, распуская хвост, опуская вниз и выставляя вперед ноги (рис. 5, а), либо во время охоты, летая над водной поверхностью и высмотрев добычу (рыбу), резко снижается по наклонной линии и хватает рыбу с поверхности воды (рис. 5, б).

### Гибкие кинематические траектории

Для класса ПО принцип "гибких траекторий" естественно связывать с кинематикой их движения в *физическом* пространстве, причем здесь возможна как временная, так и пространственная синхронизация движений. Во втором случае кардинально меняется смысл процессов управления — они принуждают объект двигаться по заданным пространственным кривым. Заметим, что именно такой подход воплощается в известных методах наведения ЛА [22]. Обсудим его особенности на примере задачи управления самолетом в режиме посадки.

**Пример: управление посадочным маневром самолета.** Будем рассматривать управление посадоч-

ным маневром самолета в вертикальной плоскости, следуя материалам работы [25]. Динамика самолета без учета ветровых возмущений описывается следующими уравнениями:

$$\dot{L} = V \cos \theta; \quad (9)$$

$$\dot{H} = V \sin \theta; \quad (10)$$

$$\dot{V} = g(n_x(\alpha) - \sin \theta); \quad (11)$$

$$\dot{\theta} = \frac{g}{V}(n_y(\alpha) - \cos \theta); \quad (12)$$

$$\dot{\vartheta} = \omega_z; \quad (13)$$

$$\dot{\omega}_z = \frac{b_A S}{I_z} q \left[ m_z(\alpha) + \frac{m_z^{\bar{\omega}_z} b_A}{V} \omega_z + m_z^{\delta} \delta_B \right]; \quad (14)$$

$$\alpha = \vartheta - \theta. \quad (15)$$

Здесь

- $H, L$  — высота и дальность воздушного участка полета;
- $V$  — путевая скорость полета;
- $\theta, \vartheta, \alpha$  — углы наклона траектории, тангажа и атаки соответственно;
- $\omega_z$  — угловая скорость тангажа;
- $n_x, n_y$  — продольная и нормальная перегрузки самолета;
- $m_z, m_z^{\bar{\omega}_z}, m_z^{\delta}$  — коэффициенты аэродинамического момента тангажа, продольного демпфирования и эффективности руля высоты;
- $q$  — скоростной напор:  $q = \rho V^2/2$  ( $\rho$  — плотность воздуха);
- $I_z$  — момент инерции самолета относительно поперечной оси;
- $S, b_A$  — площадь и средняя аэродинамическая хорда крыла.

В [25] исходя из нелинейной модели (9)–(15) дано решение задачи программного управления посадкой на примере сверхзвукового пассажирского самолета ТУ-144 на основе метода обратных задач динамики, причем планируемая траектория задавалась как функция времени:

$$H = H^*(t). \quad (16)$$

В теории и практике управления посадкой использовали различные способы формирования программного движения (16). Данные летных испытаний показывают [26], что "при переходе от линии планирования к точке приземления летчик изменяет скорость снижения по экспоненциальному закону". По-видимому, в связи с этим в работе [23, с. 106] подчеркивается, что "в случае автоматической посадки гражданских самолетов можно считать траекторию выравнивания экспонентой". В работе Мерриэма (С. W. Merriam III) [27, с. 457] программное

движение самолета в режиме выравнивания задавалось в виде линейно-экспоненциальной функции, а в работах Донигера (J. F. Doniger), Бельского (Belsky) и др. [13, с. 505—506] — в виде полиномиальных функций времени. Последние использовались также в работах В. И. Толокнова [10, 28], Н. Б. Филимонова [14, 15], А. П. Батенко [4], А. А. Жевнина и А. П. Крищенко [29, 30] и др.

Рассмотрим задачу посадки самолета в рамках концепции пространственной синхронизации посадочного маневра.

Считаем, что желаемая траектория посадки задана в виде зависимости высоты полета  $H$  от его дальности  $L \in [0, L_F]$ :

$$H = H^*(x_0, L), \quad (17)$$

где  $x_0$  — исходное состояние самолета при  $L = 0$ . Далее полагаем, что кривая (17) является достаточно гладкой.

Будем искать закон управления как функцию отклонения руля высоты от дальности полета:

$$\delta_B = \delta_B^*(x_0, L), \quad (18)$$

который обеспечивает движение самолета по желаемой траектории (17).

Исключим *время* из модели (9)—(15), принимая  $L$  в качестве новой независимой переменной. С этой целью поделим уравнения (10)—(15) на уравнение (9). В результате получим уравнения:

$$\frac{dH}{dL} = \operatorname{tg} \theta; \quad (19)$$

$$\frac{dV}{dL} = \frac{g(n_x(\alpha) - \sin \theta)}{V \cos \theta}; \quad (20)$$

$$\frac{d\theta}{dL} = \frac{g(n_y(\alpha) - \cos \theta)}{V \cos \theta}; \quad (21)$$

$$\frac{d\vartheta}{dL} = \frac{\omega_z}{V \cos \theta}; \quad (22)$$

$$\frac{d\omega_z}{dL} = \frac{b_A S q(m_z(\alpha) + (m_z^{\bar{\omega}} b_A / V) \omega_z + m_z^{\delta} \delta_B)}{I_z V \cos \theta}. \quad (23)$$

Данную модель движения самолета условимся называть *конфигурационной*.

Решаемая задача декомпозируется на две подзадачи: задачу управления вектором скорости ЛА и задачу управления траекторией полета. Предлагаемый метод ее решения так же, как и в [25], базируется на аппарате обратных задач динамики, но адаптирован к структуре конфигурационной модели движения (19)—(23) и включает следующие шаги:

1. В результате подстановки (17) в (19) находим программные значения угла наклона траектории

$$\theta = \theta^*(L) = \operatorname{arctg}(dH^*/dL). \quad (24)$$

2. Разрешая уравнение (21) относительно переменной  $\alpha$ , получаем функциональную зависимость угла атаки  $\alpha$  от переменных  $\theta$ ,  $d\theta/dL$  и  $V$ :

$$\alpha = \alpha[\theta, d\theta/dL, V]. \quad (25)$$

3. Используя соотношения (24) и (25) в (20) и интегрируя полученное дифференциальное уравнение, находим программы изменения скорости и угла атаки:

$$V = V^*(L), \quad (26)$$

$$\alpha = \alpha^*(L). \quad (27)$$

4. Из (15), (24) и (27) находим программу изменения угла тангажа:

$$\vartheta = \vartheta^*(L). \quad (28)$$

5. Из уравнения (22) после подстановки в его левую часть (28) находим программные значения угловой скорости:

$$\omega_z = \omega_z^*(L). \quad (29)$$

6. Наконец, посредством подстановки функций (24), (26), (27) и (29) в (23) находим искомую управляющую программу (18).

Поясним некоторые вычислительные аспекты метода:

- требуемые начальные условия для процедуры численного интегрирования дифференциального уравнения (20) извлекаются из вектора  $x_0$ ;
- значения неявной функции (25) находятся из (21) посредством подходящей вычислительной процедуры;
- результатом выполнения шага 3 являются сеточные функции (26) и (27), которые доопределяются в межузловых интервалах расчетной сетки средствами сплайн-интерполяции;
- при реализации шагов 5 и 6 в левые части уравнений (22) и (23) необходимо подставлять производные функций (28) и (29), которые находятся с помощью процедур численного дифференцирования.

Отметим, что аналитическое конструирование закона движения (17) целесообразно основывать на аппарате квазимногочленов.

На рис. 6 представлены результаты модельных расчетов траекторий посадки самолета ТУ-144 после схода с глиссады: представлены сами траектории и порождающие их управляющие программы, рассчитанные для штатного посадочного маневра и нештатных ситуаций, соответствующих занижению и завышению на 30 % высоты начала маневра.

В [25] задавались длительность воздушного участка полета:  $t_F = 5$  с, а также начальные и конечные параметры посадочного маневра:

$$H_0^* = 15 \text{ м}, \quad \theta_0^* = -2,7^\circ, \quad V_0^* = 80 \text{ м/с};$$

$$H_F^* = 4 \text{ м}, \quad \dot{H}_F^* = -0,6 \text{ м/с}, \quad V_F^* = 75 \text{ м/с}.$$

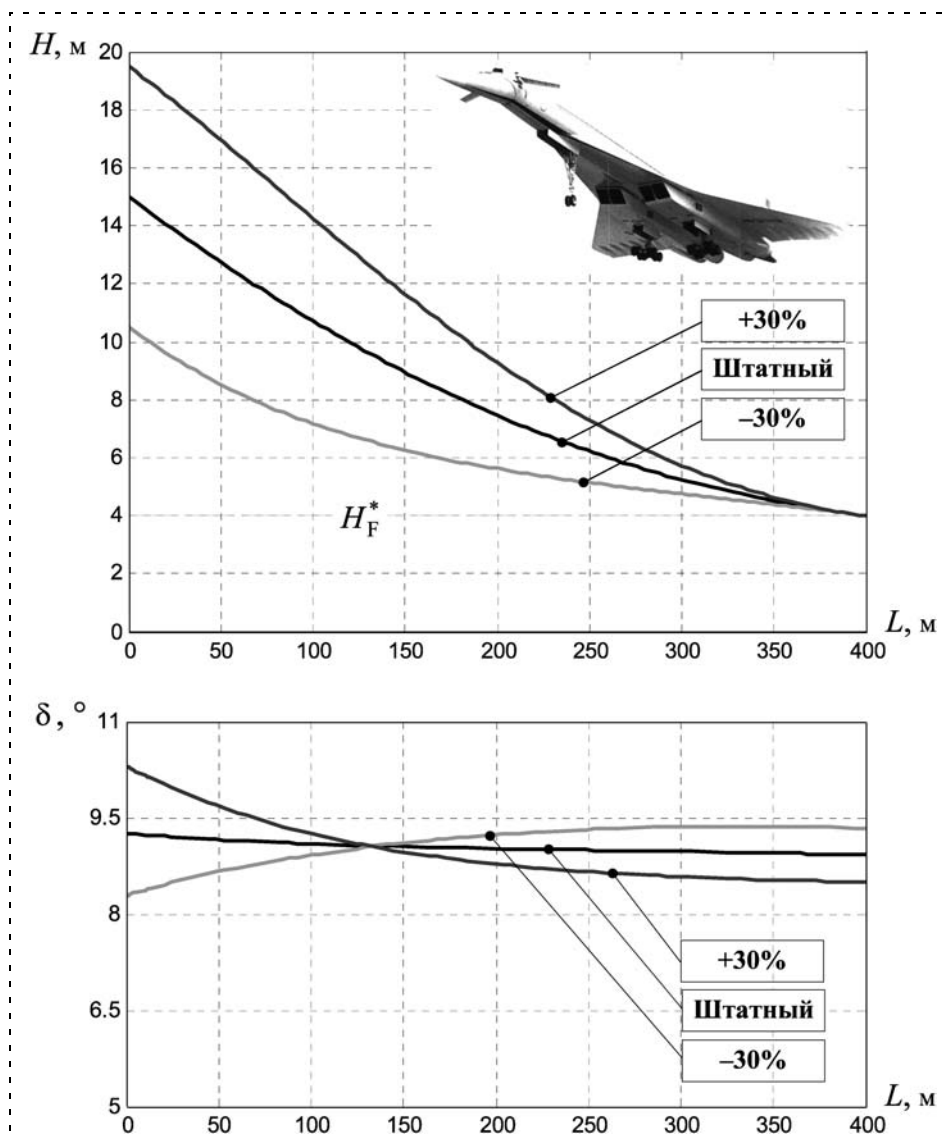


Рис. 6

В условиях пространственной синхронизации процесса посадки вместо целевого значения времени полета  $t_F$  необходимо задавать его дальность  $L_F$ . Для рассматриваемого примера полагаем  $L_F = 400$  м.

Имеем краевые условия для планируемой траектории:

$$H^*(0) = H_0^*, H^*(L_F) = H_F^*; \quad (30)$$

$$\left. \frac{dH^*}{dL} \right|_{L=0} = \operatorname{tg} \theta_0^*, \quad \left. \frac{dH^*}{dL} \right|_{L=L_F} = \frac{\dot{H}_F^*}{V_F^*}. \quad (31)$$

Желаемые траектории посадки конструировались в классе квазимногочленных функций:

$$H^*(L) = (H_0^* - H_F^*) \exp(-\lambda \tilde{L}) \times \\ \times (1 + a_{H1} \tilde{L} + a_{H2} \tilde{L}^2)(1 - \tilde{L}) + H_F^*, \quad (32)$$

где  $\tilde{L} = L/L_F$  и  $\lambda = 3/4$ . Заметим, что функции вида (32) автоматически удовлетворяют краевым условиям (30). Неизвестные параметры  $a_{H1}$  и  $a_{H2}$  определяются исходя из равенств (31). Для штатного режима посадки  $a_{H1} = -1,715$ ;  $a_{H2} = 0,822$ .

Расчетное время выполнения маневра  $t_F$  для трех рассмотренных вариантов высоты начала маневра составляет: для штатной высоты — 5,05 с; для высоты с занижением на 30 % — 5,09 с; для высоты с завышением на 30 % — 5,02 с.

Разумеется, реализация стратегии "гибких траекторий" осуществляется заменой в построенных алгоритмах начального состояния  $\mathbf{x}_0$  на текущее  $\mathbf{x}$ :

$$H = H^*(\mathbf{x}, L) \Rightarrow \\ \Rightarrow \delta_B = \delta_B^*(\mathbf{x}, L).$$

Современные быстродействующие БЦВМ позволяют планировать траектории на каждом шаге квантования времени, в результате чего данная стратегия реализует механизм обратной связи.

Изложенный подход трудно обобщить применительно к моделям управляемых движений ЛА общего вида (4)–(7).

Концепция пространственной синхронизации планируемых траекторий представляется особенно актуальной для задач автоматизации процессов посадки ЛА на ограниченные площадки.

**Пример: посадка самолета корабельного базирования.** В работе [31] описан процесс посадки самолета корабельного базирования с вертикальным вектором тяги. Он разбивается на три фазы: торможение, "висение" и вертикальное снижение, для которых логична именно пространственная синхронизация процесса управления, т. е. формирование параметров управляемого движения как функций дальности до посадочной площадки. Показательно, что не временной, а *позиционный* смысл имеют и сами используемые в [31] термины: "приведение по дальности", "вертикальное наведение" и др.

## Заключение

Кратко подытожим вышеизложенное:

- важнейшей спецификой задач терминального управления ПО являются целевые требования к кинематической структуре траекторий движения;
- принцип "гибких траекторий" логично интегрировать с кинематическим формализмом и на этой теоретической основе формировать стратегии управления ПО;
- наряду с временной возможна также пространственная синхронизация планируемых траекторий движения ПО, которая лучше отвечает многим прикладным задачам терминального управления;
- рассмотренный в статье комплекс вопросов и предложенная концепция "гибких кинематических траекторий" могут служить основой для формирования нового перспективного направления в теории управления ПО, актуального для инженерных приложений.

## Список литературы

1. Красовский Н. Н. Теория управления движением. М.: Наука, 1968.
2. Летов А. М. Динамика полета и управление. М.: Наука, 1969.
3. Петров Б. Н., Портнов-Соколов Ю. П., Андриенко А. Я., Иванов В. П. Бортовые терминальные системы управления: Принципы построения и элементы теории. М.: Машиностроение, 1983.
4. Батенко А. П. Системы терминального управления. М.: Радио и связь, 1984.
5. Хрусталева М. М. Методы теории инвариантности в задачах синтеза законов терминального управления летательными аппаратами. М.: Изд-во МАИ, 1987.
6. Габасов Р., Кириллова Ф. М., Костюкова О. И., Ракетный В. М. Конструктивные методы оптимизации. Ч. 4. Выпуклые задачи. Мн.: Изд-во Университетское, 1987.
7. Гуськов Ю. П. Дискретно-непрерывное управление программным выведением самолетов. М.: Машиностроение, 1987.
8. Бек В. В., Вишняков Ю. С., Махлин А. Р. Интегрированные системы терминального управления. М.: Наука, 1989.
9. Разыграев А. П. Основы управления полетом космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1990.
10. Зонов В. М., Пухов А. Л., Толокнов В. И. Содержательные аспекты прикладных задач терминального управления. М.: Лингвоинформатика, 1992.
11. Разоренов Г. Н., Бахрамов Э. А., Титов Ю. Ф. Системы управления летательными аппаратами. М.: Машиностроение, 2003.
12. Бородавский В. Н. Управление конечными параметрами движения летательных аппаратов ракетной и космической техники. Проектирование процессов и систем управления. М.: МО РФ, 2005.
13. Современная теория систем управления / Под ред. К. Т. Леондеса. М.: Наука, 1970.
14. Филимонов Н. Б. Управление фазовыми траекториями в линейных конечномерных нестационарных объектах // Труды МВТУ. № 297. Системы автоматического управления. Вып. 6. М.: МВТУ, 1979. С. 11—17.
15. Солодовников В. В., Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. Метод фазового пространства в задачах управления линейными конечномерными объектами // Автоматика. 1981. № 2. С. 55—67.
16. Калинин В. Н. Основы теории локально-оптимальных процессов управления. Л.: ЛВИА, 1968.
17. Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. Циклические процессы регулирования в нелинейных объектах // Аналитические методы синтеза регуляторов: Межвуз. науч. сб. Саратов: СПИ, 1988. С. 90—96.
18. Корнев Г. В. Введение в механику управляемого тела. М.: Наука, 1964.
19. Корнев Г. В. Цель и приспособляемость движения. М.: Наука, 1974.
20. Мирошник И. В. Согласованное управление многоканальными системами. Л.: Энергоатомиздат, 1990.
21. Бойчук Л. М. Синтез координирующих систем автоматического управления. М.: Энергоатомиздат, 1991.
22. Горбатенко С. А., Макашов Э. М., Полушкин Ю. Ф., Шефтель Л. В. Расчет и анализ движения летательных аппаратов. Инженерный справочник. М.: Машиностроение, 1971.
23. Котик М. Г. Динамика взлета и посадки самолетов. М.: Машиностроение, 1984.
24. Горбачев М. Г. Новейший самоучитель безопасного вождения. М.: РИПОЛ Классик, 2009.
25. Пухов А. Л., Толокнов В. И., Филимонов Н. Б. Компьютерная сертификация посадочного маневра сверхзвукового пассажирского самолета ТУ-144. М.: ОАО "Туполев", 2001.
26. Гуськов Ю. П., Загайнов Г. И. Управление полетом самолетов: Учебник для авиационных вузов. М.: Машиностроение, 1980.
27. Мерризм К. У. Теория оптимизации и расчет систем управления с обратной связью. М.: Мир, 1967.
28. Поспелов Г. С., Толокнов В. И. Адаптивная оптимальная система управления посадкой космического объекта с аэродинамическим качеством // Управление в пространстве: Сб. трудов IV Междунар. симпозиума ИФАК. Т. 2. М.: Наука, 1973. С. 11—21.
29. Жевнин А. А. Принципы построения системы терминального управления нестационарными линейными объектами на основе обратной задачи динамики // Аналитические методы синтеза регуляторов: Межвуз. науч. сб. Вып. 3. Саратов: Саратов. ун-т, 1978. С. 89—99.
30. Жевнин А. А., Колесников К. С., Крищенко А. П., Толокнов В. И. Синтез алгоритмов терминального управления на основе концепций обратных задач динамики (обзор) // Изв. АН СССР. Техн. кибернетика. 1985. № 4. С. 180—188.
31. Дубовик С. А., Кабанов А. А. Синтез управления посадкой летательного аппарата с вращающимся вектором тяги // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2009. № 2. С. 41—48.

# ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ И ПРЕОБРАЗУЮЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 621.313

**А. В. Свинов**, аспирант,  
alexeyfess@gmail.ru,

**Ю. В. Турыгин**, д-р техн. наук, проф.,  
turygin@isty.ru,

Ижевский государственный  
технический университет, Россия,

**Р. Гартянски**, канд. техн. наук, доц.,  
rene@yhman.tnuni.sk,

**Я. Ситар**, аспирант,  
sitar@yhman.tnuni.sk,

Тренчинский университет  
им. Александра Дубчека, Словакия

## Изучение характеристик и разработка дистанционной системы управления линейным асинхронным двигателем

*Рассматривается дистанционная система управления линейным асинхронным двигателем (ЛАД) для научно-лабораторных целей. Анализируются возможные варианты методов управления ЛАД, и описывается реализация системы управления двигателем. Для связи компьютера и двигателя используются последовательный порт (RS232 или RS485) и специальный USB-адаптер. Разработана электрическая принципиальная схема для системы мониторинга линейного асинхронного двигателя на основе микроконтроллера PIC. Приводятся результаты моделирования дистанционной системы управления линейным асинхронным двигателем в программном продукте LabVIEW.*

**Ключевые слова:** линейный асинхронный двигатель, дистанционная система управления, микроконтроллер PIC, LabVIEW

### Введение

В основу построения мехатронных систем (МС) заложена идея глубокой взаимосвязи (энергетической, информационной) механических, электронных и компьютерных элементов. Мехатронные системы нашли широкое применение при создании различных средств комплексной автоматизации производства (конвейеров, транспортеров, поворотных столов, вспомогательных манипуляторов). Также на базе мехатронных модулей созданы управляемые энергетические машины (турбины и генераторы), станки и промышленные роботы с числовым программным управлением [1]. Мехатронные системы настолько сильно интегрированы в совре-

менную жизнь, что существование без них представить просто невозможно. Интересные и широкие перспективы развития электропривода связаны с применением так называемых линейных двигателей.

Линейные асинхронные двигатели позволяют преобразовывать электрическую энергию непосредственно, без использования механических передач в поступательное или возвратно-поступательное перемещение рабочих органов станков, манипуляторов и промышленных роботов. Благодаря этому происходит снижение механических потерь, упрощение кинематической схемы, повышение надежности и точности управления.

Линейные двигатели могут быть асинхронными, синхронными и постоянного тока, повторяя по принципу своего действия соответствующие двигатели вращательного движения [2].

В настоящее время актуальной задачей является создание имитационных систем, моделей дистанционного управления различными объектами, впоследствии используемых для эффективного решения поставленных задач. Возникает необходимость в подготовке высококвалифицированных кадров, вооруженных современными знаниями и практическими навыками. Благодаря системам и моделям дистанционного управления существует возможность решать проблемы по изучению различных характеристик удаленного объекта. Таким образом, обладая дистанционной системой управления, можно получить определенные навыки и знания, сократить затраты по оснащению учебного процесса. Поэтому создание имитационных моделей позволяет генерировать модели систем "двигатель—компьютер", с помощью которых можно изучить различные методы управления двигателем, что является актуальной задачей.

### Лабораторная модель линейного асинхронного двигателя

Линейные асинхронные машины по конструктивным признакам и особенностям физических процессов подразделяются на машины с поперечным и аксиальным магнитным потоком.

Отметим, что линейные двигатели очень часто работают в так называемом обращенном режиме движения, когда вторичный элемент неподвижен, а передвигается статор. Такой линейный двигатель, получивший название двигателя с подвижным статором, находит, в частности, широкое применение на электрическом транспорте (рис. 1).



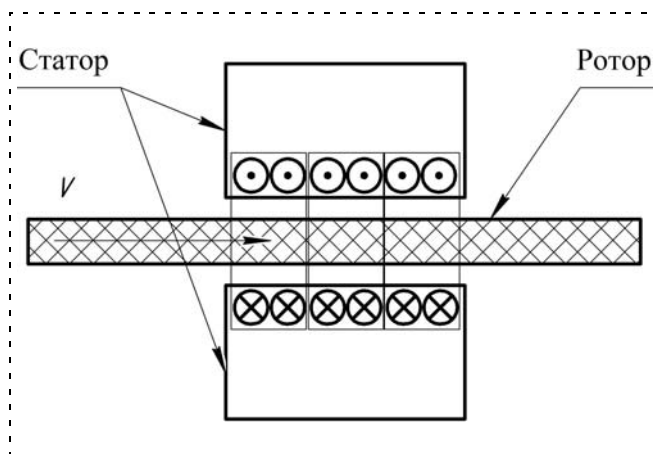


Рис. 1. Лабораторная модель линейного асинхронного двигателя

На работу линейного двигателя оказывают существенное влияние краевые эффекты, возникающие из-за конечных размеров разомкнутых магнитопроводов элементов. Это приводит к ухудшению таких характеристик, как тяговое усилие, коэффициент мощности и КПД.

#### Дистанционная система управления линейного асинхронного двигателя

В настоящее время современные инновационные технологии используются практически во всех сферах деятельности человека. Интернет-технологии не являются исключением, и их применение дает огромный положительный результат, заключающийся, прежде всего, в возможности преодоления огромных расстояний без потери информации.

При разработке данного проекта возникла необходимость выбора соединения элементов системы "двигатель—компьютер". Существуют несколько способов реализовать такое соединение. Использование интерфейса RS485 позволит напрямую соединиться с двигателем, но в этом случае возникает проблема, так как не все компьютеры обладают возможностью использовать RS485 без специальных устройств. Следующая возможность — это использовать передачу данных с помощью USB. Большинство компьютеров обладают как минимум одним разъемом USB, но двигатель не обладает возможностью приема/передачи данных по каналу USB. Существует еще один вариант реализации системы "двигатель—компьютер" — это использование стандарта ANSI/IEEE 488.1—1987, также известного как General Purpose Interface Bus (GPIB), который описывает интерфейс для коммутации между приборами и контроллерами различных производителей и содержит информацию об электрических, механических и функциональных параметрах. Имеющееся оборудование поддерживает этот стандарт, но для двигателя требуется специальное оборудование.

В настоящее время дистанционное управление находит широкое применение в различных областях деятельности человека. С помощью дистанционного управления реализуются следующие функции: мониторинг, изменение различных параметров и т. п.

Система "двигатель—компьютер", как правило, реализуется в соответствии со следующими требованиями:

- надежность и стабильность: система должна четко выполнять свои функции, а в случае каких-либо неполадок либо сообщать о проблемах, либо автоматически выключаться. Должна быть защищена от внешних электрических воздействий;
- простота: система должна быть простой и понятной в использовании, обладать понятным интерфейсом;
- устойчивый канал передачи данных должен обеспечивать надежность передачи управляющей информации;
- скорость передачи данных: система должна быстро передавать данные без существенных задержек.

Основная проблема управления через сеть Интернет — наличие существенных произвольных временных задержек в канале связи. Это делает управление через Интернет затруднительным, а во многих случаях невозможным.

В ходе проектирования научно-лабораторного комплекса решены следующие задачи:

- 1) разработка стенда по исследованию скоростных характеристик линейного асинхронного двигателя (ЛАД);
- 2) разработка системы мониторинга положения двигателя на основе микропроцессорной системы;
- 3) разработка приема и передачи данных системы "двигатель—компьютер" в режиме реального времени и программы управления ЛАД в программном продукте LabVIEW;
- 4) создание методического пособия для выполнения лабораторных работ на стенде.

Для реализации дистанционного управления применяется инструмент Web Publishing Tool программного продукта LabView. При этом последовательно выполняются следующие операции:

- на основе запускаемого на серверной машине приложения создаются HTML-документы;
- встраивается статическое или анимированное изображение передней панели;
- добавляется текст в верхней и нижней частях изображения передней панели;
- может быть создана линия окаймления вокруг изображения [3].

При анализе системы используется функциональный подход, т. е. рассматриваются цели и функции системы и ее подсистем (рис. 2).

В лабораторном стенде реализована система управления ЛАД, позволяющая исследовать скоростные характеристики и осуществлять функцию

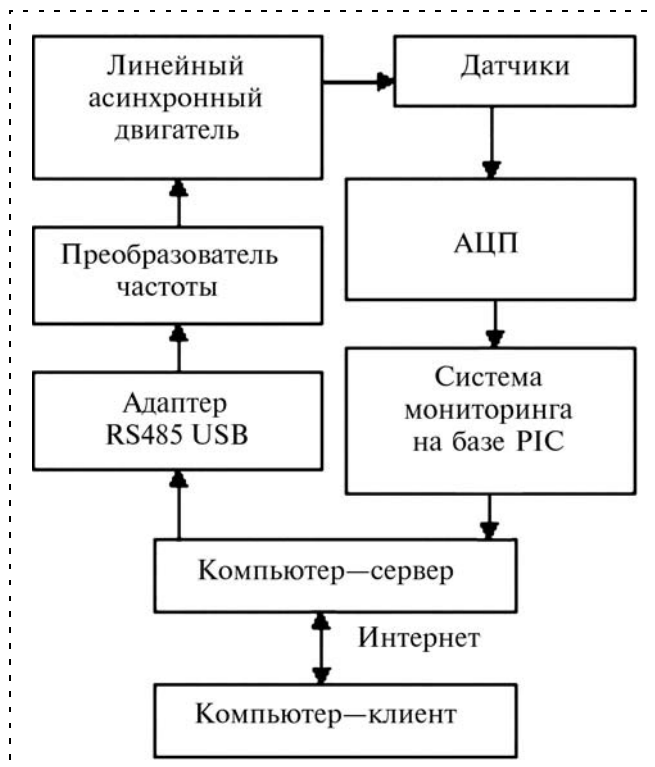


Рис. 2. Структурная схема системы дистанционного управления линейным асинхронным двигателем

мониторинга линейного асинхронного двигателя (рис. 3). С помощью установленных на статоре двигателя датчиков получаем необходимую для определения положения двигателя информацию.

В лабораторном стенде используется модель ЛАД: LA050 — 3708 — GH — X3 — 001, параметры двигателя следующие:  $F_{\text{реак}} = 300 \text{ Н}$ ,  $L = 100 \text{ мГн}$ ,  $I_{\text{реак}} = 5 \text{ А}$ ,  $R = 26,5 \text{ Ом}$ ,  $U = 560 \text{ В}$ .

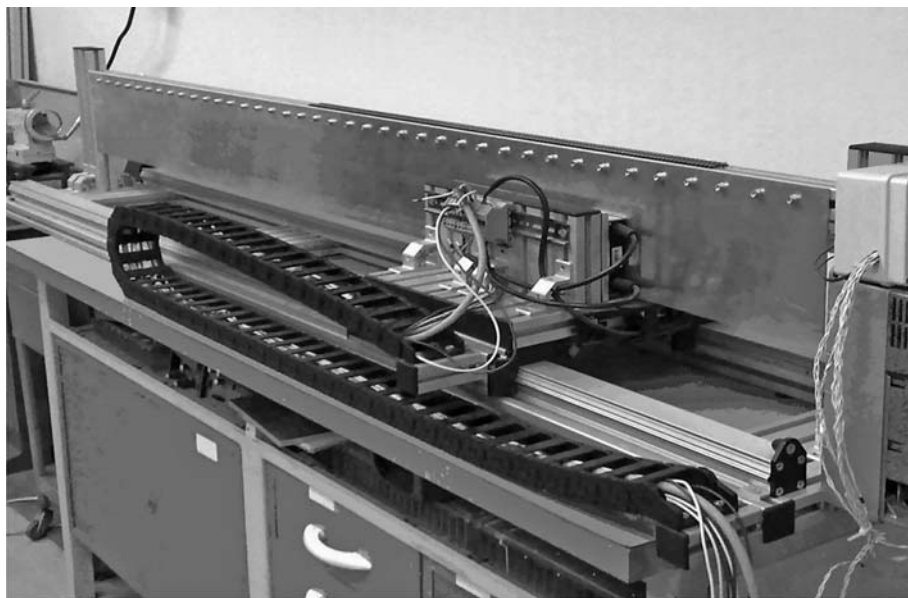


Рис. 3. Лабораторная модель линейного асинхронного двигателя и преобразователя частоты

В качестве обрабатывающего устройства используется микроконтроллерная система на базе PIC24FJ256GB108. Данный микроконтроллер обладает всеми необходимыми качествами, подходящими для данной работы.

Двигатель управляется за счет преобразователя частоты Commander SE Control Techniques. Commander SE — это новейший преобразователь частоты, предназначенный для управления серийными и специальными асинхронными электродвигателями переменного тока как в скалярном режиме, так и в режиме бессенсорного вектора.

Преимущества Commander SE следующие: минимальный шум электродвигателя и максимальная защита привода с помощью интеллектуального контроля температуры; последовательная связь RS485 — стандарт для всех габаритных размеров; дополнительные модули связи, позволяющие поддерживать: стандарты наиболее распространенных сетей Profibus-DP, DeviceNet, CAN Open, Interbus S и CT Net; возможность для пользователя получить доступ по интерфейсу к таким расширенным функциям, как ПИД-регулятор, автопотенциометр, восемь предустановленных скоростей, программируемый компаратор, программируемые аналоговые входы, программируемые дискретные входы, программируемая логика, управление вторым электродвигателем.

Так как преобразователь частоты Commander SE может получать и передавать данные только по полудуплексному каналу связи RS485, то для связи с компьютером необходимо разработать конвертер RS485-USB.

Структурная схема (см. рис. 2) отображает работу дистанционной системы управления линейным асинхронным двигателем. Через сеть Интернет данные передаются с компьютера-клиента на компьютер-сервер, таким образом формируется управляющий запрос. С помощью адаптера данные передаются с компьютера-сервера на преобразователь частоты, с помощью которого происходит процесс управления двигателем. Датчики, которые располагаются на двигателе, считывают перемещение статора двигателя. Информация от датчиков попадает на АЦП микроконтроллера. После преобразования информация обрабатывается микроконтроллером, таким образом получают данные о скоростных характеристиках линейного асин-

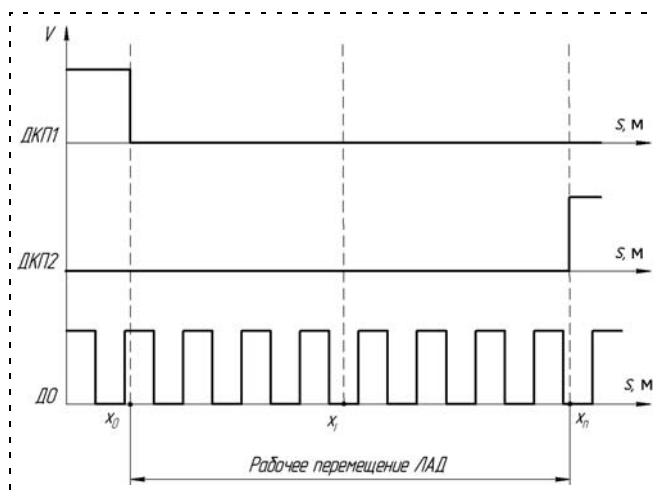


Рис. 4. Сигналы оптических датчиков

хронного двигателя. Эти данные отправляются на компьютер-сервер по каналу USB, где по ним строится необходимый график скорости и ускорения. Компьютер-клиент обладая доступом к компьютеру-серверу, может получить всю необходимую ему информацию.

Для исследования характеристик линейного асинхронного двигателя по всей длине рабочего пространства установлена измерительная линейка

с постоянным шагом (5 мм). С помощью датчиков конечного положения устанавливается рабочее перемещение ЛАД (рис. 4).

При достижении конечного положения двигатель автоматически останавливается. Это необходимо для сохранения конструкции двигателя и безопасной работы с ним. Так как двигатель может развивать высокую скорость за малый промежуток времени (до 6 м/с), то необходимо организовать точное рабочее пространство линейного двигателя. Данная система мониторинга позволяет определить положение двигателя в зоне рабочего перемещения. Например, при остановке двигателя в точке  $x_i$  оптический датчик передает сигналы на микроконтроллер через встроенные АЦП. Микроконтроллер подсчитывает полученные импульсы, затем, обрабатывая их, получает пройденное двигателем расстояние. После сравнения этих данных с длиной рабочего пространства ЛАД определяется точное положение двигателя. В следующий раз двигатель начнет движение из точки  $x_i$  рабочей зоны.

### Программа управления ЛАД в LabVIEW

Использование сети Интернет в процессе обучения является основным фактором, влияющим на скорость распространения данного вида обучения.

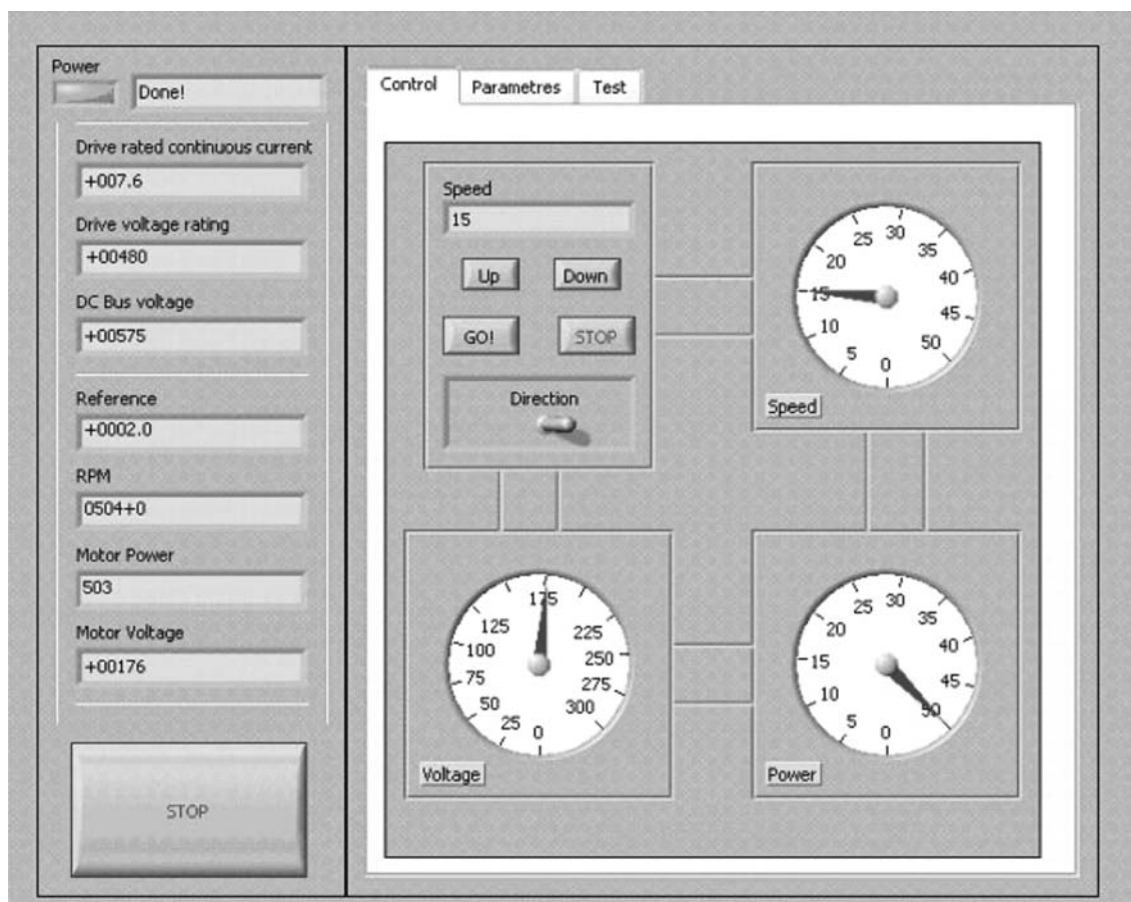


Рис. 5. Панель управления

Студенту достаточно иметь подключение к сети Интернет, чтобы выполнять практические и лабораторные занятия.

Программа управления реализует следующие функции:

- коммуникацию с преобразователем частоты;
- контроль параметров двигателя (скорость, токи, направление, температуру);
- регулирование характеристик (скорость, ускорение, направление движения, "старт—стоп");
- остановку двигателя при достижении конечных датчиков положения.

Интерфейс программы условно разделен на три части:

- отображение текущих параметров двигателя;
- установка динамических характеристик (рис. 5);
- управление двигателем (рис. 6).

Функции удаленного мониторинга и управления можно реализовать, используя как стандартные Web-браузеры, так и LabVIEW. Когда происходит открытие передней панели на удаленном клиенте, Web-сервер выгружает HTML-документ передней панели в ПК клиента [4]. При этом блок-схема приложения и все подпрограммы (subVIs) остаются в памяти сервера. Однако удаленные кли-

енты могут взаимодействовать с элементами управления исполняемой программы LabVIEW так же просто и быстро, как если бы код исполнялся на клиентской машине. Для доступа к Web-серверу через браузер необходимо проинсталлировать на клиентской машине компонент LabVIEW RunTime Engine. Если Web-сервер запущен, то, запустив браузер и набрав строку адреса HTML-документа (URL), пользователи получают удаленный доступ к исполняемому на серверной машине виртуальному инструменту VI (VI — virtual instruments). Строка содержит IP-адрес ПК сервера и имя HTML-файла. Кроме того, если сервером используется нестандартный TCP/IP-порт, то требуется указать и его.

Для доступа к серверу из удаленного клиента средствами LabVIEW необходимо открыть новый VI и выбрать Operate  $\Rightarrow$  Connect to Remote Panel. В открывшемся диалоговом окне необходимо внести Интернет-адрес сервера и имя VI, который необходимо просматривать [5].

В случае непредвиденных сбоев в сети или различного рода разрывов в Интернет-соединении контроль над двигателем теряется, т. е. контроль передается обратно компьютеру-серверу, и двигатель автоматически останавливается.

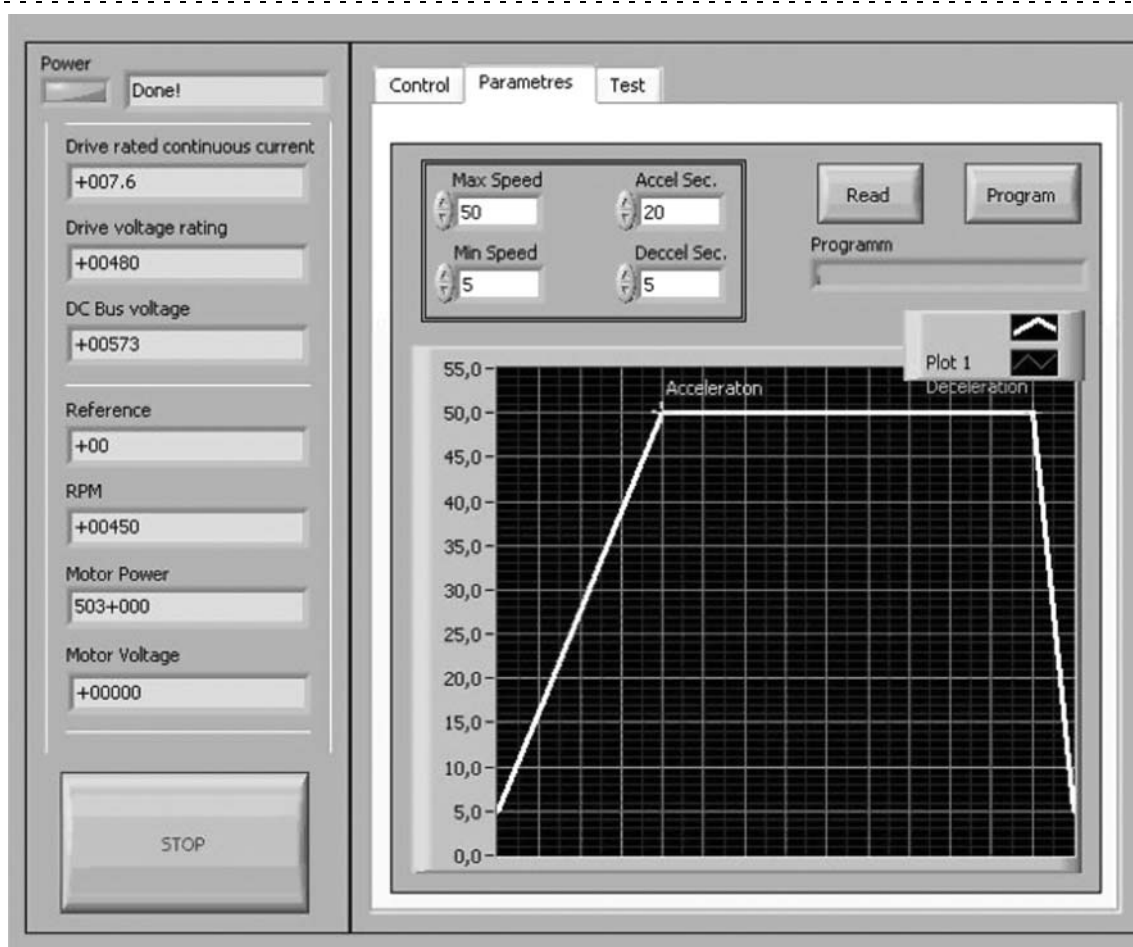


Рис. 6. Задание режимов движения

## Заключение

В целях совершенствования учебного процесса был разработан лабораторный стенд для исследования скоростных характеристик линейного асинхронного двигателя в научно-исследовательских целях. Весь комплекс работ по созданию научно-лабораторного комплекса для изучения и исследования свойств ЛАД выполнен в соответствии с программой сотрудничества в области образования, научных исследований и академических обменов между факультетом "Управление качеством" ГОУ ВПО "Ижевский государственный технический университет" и факультетом "Мехатроника" Тренчинского университета им. Александра Дубчека в г. Тренчин на 2008—2011 гг.

Разработано методическое пособие для студентов по изучению дистанционной системы управле-

ния линейным асинхронным двигателем и исследованию его характеристик. Проведена апробация выполнения лабораторной работы в соответствии с методическим пособием

## Список литературы

1. Подураев Ю. В., Кулешов В. С. Принципы построения и современные тенденции развития мехатронных систем // Мехатроника. 2000. № 1. С. 5—10.
2. Веселовский О. Н., Коняев А. Ю., Сарапулов Ф. Н. Линейные асинхронные двигатели. М.: Энергоатомиздат, 1991. 256 с.
3. Патрахин В. А. Технология публикации приложений LabVIEW в Internet (WEB Publishing Tool) // Промышленные измерения, контроль, автоматизация, диагностика. 2004. № 3. С. 28—30.
4. Тревис Дж. LabVIEW для всех / Джеффри Тревис: Пер. с англ. Клушин Н. А. М.: ДМК Пресс; Прибор комплект, 2005. 544 с.
5. Загидуллин Р. Ш. LabVIEW в исследованиях и разработках. М.: Горячая линия — Телеком, 2005. 352 с.

УДК 681.587

**Т. С. Буканова**, аспирант,  
Марийский государственный  
технический университет,  
bukanova-tc@yandex.ru

## Способ управления и модель электрической машины с дифференциальным торможением

*Предложен электропривод на основе асинхронной электрической машины с дифференциальным торможением. Обоснован способ управления электрической машиной, для реализации управления разработана структура технических средств электропривода. Представлена математическая и имитационная модель электрической машины с дифференциальным торможением. Проведены имитационные исследования закономерности функционирования электрической машины.*

**Ключевые слова:** электрическая машина с дифференциальным торможением, способ управления электрической машиной, математическая модель

## Введение

Качество управления технологическими переменными определяется параметрами исполнительных механизмов, в основе которых лежит электропривод.

В настоящее время наблюдается тенденция к упрощению механических компонентов технологического оборудования и усложнению электротехнических компонентов. При проектировании нового технологического оборудования стремятся к использованию "коротких" механических передач

и безредукторных электроприводов, существенным выигрышем в применении которых является достижение более высоких качественных показателей систем управления движением исполнительных органов машин и технологическими переменными, а также более высокой надежности механизмов. Это объясняется тем, что механическая передача, будучи охваченной обратными связями, существенно ограничивает полосу пропускания частот системы управления из-за наличия упругих механических колебаний. Простейшие механические передачи промышленного применения имеют несколько частот упругих колебаний, определяемых податливостью зубьев, валов и опор. Расширение возможностей механических передач происходит за счет применения устройств выборки люфтов, что ведет к усложнению конструкции передачи [1]. Исходя из сказанного актуальным остается использование безредукторных приводов и мехатронных систем для технологического оборудования высокой производительности и качества.

Известен электропривод с дифференциальным торможением, представляющий собой соединенные последовательно асинхронный двигатель и дифференциал, осуществляющий распределение вырабатываемой мощности на две составляющие: первая направляется к нагрузке электропривода (рабочему органу технологического аппарата), вторая — к генератору для преобразования механической мощности в электрическую. Представленный электропривод позволяет получить улучшенные механические характеристики, расширение области применения, функционирование в режиме энергосбережения [2].

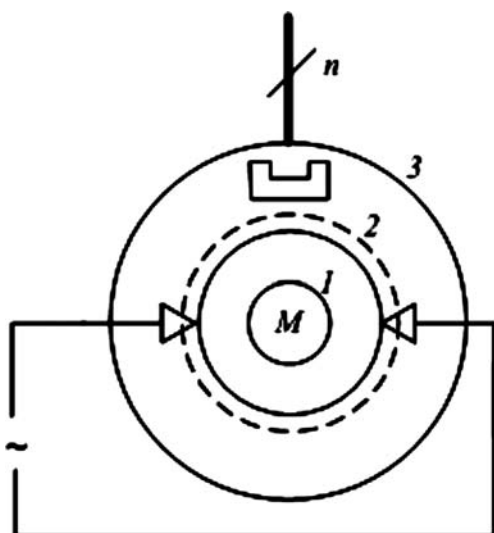


Рис. 1. Условное обозначение электрической машины с дифференциальным торможением:

1 — внутренний короткозамкнутый ротор; 2 — промежуточный ротор, с внешней стороны установлены постоянные магниты; 3 — статор электрической машины с обмоткой

С учетом тенденции использования технологического оборудования без механической связи устройств в основе электропривода предложено использовать конструктивно единое электромеханическое устройство, состоящее из двух взаимосвязанных подсистем, выполняющих функции двигателя и генератора, — электрическую машину с дифференциальным торможением (рис. 1) [3].

В основе электрической машины лежит конструкция асинхронного двигателя, отличающаяся тем, что статор двигателя выполнен подвижным, являясь промежуточным ротором электрической машины; статор электрической машины охватывает промежуточный ротор; на внешней стороне промежуточного ротора размещены группы постоянных магнитов, взаимодействующие и наводящие ЭДС в обмотке статора электрической машины [4].

Целью работы является обоснование принципа управления электрической машиной с дифференциальным торможением, математическое описание электрической машины, обоснование и разработка структуры электропривода и исследование закономерностей его функционирования при управлении.

#### Способ управления электрической машиной с дифференциальным торможением

При работе генераторной части электрической машины на нагрузку ограниченной мощности электрические параметры модели "источник тока — нагрузка" можно разделить на две группы (рис. 2): внутренние электрические характеристики генера-

торной части электрической машины и внешние электрические характеристики нагрузки.

Со стороны электрической машины на силу тока оказывает влияние внутреннее сопротивление генераторной части электрической машины ( $Z_0$ ), которое определяется следующим образом:

$$Z_0 = \sqrt{R_0^2 + X_0^2},$$

где  $R_0$  — активное сопротивление генераторной части электрической машины;  $X_0$  — индуктивное сопротивление генераторной части электрической машины.

Со стороны электрической нагрузки на параметры тока влияет сопротивление электрической нагрузки ( $Z_H$ ), вычисляемое как

$$Z_H = \sqrt{R_H^2 + X_H^2},$$

где  $R_H$  — активное сопротивление электрической нагрузки;  $X_H$  — индуктивное сопротивление электрической нагрузки.

На электрической нагрузке выделяется мощность  $P_H$ , определяемая следующим соотношением:

$$P_H = I^2 R_H = \frac{E_0 R_H}{\sqrt{(R_0 + R_H)^2 + (X_0 + X_H)^2}},$$

где  $E_0$  — ЭДС генераторной части электрической машины;  $I$  — сила тока, протекающего в контуре "источник тока — нагрузка".

На основе анализа модели "источник тока — нагрузка" можно сформулировать способ управления электрической машиной с дифференциальным торможением, который заключается в изменении электрических параметров контура "генераторная часть — электрическая нагрузка", влияющих на выделяемую нагрузкой мощность.

Таким образом, управлять выделяемой электрической мощностью предложенной машины можно

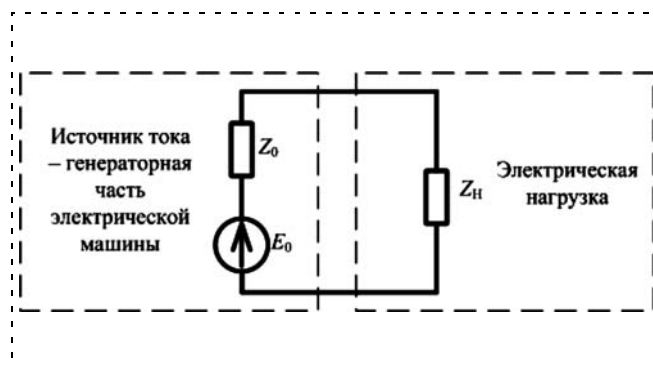


Рис. 2. Модель "источник тока — нагрузка"

путем изменения параметров как электрической нагрузки ( $Z_H$ ), так и внутренних параметров генераторной части ( $Z_0$ ). Предложенная конструкция электрической машины позволяет управлять двигательной частью электрической машины с помощью всех представленных параметров, изменяя внешнюю нагрузку ( $R_H$ ,  $X_H$ ) и внутренние характеристики ( $R_0$ ,  $X_0$ ) путем варьирования числа действующих катушек генераторной обмотки.

При дальнейшем рассмотрении будем полагать неизменными характеристики генераторной части электрической машины.

### Математическая модель электрической машины с дифференциальным торможением

С учетом конструкции, принципа функционирования и управления электрической машиной разработана структура модели, которая представлена на рис. 3. Данная модель отражает взаимосвязь параметров электрической машины и позволяет получить основные характеристики электрической машины.

Модель представлена совокупностью взаимосвязанных динамических звеньев, описывающих преобразование входного сигнала в выходной. Представленные динамические звенья являются основными этапами преобразования энергии в электрической машине: электромеханическое преобразование энергии в двигательной части электрической машины, электромеханическое преобразование энергии в генераторной части электрической машины и распределение потоков электромагнитной энергии между роторами машины [2, 5, 6].

Математическая модель электромагнитного преобразования энергии в двигательной части электрической машины представлена в виде совокупности

дифференциальных уравнений в нормальной форме Коши, описывающей изменение параметров объекта во времени, записанной во вращающейся системе координат ( $\alpha$ ,  $\beta$ ):

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \psi_{2\alpha} &= u_{2\alpha} - \frac{1}{\sigma T_2} \psi_{2\alpha} + \frac{k_1}{\sigma T_2} \psi_{2\alpha} + \\ &+ \omega_0 \psi_{2\beta} - \psi_{1\beta} (\omega_0 - \omega_{12}); \\ \frac{d}{dt} \psi_{1\alpha} &= \frac{1}{\sigma T_1} \psi_{1\alpha} + \frac{k_1}{\sigma T_1} \psi_{2\alpha} + \psi_{1\beta} (\omega_0 - \omega_{12}); \\ \frac{d}{dt} \psi_{1\beta} &= \frac{1}{\sigma T_1} \psi_{1\beta} + \frac{k_1}{\sigma T_1} \psi_{2\beta} - \psi_{1\alpha} (\omega_0 - \omega_{12}); \\ \frac{d}{dt} \psi_{2\beta} &= u_{2\beta} - \frac{1}{\sigma T_2} \psi_{2\beta} + \frac{k_2}{\sigma T_2} \psi_{1\beta} - \\ &- \omega_0 \psi_{2\alpha} + \psi_{1\alpha} (\omega_0 - \omega_{12}); \\ M_{12} &= \frac{3}{2} p_2 \frac{k_2}{\sigma L_1} (\psi_{1\alpha} \psi_{2\beta} - \psi_{2\alpha} \psi_{1\beta}), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $u_{2\alpha}$ ,  $u_{2\beta}$  — проекции напряжения промежуточного ротора, подаваемого на его вход;  $\psi_{1\alpha}$ ,  $\psi_{1\beta}$  — проекции потокосцепления внутреннего ротора;  $\psi_{2\alpha}$ ,  $\psi_{2\beta}$  — проекции потокосцепления промежуточного ротора;  $M_{12}$  — электромагнитный момент, развиваемый двигательной частью электрической машины;  $p_2$  — число полюсов внутренней обмотки промежуточного ротора двигательной части машины;  $\omega_0$  — частота напряжения питающей сети;  $\omega_{12}$  — суммарная частота вращения валов электрической машины.

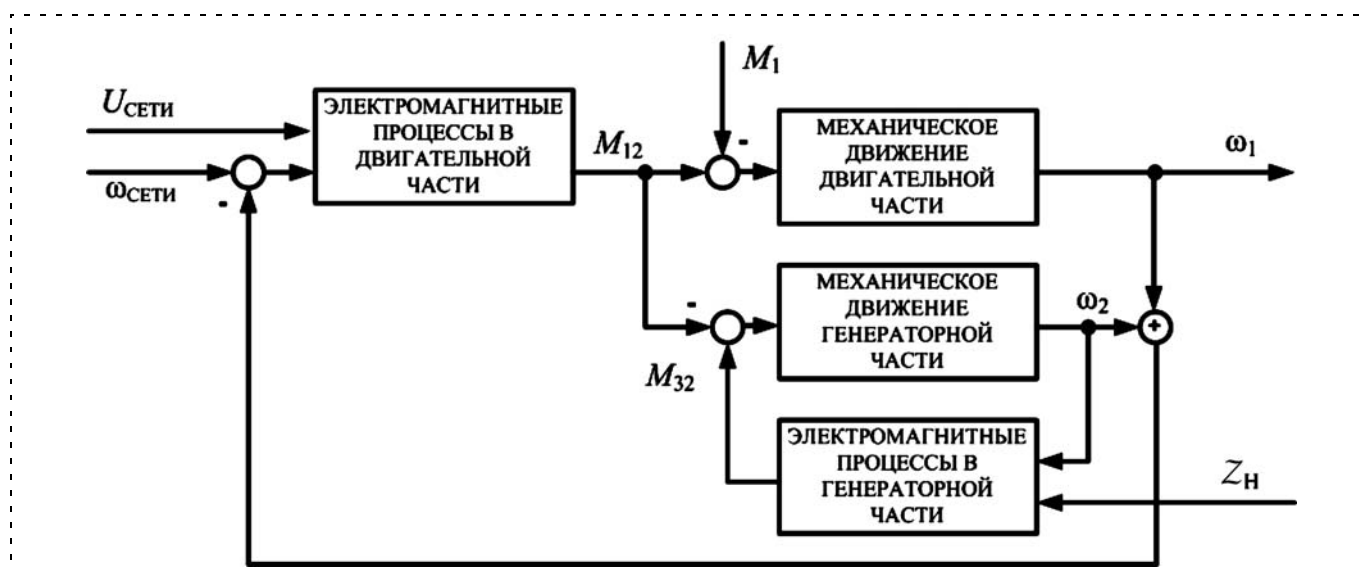


Рис. 3. Структура модели электрической машины с дифференциальным торможением

Коэффициенты параметров модели определяются следующим образом:

$$k_2 = \frac{L_{12}}{L_2}; k_1 = \frac{L_{12}}{L_1}; T_1 = \frac{L_1}{r_1}; T_2 = \frac{L_2}{r_2};$$

$$\sigma = \frac{1 - L_{12}^2}{L_2 L_1} = \frac{1 - L_{12}^2}{L_1 L_2} = 1 - k_1 k_2,$$

где  $r_1$  — активное сопротивление обмотки внутреннего ротора;  $r_2$  — активное сопротивление обмотки промежуточного ротора;  $L_1$  — полная индуктивность обмотки внутреннего ротора;  $L_2$  — полная индуктивность внутренней обмотки промежуточного ротора (в данном случае рассматривается симметричная электрическая машина, т. е. параметры обмоток электрической машины по осям ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) равны);  $L_{12}$  — взаимная индуктивность обмоток внутреннего ротора и промежуточного ротора.

Уравнения механического движения двигательной части электрической машины представлены уравнением

$$\frac{J_1}{p_2} \frac{d\omega_1}{dt} = M_{12} - M_1, \quad (2)$$

где  $\omega_1$  — частота вращения внутреннего ротора электрической машины — выходного вала устройства, соединенного с механической нагрузкой;  $J_1$  — момент инерции вращающихся частей механической нагрузки;  $M_1$  — момент механической нагрузки двигательной части электрической машины.

Математическая модель электромагнитных процессов в генераторной части электрической машины с постоянными магнитами без учета демпферной обмотки при работе на сеть ограниченной мощности с активной нагрузкой представлена в виде совокупности дифференциальных уравнений в нормальной форме Коши, описывающей изменение параметров объекта во времени во вращающейся системе координат ротора ( $d, q$ ):

$$\frac{d\psi_{3d}}{dt} = \frac{\psi_{3d} - L_{dm} i_{m0}}{L_{3d}} (Z_H - r_{3d}) + \omega_2 \psi_{3q};$$

$$\frac{d\psi_{3q}}{dt} = \frac{\psi_{3q}}{L_{3d}} (Z_H - r_{3q}) - \omega_2 \psi_{3d};$$

$$i_{3d} = \frac{\psi_{3d} - L_{dm} i_{m0}}{L_{3d}}; i_{3q} = \frac{\psi_{3q}}{L_{3d}};$$

$$M_{32} = \frac{3p_3}{2} (\psi_{3d} i_{3q} - \psi_{3q} i_{3d}), \quad (3)$$

где  $\psi_{3d}$ ,  $\psi_{3q}$  — проекции потокосцепления статора генераторной части электрической машины на оси системы координат ( $d, q$ );  $i_{3d}$ ,  $i_{3q}$  — токи обмотки статора электрической машины по осям ( $d, q$ );  $r_{3d}$ ,  $r_{3q}$  — активное сопротивление обмотки статора электрической машины по осям ( $d, q$ );  $L_{3d}$ ,  $L_{3q}$  —

индуктивности обмотки статора электрической машины по осям ( $d, q$ );  $Z_H$  — электрическая нагрузка;  $\omega_2$  — частота вращения промежуточного ротора электрической машины;  $M_{32}$  — электромагнитный момент, вырабатываемый генераторной частью электрической машины, зависящий от электрической нагрузки устройства;  $p_3$  — число пар полюсов обмотки статора электрической машины;  $L_{dm}$  — взаимная индуктивность между обмоткой статора и постоянным магнитом;  $i_{m0}$  — ток фиктивной обмотки возбуждения.

Уравнение механического движения ротора генераторной части — промежуточного ротора электрической машины — имеет вид

$$\frac{J_2}{p_3} \frac{d\omega_2}{dt} = M_{32} - M_{12}, \quad (4)$$

где  $J_2$  — момент инерции вращающихся частей внутреннего ротора генераторной части электрической машины;  $M_{12}$  является двигательным моментом для промежуточного ротора электрической машины.

Уравнение связи движущихся частей электрической машины записывается в виде

$$\omega_{12} = \omega_1 + \omega_2.$$

Работа электрической машины представлена уравнениями процесса распределения электромагнитной мощности, вырабатываемой в двигательной части электрической машины, на две составляющие, каждая из которых используется в технологическом процессе. Распределение мощности между валами электрической машины зависит от приложенной к ним внешней нагрузки  $M_1$  и подключенной электрической нагрузки генератора, влияющей на электромагнитный момент генераторной части  $M_3$  электрической машины.

#### Структура технических средств реализации управления электрической машиной с дифференциальным торможением

Для управления механической нагрузкой электрической машины предложена структура электропривода (рис. 4), реализующая описанный принцип управления электрической машины.

Электрическая машина подключена к источнику переменного тока, внутренний ротор электрической машины соединен с рабочим органом технологического аппарата. Блок сравнения сопоставляет требуемую частоту вращения ( $\omega_{\text{треб}}$ ) с текущим значением частоты внутреннего ротора ( $\omega_1$ ) и выдает сигнал рассогласования. Электронный блок управления на основе сигнала рассогласования частот вращения формирует управляющий сигнал, влияющий на электрические параметры контура "генераторная часть — электрическая нагрузка".



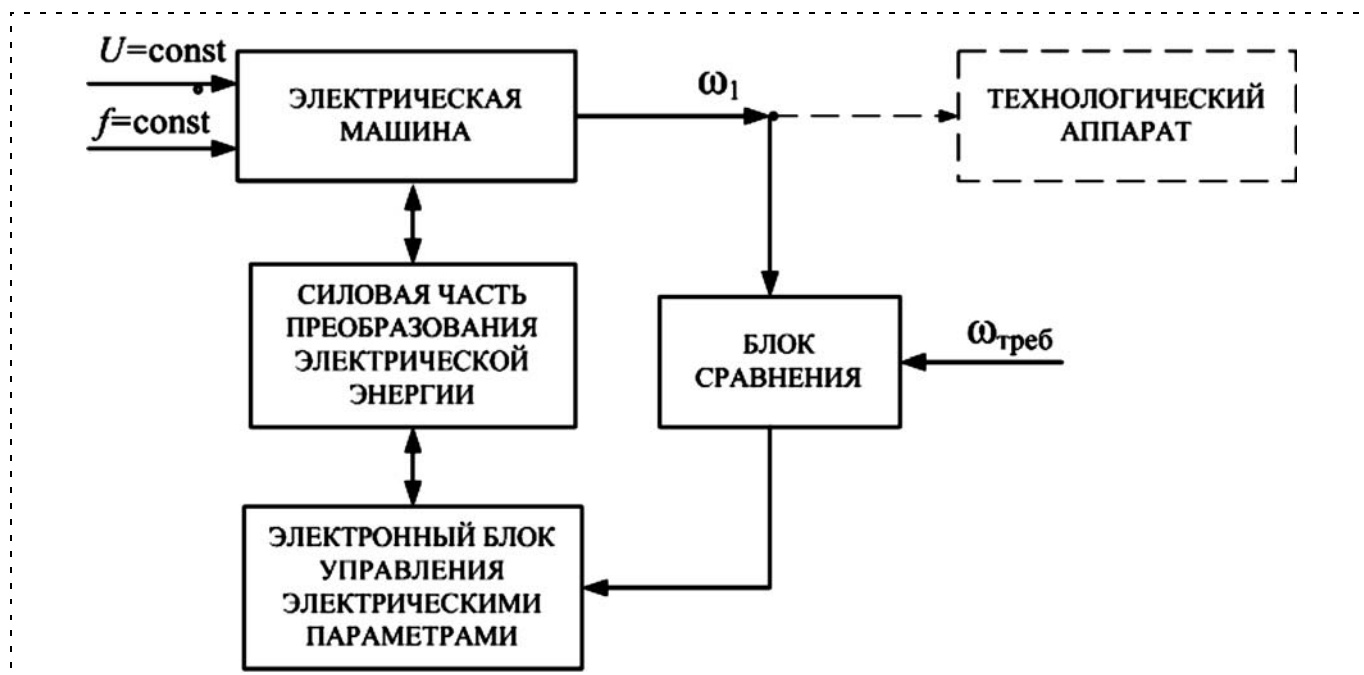


Рис. 4. Структура устройств электропривода для управления электрической машиной с дифференциальным торможением

В состав силовой части преобразования электрической энергии входят высокоскоростные коммутируемые транзисторы, которые обеспечивают ступенчатое изменение электрических параметров и выполняют функции коммутации катушек генераторной обмотки и варьирования подключаемой электрической нагрузки на основе управляющих сигналов.

#### Исследование закономерности функционирования электрической машины методом имитационного моделирования

На основе математической модели синтезирована имитационная модель с использованием пакета прикладного программного обеспечения академической версии VisSim 4.5, позволяющая провести моделирование технического объекта с использованием совокупности дифференциальных уравнений в нормальной форме Коши, описывающих изменение параметров объекта во времени.

Имитационное моделирование функционирования электрической машины проводили с использованием параметров двигательного устройства, основанного на асинхронном электродвигателе с короткозамкнутым ротором марки 4А80А4УЗ мощностью  $P_{\text{ном}} = 1,1$  кВт. Для расчета параметров модели применяли характеристики электродвигателя 4А80А4УЗ [5] и методику расчета коэффициентов модели, приведенные в [6]. Расчет параметров электропривода проводили в области устойчивой работы при номинальном значении момента нагрузки на валу электродвигательного устройства, рассчитанном согласно [6] и составляющем  $M_{1\text{ ном}} = 7,4$  Н · м

при неизменных напряжении, частоте тока питающей сети и внешних сопротивлениях в цепях обмоток статора двигательной части электрической машины.

Для исследования закономерности функционирования электрической машины с дифференциальным торможением проведем имитационное моделирование и рассмотрим реакцию системы на ступенчатое изменение управляющего параметра — активного сопротивления электрической нагрузки. На рис. 5 представлены результаты имитационного моделирования при постоянном моменте механической нагрузки и варьируемом значении электрической нагрузки электрической машины.

В начальный момент времени промежуточный вал электрической машины заторможен внешним электромагнитным тормозом, происходит пуск двигательной части. После завершения переходных процессов в двигательной части ( $M_{12} = 0$ ,  $\omega_1 = \omega_{1\text{ ном}}$ ) в момент времени  $t = 2$  с происходит подключение механической нагрузки электрической машины с моментом, равным номинальному моменту двигательной части ( $M_{1\text{ ном}}$ ) (рис. 5, а), двигательное устройство вырабатывает электромагнитный момент  $M_{12} = M_{1\text{ ном}}$  (рис. 5, в), устанавливается угловая скорость внутреннего ротора  $\omega_1$  (рис. 5, г), которая согласно принципу функционирования двигательного устройства незначительно ниже номинальной угловой скорости.

В момент времени  $t = 5$  с происходит растормаживание промежуточного ротора, причем генераторная часть подключена к минимально допустимой электрической нагрузке (рис. 5, б). Пуск генераторной части приводит к переходному процессу

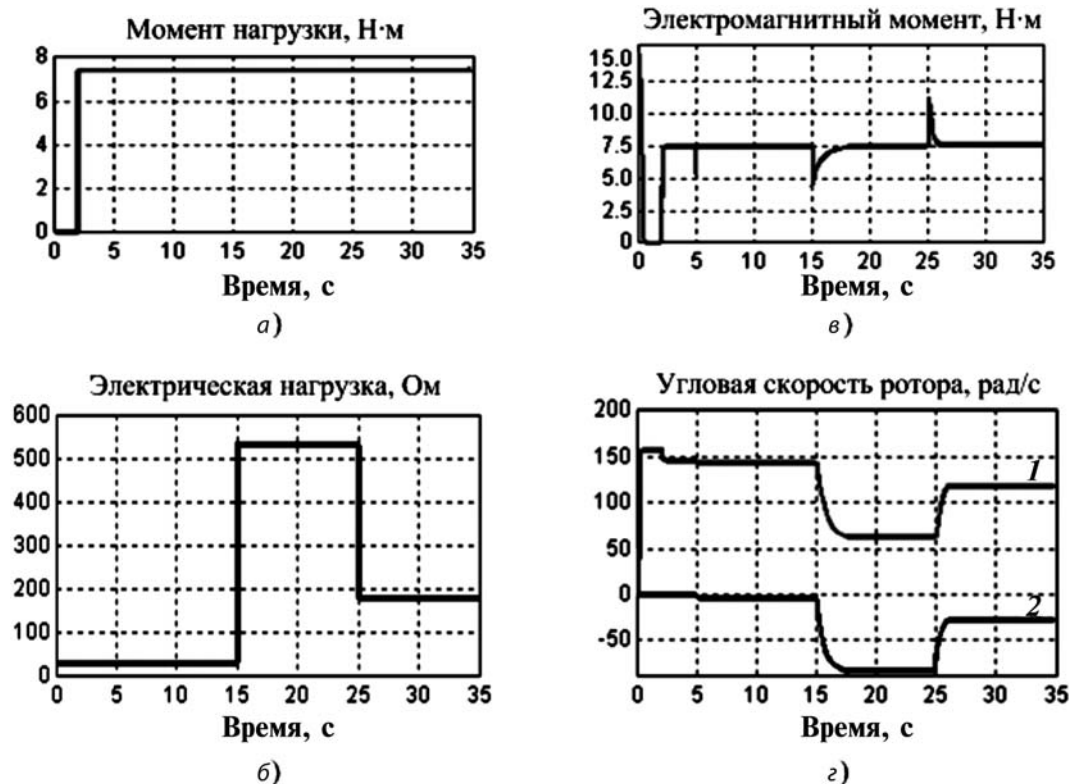


Рис. 5. Результаты имитационного моделирования работы электрической машины с дифференциальным торможением:

*a* — момент механической нагрузки электрической машины; *б* — активная электрическая нагрузка электрической машины; *в* — электромагнитный момент двигательной части электрической машины; *г* — частота вращения ротора электрической машины: 1 — внутреннего ротора электрической машины, 2 — промежуточного ротора электрической машины (с обратным знаком)

в электрической машине, суть которого заключается в балансировке электромагнитных моментов роторов до равенства их задающему моменту нагрузки ( $M_1$ ). При этом начинает вращаться промежуточный ротор ( $\omega_2$ ) и снижается угловая скорость внутреннего ротора  $\omega_1$  (рис. 5, *г*).

В момент времени  $t = 15$  с происходит резкое увеличение электрической нагрузки генераторной части электрической машины. В результате этого электромагнитный момент  $M_{32}$  генераторной части резко увеличивается, электромагнитный момент  $M_{12}$  двигательной части уменьшается (рис. 5, *в*), что приводит к увеличению угловой скорости промежуточного ротора  $\omega_2$  и к снижению угловой скорости внутреннего ротора  $\omega_1$  (рис. 5, *г*). Этот процесс будет происходить до тех пор, пока не выровняются по величине электромагнитные моменты электрической машины до задающего момента нагрузки  $M_1$ .

В момент времени  $t = 25$  с электрическая нагрузка резко падает и происходят обратные действия, что приводит к снижению угловой скорости  $\omega_2$  промежуточного ротора и увеличению угловой скорости  $\omega_1$  внутреннего ротора. При этом соблюдается равенство суммарной угловой скорости роторов синхронной угловой скорости электромагнитного поля, задаваемой двигательной частью электрической машины.

#### Алгоритм управления электрической машиной с дифференциальным торможением

В случае варьирования активной электрической нагрузкой ( $R_H$ ) электропривод работает следующим образом. В начальный момент времени происходит получение задания требуемой частоты вращения выходного вала электрической машины  $\omega_{\text{треб}}$ . Измеренное значение текущей частоты вращения выходного вала  $\omega_i$  сравнивается с заданным. Если развиваемая частота вращения  $\omega_1$  совпадает с требуемой  $\omega_{\text{треб}}$ , то текущая электрическая нагрузка генераторной части электрической машины  $R_H$  фиксируется, и электропривод переходит в режим циклического отслеживания текущей и заданной частот вращения. В случае возникновения рассогласования частот  $\omega_1 \neq \omega_{\text{треб}}$  происходит подстройка частоты вращения электрической машины  $\omega_1$  к требуемой частоте  $\omega_{\text{треб}}$ . Процесс подстройки заключается в следующем: при несоответствии частоты вращения электрической машины  $\omega_1$  требованиям технологического процесса  $\omega_{\text{треб}}$  увеличивают электрическую нагрузку генераторной части электрической машины  $R_H$  до тех пор, пока частота вращения выходного вала  $\omega_1$  не уменьшится до величины  $\omega_{\text{треб}}$ ; если необходимо увеличить частоту вращения  $\omega_1$  на выходе электрической машины до значения  $\omega_{\text{треб}}$ , то уменьшают электрическую на-

грузку генераторной части электрической машины  $R_H$ , пока частота  $\omega_1$  не будет равна заданному значению  $\omega_{\text{треб}}$ . При достижении частоты вращения заданного значения  $\omega_1 = \omega_{\text{треб}}$ , величина электрической нагрузки генераторной части электрической машины  $R_H$  фиксируется.

При изменении задания электрической машины  $\omega_{\text{треб}}$  процесс настройки и измерения повторяется заново.

### Вывод

В целях исключения механических связей в электроприводе предложено использовать асинхронную электрическую машину с дифференциальным торможением. Предложен способ управления электрической машиной, который заключается в управлении электрическими параметрами контура "генераторная часть — электрическая нагрузка". Разработанная структура электропривода позволяет осуществлять управление электрической машиной согласно предложенному принципу.

Разработана математическая модель электрической машины с дифференциальным торможением в нормальной форме Коши, описывающей изменение параметров объекта во времени. Для изучения закономерности функционирования проведено имитационное моделирование работы электрической машины при частном случае управления электрической машиной, подтверждающее способ управления электрической машиной.

По результатам имитационного моделирования разработан алгоритм функционирования электропривода при поддержании требуемой частоты вращения.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере по программе "Участник молодежного научно-инновационного конкурса" ("У.М.Н.И.К."), государственный контракт № 6538р/9098, № 7688/11198 "Разработка новых наукоемких приборов, техники и технологии в области машиностроения и электроники".*

### Список литературы

1. Современная прикладная теория управления. Часть 3: новые классы регуляторов технических систем / А. А. Колесников [и др.]. Таганрог: изд-во ТРТУ, 2000. 656 с.
2. Буканова Т. С., Савиных А. Б. Оценка энергоэффективности управления электроприводом с дифференциальным торможением // Мехатроника, автоматизация и управление. 2010. № 11 (115). С. 25—29.
3. Буканова Т. С., Савиных А. Б., Стешина Л. А. Оптимизационная концепция построения системы управления электрической машиной // Мехатроника, автоматизация и управление. 2009. № 10 (103). С. 48—50.
4. Патент 2400006 Российская Федерация, МПК7 Н 02К 16/02 Электрическая машина / Савиных А. Б., Буканова Т. С.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Марийский государственный технический университет. / № 2009104680/28; заявл. 11.02.2009; опубл. 20.09.2010, Бюл. № 26. 8 с.
5. Кравчик А. Э., Шлаф М. М., Афонин В. И., Соболенская Е. А. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник. М.: Энергоиздат, 1982. 504 с.
6. Фигаро Б. И., Павлячик Л. М. Регулируемые электроприводы переменного тока. Мн.: Техноперспектива, 2006. 363 с.

## ИНФОРМАЦИЯ



С 30 января по 2 февраля 2012 г.  
в Институте проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН состоится  
**IX Международная конференция**  
**«Идентификация систем и задачи управления»**  
**(SICPRO'12)**

**Организаторы:** Институт проблем управления имени В. А. Трапезникова РАН,  
Российский Национальный Комитет по автоматическому управлению,  
Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления Российской академией наук.

**Председатель конференции — академик РАН С. Н. Васильев**

### ТЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦИИ

- ♦ Структурная идентификация
- ♦ Параметрическая идентификация
- ♦ Непараметрическая идентификация
- ♦ Интеллектуальные методы идентификации
- ♦ Обработка сигналов
- ♦ Стохастические системы
- ♦ Адаптивные и робастные системы
- ♦ Методы оптимизации
- ♦ Приложения методов идентификации

**Контакты** Электронный адрес Оргкомитета — [pos@sicpro.org](mailto:pos@sicpro.org)  
Контактное лицо — Кирилл Романович Чернышев

**Л. И. Малинин**, д-р техн. наук, проф.,  
**В. А. Кондратьев**, канд. техн. наук, доц.,  
**В. Л. Малинин**, инженер,  
 kondr@ait.cs.nstu.ru,  
 Новосибирский государственный  
 технический университет

## Исследование моделей процесса энергопреобразования в электромагнитном механизме постоянного тока

*Проведен сравнительный анализ процессов энергопреобразования при использовании для математических моделей аппаратов полных и частных производных. Показано, что пространственно-временное описание процессов в частных производных позволяет выявить волновые режимы и адекватно описать реальные процессы.*

**Ключевые слова:** электромагнитная сила, модели процесса в координатах Лагранжа и Эйлера, баланс мощности

### Введение

Одним из направлений удовлетворения потребностей в компактном, управляемом электромеханическом оборудовании служит создание комплектных приводов поступательного движения на основе электромагнитного преобразователя постоянного тока (ЭМП), свойства которого в процессе проектирования электромагнитного механизма (ЭММ) подчиняются условиям совместимости со средствами питания и управления и рабочим органом (РО). Разработка комплектных электромагнитных приводов как мехатронных систем должна быть нацелена на достижение высоких динамических показателей с использованием математических моделей, адекватно отражающих процесс электромеханического преобразования энергии в ЭММ в соответствии с положениями математической физики. Указанные обстоятельства обуславливают актуальность исследования, результаты которого излагаются ниже.

Целью статьи является сравнительный анализ моделей процессов энергопреобразования в ЭММ постоянного тока при использовании координат Лагранжа и Эйлера.

Рассматривается одномерное движение якоря. Анализ проводится без учета потерь на трение якоря и перемагничивание стали в ЭМП. Магнитная система принята ненасыщенной. В основу оценки электромагнитных сил и описания особенностей преобразования энергии источника электропитания положен учет состояния механического оборудования ЭММ на всех стадиях электромеханического процесса (статика, начало движения, динамика).

Критерием адекватности получаемых выражений является как соотношение между силами, так и соотношение между энергиями, которые одновременно должны удовлетворять, соответственно, законам Ньютона и правилу Кельвина, утверждающему, что в электромагнитной системе с постоянным током совершаемая механическая работа равна половине энергии, отдаваемой источником питания, а вторая половина энергии идет на увеличение энергии поля. Согласно [1] это правило иногда называют "джоуль за Джоуль".

### О методах исследования процессов преобразования энергии в электромеханических системах

Анализ процессов энергопреобразования в ЭМП может быть проведен в координатах Лагранжа, т. е. в полных производных, и в координатах Эйлера, т. е. в частных производных<sup>1</sup>.

При одномерном движении якоря ЭМП по закону  $x(t)$  в координатах Лагранжа независимыми переменными являются время  $t$  и начальное положение якоря  $\varepsilon$ , соответствующее моменту времени  $t_0$ :

$$\varepsilon = x|_{t=t_0} = x(\varepsilon, t) - \int_{t_0}^t v(\varepsilon, \tau) d\tau,$$

где применительно к ЭММ  $v = v(\varepsilon, t)$  — скорость якоря и РО.

Полная производная в координатах Лагранжа  $\left. \frac{d}{dt} \frac{\partial}{\partial t} \right|_{\varepsilon = \text{const}}$  является производной вдоль траектории движения  $x(t)$ .

С использованием понятия механической мощности  $p_{\text{мех}}$  дифференциал механической энергии  $W_{\text{мех}}$

$$dW_{\text{мех}} = p_{\text{мех}} dt = f_{\text{мех}} v dt$$

при отсутствии механических потерь равен дифференциалу электромагнитной энергии механизма  $dW_{\text{эм}}$  за вычетом дифференциала обменной энергии  $dW_{\text{обм}}$ :

$$dW_{\text{мех}} = dW_{\text{эм}} - dW_{\text{обм}} = dW'_{\text{эм}}.$$

При этом отсутствует корректное, объективное определение  $dW_{\text{обм}}$ , а следовательно, и обменной мощности  $p_{\text{обм}}$ , субъективное же их определение зависит от интерпретации исследователя.

Баланс, составленный из обменной  $p_{\text{обм}}$  и механической  $p_{\text{мех}}$  мощностей, мощности источника

<sup>1</sup> Для изучения пространственно-временных процессов в координатах Лагранжа и Эйлера рекомендуем ознакомиться с монографией [4].

питания  $p_{и.п.}$ , тепловых потерь  $p_{т.п.}$  и электромагнитной мощности  $p_{эм}$

$$p_{и.п.} - p_{т.п.} = p_{эм} = p_{обм} + p_{мех},$$

может быть использован для установления различных форм определения энергий и мощностей в ЭММ, выраженных через электромагнитные величины (напряжения, токи, потокосцепления) при описании процесса вдоль траектории движения  $x(t)$ .

Механическая сила, действующая на якорь при движении и в соответствии с третьим законом Ньютона вызывающая упругие деформации в ЭММ, может быть представлена в виде

$$f_{мех} = \frac{p_{мех}}{v + v_y},$$

где  $v$  — скорость якоря;  $v_y$  — скорость упругой деформации.

Существуют особые точки, в которых определение механической силы указанным образом невозможно. В частности, такой точкой является момент трогания якоря ( $v \rightarrow 0, a = dv/dt \neq 0$ ), второй точкой является точка статического режима ( $v \rightarrow 0, a \rightarrow 0$ ).

Анализ соотношения между силами в движении и в момент трогания якоря может способствовать рассмотрению производной от  $p_{мех}$  по  $v$  с переходом к пределу соотношения скоростей  $v_y$  и  $v$  при стремлении последней к нулю:

$$\lim_{\substack{v \rightarrow 0 \\ dv \neq 0}} \frac{dp_{мех}}{dv} = v_y \left. \frac{df_{мех}}{dv} \right|_{v \rightarrow 0} + f_{мех} \left( 1 + \lim_{v \rightarrow 0} \frac{dv_y}{dv} \right).$$

Сила трогания при отсутствии податливости в креплении корпуса ЭМП и его якоря к РО ( $v_y = 0$ ) определяется в момент появления ускорения ( $v \rightarrow 0, dv \neq 0$ ) в виде

$$f_{тр} = \lim_{\substack{v \rightarrow 0 \\ dv \neq 0}} \frac{dp_{мех}}{dv}.$$

Статическая сила определяется при бесконечно малой скорости перемещения и бесконечно малом ускорении. Эта сила вызывает постоянные по величине упругие деформации в элементах крепления ЭММ.

При высокой жесткости элементов крепления  $\lim_{\substack{v \rightarrow 0 \\ dv \rightarrow 0}} \frac{dv_y}{dv} = 1$ , что обуславливает значение статической силы

$$f_{ст} = \frac{1}{2} \lim_{\substack{v \rightarrow 0 \\ dv \rightarrow 0}} \frac{dp_{мех}}{dv}.$$

Можно заключить, что для определения статических сил учет упругих деформаций в ЭММ имеет принципиальное значение. Это заключение соответствует одному из определений силы в физике (появление деформаций твердых тел в статике).

В соответствии со вторым законом Ньютона разность  $f_{тр}$  и  $f_{ст}$  определяет динамическую силу в момент трогания и появление ускорения

$$f_d = f_{тр} - f_{ст} = m_{п.ч} a,$$

где  $m_{п.ч}$  — масса подвижных частей ЭММ.

Представленные выражения для оценки сил позволяют проверить выполнение законов Ньютона при анализе процессов энергопреобразования в ЭММ.

В координатах Эйлера независимыми переменными являются время  $t$  и перемещение якоря  $x$ .

Дифференциал электромагнитной энергии ЭМП в координатах Эйлера при движении

$$dW_{эм} = \frac{\partial W_{эм}}{\partial t} dt + \frac{\partial W_{эм}}{\partial x} dx = dW_{обм} + dW_{мех}$$

позволяет разделить мощности:

$$p_{эм} = \frac{\partial W_{эм}}{\partial t} + v \frac{\partial W_{эм}}{\partial x} = p_{обм} + p_{мех},$$

корректно определить понятия обменной и механической мощностей, а также электромагнитной силы:

$$p_{обм} = \frac{\partial W_{эм}}{\partial t}; p_{мех} = v \frac{\partial W_{эм}}{\partial x}; f_{эм} = \frac{\partial W_{эм}}{\partial x}.$$

Эта система координат в явном виде позволяет учесть электрический и механический входы ЭМП и, как показано ниже, позволяет получить адекватное описание динамики электромеханического преобразования энергии в ЭММ.

### Модель электромеханического преобразования энергии в координатах Лагранжа

В технической литературе традиционно электромагнитные силы определяют безотносительно состояния якоря (статика либо динамика). Такой подход сформировался исходя из рассмотрения энергобаланса в полных производных, который составлен в [2] на основе физических представлений о наличии в электромеханическом процессе известных форм энергий:

$$dW_{и.п.} - dW_{т.п.} = dW_{эм} = dW_{м} + dW_{мех}, \quad (1)$$

где  $dW_{эм} = i(t)d\psi(t)$  — приращение электромагнитной энергии за время  $dt$ ;  $dW_{м} = d[i(t)\psi(t)/2]$  — приращение магнитной энергии за время  $dt$ .

При постоянном токе  $I$  из баланса (1) следует соотношение

$$I^2 dL = \frac{I^2}{2} dL + dW_{\text{мех}}, \quad (2)$$

где  $L(t) = \frac{\Psi(t)}{i(t)} = L[x(t)]$  и, соответственно,  $\frac{dL(t)}{dt} = \frac{dL[x(t)]}{dx} \frac{dx}{dt} = \frac{dL(x)}{dx} \frac{dx}{dt}$ .

Выражение (2) удовлетворяет представленному выше правилу Кельвина и из него следует значение статической электромагнитной силы

$$f_{\text{эм. ст}} = \frac{I^2}{2} \frac{dL}{dx} \Big|_{x=x_0}.$$

Здесь и далее  $x_0 = x|_{t_0} = \varepsilon$ .

При пренебрежении механическими потерями в ЭММ электромагнитные силы равны силам, приложенным к якорю со стороны РО. Поэтому с учетом выражений, представленных во введении, основанных на втором и третьем законах Ньютона, можно записать:

- статическая электромагнитная сила

$$f_{\text{эм. ст}} = f_{\text{ст}} = \frac{1}{2} \lim_{\substack{v \rightarrow 0 \\ dv \rightarrow 0}} \frac{dp_{\text{мех}}}{dv} = \frac{I^2}{4} \frac{dL}{dx} \Big|_{x=x_0};$$

- электромагнитная сила трогания

$$f_{\text{эм. тр}} = f_{\text{тр}} = \lim_{\substack{v \rightarrow 0 \\ dv \neq 0}} \frac{dp_{\text{мех}}}{dv} = \frac{I^2}{2} \frac{dL}{dx} \Big|_{x=x_0};$$

- начальная динамическая сила

$$f_{\text{д}} = f_{\text{эм. тр}} - f_{\text{эм. ст}} = \frac{I^2}{4} \frac{dL}{dx} \Big|_{x=x_0}.$$

Следовательно, приходится признать или неправомочность (2), а следовательно, и баланса (1), или неправомочность законов Ньютона, что абсурдно. Ошибочность полученного результата объясняется тем, что баланс (1) составлен в [2] без учета взаимосвязей между известными формами энергии, электромагнитная энергия отождествлена с магнитной, процесс энергопреобразования рассматривается как преобразование энергии магнитного поля, которое в соответствии с законами электродинамики [1] не совершает механической работы.

Корректный энергобаланс должен базироваться на законах Кирхгофа и принципе д'Аламбера, учи-

тывающего помимо внешних сил, действующих на массу подвижных частей ЭММ, и силы инерции.

Если закон электромагнитной индукции записан для относительного движения (т. е. в координатах Лагранжа) в виде полной производной

$$e = -\frac{d\Psi(t)}{dt},$$

то в соответствии со вторым законом Кирхгофа при источнике питания с напряжением  $u(t)$  и сопротивлением обмотки  $R$

$$u(t) - i(t)R = \frac{d\Psi(t)}{dt} = L(t) \frac{di(t)}{dt} + i(t) \frac{dL(t)}{dt}$$

путем умножения на ток  $i(t)$  устанавливается баланс мощности в виде

$$u(t)i(t) - i^2(t)R = \frac{1}{2} L(t) \frac{di^2(t)}{dt} + i^2(t) \frac{dL(x)}{dx} \frac{dx}{dt}, \quad (3)$$

т. е.  $p_{\text{эм}} = i(t) \frac{d\Psi(t)}{dt} = p_{\text{обм}} + p_{\text{мех}}$ .

Обменная мощность

$$p_{\text{обм}} = L(t)i(t) \frac{di(t)}{dt} = \frac{1}{2} L(t) \frac{di^2(t)}{dt}$$

интерпретируется как мощность процесса самоиндукции, а механическая мощность определяется выражением

$$p_{\text{мех}} = i^2(t) \frac{dL(x)}{dx} v.$$

При статической нагрузке, постоянном токе  $I$  обмотки и положении якоря в точке  $x = x_0$ :

- статическая электромагнитная сила

$$f_{\text{эм. ст}} = \frac{1}{2} \frac{dp_{\text{мех}}}{dv} \Big|_{\substack{v \rightarrow 0 \\ dv \rightarrow 0}} = \frac{I^2}{2} \frac{dL(x)}{dx} \Big|_{x=x_0};$$

- электромагнитная сила трогания

$$f_{\text{эм. тр}} = \frac{dp_{\text{мех}}}{dv} \Big|_{\substack{v \rightarrow 0 \\ dv \neq 0}} = I^2 \frac{dL(x)}{dx} \Big|_{x=x_0};$$

- начальная динамическая сила

$$f_{\text{д}} = \frac{I^2}{2} \frac{dL(x)}{dx} \Big|_{x=x_0}.$$

Здесь не выполняется правило Кельвина, так как из баланса (3) следует  $p_{\text{эм}} = I^2 \frac{dL(t)}{dt} = p_{\text{мех}}$ .

Причиной несостоятельности баланса (3) является рассмотрение процесса в относительном, а не в абсолютном движении. Инвариантными по отношению к системам координат являются токи, напряжения и их полные дифференциалы. Дифференциал механической энергии является частным дифференциалом электромагнитной энергии и для практических целей должен определяться при абсолютном движении.

### Модель электромеханического преобразования энергии в координатах Эйлера

Если закон электромагнитной индукции записан для абсолютного одномерного движения в координатах Эйлера

$$e = -\frac{\partial \psi(x, t)}{\partial t} - \frac{\partial \psi(x, t)}{\partial x} v,$$

то в соответствии со вторым законом Кирхгофа в пространственно-временной форме записи

$$u(x, t) - i(x, t)R = \frac{\partial [L(x)i(x, t)]}{\partial t} + v \frac{\partial [L(x)i(x, t)]}{\partial x},$$

а баланс мощности устанавливается в виде:

$$\begin{aligned} & \overbrace{u(x, t)i(x, t) - i^2(x, t)R}^{p_{\text{эм}}(x, t)} = \\ & \overbrace{\frac{1}{2} L(x) \frac{\partial i^2(x, t)}{\partial t} + \frac{1}{2} L(x) \frac{\partial i^2(x, t)}{\partial x} v}^{p_{\text{обм}}(x, t)} + \overbrace{i^2(x, t) \frac{\partial L(x)}{\partial x} v}^{p_{\text{мех}}(x, t)}. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь в явной форме проявляется взаимосвязь процесса самоиндукции, характеризующего инерционные свойства электромагнитного поля, и процесса механического движения, который существует во всех электромеханических устройствах. Мощность процесса самоиндукции  $p_c(x, t)$  содержит временной и пространственный компоненты. Первый из них носит характер обменной мощности  $p_{\text{обм}}$  между источником питания и механической частью ЭММ, т. е. возбуждает электромагнитное поле устройства. Второй компонент, оказывая силовое воздействие, участвует в образовании механической мощности.

При постоянном токе  $I$  мощность процесса самоиндукции  $p_c = 0$  и баланс (4) представляется в виде совокупности двух балансов:

$$\begin{cases} p_{\text{эм}}(x, t) = p_{\text{мех.1}}(x, t) = I^2(x, t) \frac{\partial L(x)}{\partial x} v; \\ p_c(x, t) = p_{\text{обм}}(x, t) + p_{\text{мех.2}}(x, t) = \\ = \frac{1}{2} L(x) \frac{\partial I^2(x, t)}{\partial t} + \frac{1}{2} L(x) \frac{\partial I^2(x, t)}{\partial x} v = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Первый из них показывает, что электромагнитная мощность, равная электрической мощности источника питания за вычетом мощности тепловых потерь, преобразуется в первую составляющую механической мощности, т. е. эта часть механической мощности развивается за счет мощности источника питания. Данному балансу соответствует первая составляющая электромагнитной силы при движении:

$$f_{\text{эм}}^{(1)} = I^2(x, t) \frac{\partial L(x)}{\partial x} = I^2 \frac{\partial L(x)}{\partial x}. \quad (6)$$

Второй баланс показывает, что мощность процесса самоиндукции отсутствует при постоянном токе в результате взаимной компенсации обменной мощности и второй пространственной составляющей, обуславливающей вторую часть механической мощности. Равенство нулю мощности процесса самоиндукции не свидетельствует об отсутствии самого процесса ввиду его пространственно-временного характера. Данному балансу соответствует вторая составляющая электромагнитной силы при движении:

$$f_{\text{эм}}^{(2)} = \frac{1}{2} L(x) \frac{\partial I^2(x, t)}{\partial x}. \quad (7)$$

На основании (6) и (7) результирующая электромагнитная сила при движении равна

$$f_{\text{эм}} = f_{\text{эм}}^{(1)} + f_{\text{эм}}^{(2)} = I^2 \frac{\partial L(x)}{\partial x} + \frac{1}{2} L(x) \frac{\partial I^2(x, t)}{\partial x}, \quad (8)$$

что требует определения частной производной функции  $I^2(x, t)$  по  $x$ .

Второму из балансов (5) соответствует дифференциальное уравнение первого порядка в частных производных:

$$\frac{\partial I^2(x, t)}{\partial t} + v \frac{\partial I^2(x, t)}{\partial x} = 0, \quad (9)$$

которое в координатах Лагранжа эквивалентно уравнению

$$\frac{\partial I^2(t, \varepsilon)}{\partial t} = 0. \quad (10)$$

Начальное условие  $I^2|_{t=t_0}$  в уравнениях (9) и (10) определяется процессом при  $t < t_0$  и  $x < \varepsilon$ , т. е. в области

$$\int_{-\infty}^{t_0} v dt - x < 0.$$

Решение уравнения (9) при указанном начальном условии представляет собой прямую бегущую волну, начальный профиль которой движется без изменения формы:

$$i_{\text{пр}}^2 \left( \int_{t_0}^t v dt - x \right) = I^2|_{t=t_0} = I^2.$$

Данная прямоугольная волна может быть записана с помощью единичной функции  $1(t)$  [4]:

$$i_{\text{пр}}^2 \left( \int_{t_0}^t v dt - x \right) = I^2 \cdot 1 \left( \int_{t_0}^t v dt - x \right),$$

что позволяет определить производные в виде

$$\frac{\partial I^2(x, t)}{\partial x} = -I^2 \delta \left( \int_{t_0}^t v dt - x \right);$$

$$\frac{\partial I^2(x, t)}{\partial t} = I^2 v \delta \left( \int_{t_0}^t v dt - x \right),$$

где  $\delta$  — дельта-функция.

В любой точке траектории движения  $x(t)$  несмотря на дельтообразные особенности производных уравнение (10), разумеется, удовлетворяется.

В соответствии с (7) вторая составляющая электромагнитной силы при движении равна

$$f_{\text{эм}}^{(2)} = -\frac{I^2 L(x)}{2} \delta \left( \int_{t_0}^t v dt - x \right) = -\frac{I^2}{2} \frac{\partial L(x)}{\partial x},$$

где производная  $\frac{\partial L(x)}{\partial x}$  определяется на линии разрыва решения уравнения (9) [4].

Линия разрыва решения имеет уравнение

$$\int_{t_0}^t v dt - x = 0,$$

т. е. соответствует реальной траектории движения.

Переход от импульсного характера силы  $f_{\text{эм}}^{(2)}$  к ее выражению в виде гладкой функции объясняется фильтрующим действием дельта-функции.

Импульс силы

$$f_{\text{эм}}^{(2)} dt = -\frac{I^2 L(x)}{2v} \delta \left( \int_{t_0}^t v dt - x \right) dx$$

обуславливает импульс подвижных частей ЭММ за время  $t$  (к сожалению, общепринятое обозначение импульса твердого тела  $p$  совпадает с общепринятым обозначением мгновенной мощности)

$$p = \int_{t_0}^t f_{\text{эм}}^{(2)} dt = -\int_{x_0}^x \frac{I^2}{2} \frac{L(x)}{v} \delta \left( \int_{t_0}^t v dt - x \right) dx = -\frac{I^2 L(x)}{2v},$$

так как  $x$  принадлежит интервалу интегрирования.

Это приводит к выражению силы  $f_{\text{эм}}^{(2)}$  в виде гладкой функции

$$f_{\text{эм}}^{(2)} = \frac{dp}{dt} = v \frac{dp}{dx} = -\frac{I^2}{2} \frac{\partial L(x)}{\partial x}.$$

Таким образом, результирующая электромагнитная сила при движении в соответствии с (8) определяется в виде

$$f_{\text{эм}} = I^2 \frac{\partial L(x)}{\partial x} - \frac{I^2}{2} \frac{\partial L(x)}{\partial x} = \frac{I^2}{2} \frac{\partial L(x)}{\partial x}.$$

С физической точки зрения наличие электромагнитной силы  $f_{\text{эм}}^{(2)}$  обусловлено электромагнитной инерцией поля, возмущенного движением якоря.

Механическая мощность при движении

$$p_{\text{мех}} = \frac{I^2}{2} \frac{\partial L(x)}{\partial x} v$$

равна обменной мощности

$$\begin{aligned} p_{\text{обм}} &= \frac{L(x)}{2} \frac{\partial I^2(x, t)}{\partial t} = \\ &= \frac{I^2 L(x)}{2} v \delta \left( \int_{t_0}^t v dt - x \right) = \frac{I^2}{2} v \frac{\partial L(x)}{\partial x}, \end{aligned}$$

т. е. закон Кельвина выполняется.

При бесконечно малой скорости движения и бесконечно малом ускорении ( $v \rightarrow 0$ ,  $dv \rightarrow 0$ ), соблюдении условия постоянства тока волновой процесс и явление самоиндукции сохраняются и, следовательно,

$$\left. \frac{dp_{\text{мех}}}{dv} \right|_{v \rightarrow 0} = I^2 \left. \frac{dL(x)}{dx} \right|_{x=x_0}.$$



При статической нагрузке, постоянном токе обмотки  $I$  и положении якоря в точке  $x = x_0$ :

- статическая электромагнитная сила

$$f_{\text{эм. ст}} = \frac{1}{2} \frac{dp_{\text{мех}}}{dv} \bigg|_{\substack{v \rightarrow 0 \\ dv \rightarrow 0}} = \frac{I^2}{4} \frac{dL(x)}{dx} \bigg|_{x=x_0};$$

- электромагнитная сила трогания

$$f_{\text{эм. тр}} = \frac{dp_{\text{мех}}}{dv} \bigg|_{\substack{v \rightarrow 0 \\ dv \neq 0}} = \frac{I^2}{2} \frac{dL(x)}{dx} \bigg|_{x=x_0};$$

- начальная динамическая сила

$$f_{\text{д}} = \frac{I^2}{4} \frac{dL(x)}{dx} \bigg|_{x=x_0}.$$

Следует обратить внимание, что процесс электро-механического преобразования энергии рассмотрен, начиная с момента трогания при конечном ускорении. Исключен интервал времени, соответствующий бесконечно малой скорости и бесконечно малому ускорению, на котором определяется статическая электромагнитная сила, равная силе статической нагрузки  $f_{\text{ст. нагр}}$ , поэтому

$$f_{\text{эм. ст}} = f_{\text{ст. нагр}} = \frac{i_1^2}{2} \frac{dL(x)}{dx} \bigg|_{x=x_0},$$

т. е.

$$i_1 = \sqrt{\frac{2f_{\text{ст. нагр}}}{\frac{dL(x)}{dx} \bigg|_{x=x_0}}}.$$

В соответствии со значением силы  $f_{\text{эм. ст}}$ , определенной при токе  $I$ ,

$$f_{\text{эм. ст}} = \frac{I^2}{4} \frac{dL(x)}{dx} \bigg|_{x=x_0},$$

$$i_1 = \frac{I}{\sqrt{2}}.$$

Здесь  $I$  — стабилизированный ток, равный току трогания при конечном ускорении.

## Заключение

1. Разработанные математические модели и полученные результаты их анализа свидетельствуют о том, что только при пространственно-временном описании процесса электро-механического преобразования энергии в ЭММ одновременно выполняются соотношение между силами и соотношение между энергиями в соответствии с законами Ньютона и правилом Кельвина. Полученный результат полностью согласуется с математической стороной рассматриваемых процессов: только при пространственно-временном описании электрических процессов (т. е. в координатах Эйлера) уравнения, описывающие свойства ЭММ, оказываются представленными в одной системе координат (уравнения механического равновесия, как правило, составляются в координатах Эйлера с использованием понятия абсолютной скорости). В связи с этим становится вполне объяснимой причина расхождения результатов анализа при описании электрических процессов в координатах Лагранжа и Эйлера.

2. Модель процесса электро-механического преобразования энергии при использовании аппарата полных производных приводит к результатам, которые одновременно не согласуются с силовыми и энергетическими соотношениями законов Ньютона и правилом Кельвина "джоуль за джоуль".

3. Причиной соотношений, присущих правилу Кельвина "джоуль за джоуль", для электромагнитных устройств с постоянным током является образование волнового процесса изменения тока.

4. При пространственно-временном описании электро-механического процесса электромагнитные силы, определенные на разных стадиях работы, позволяют уточнить математические модели динамики ЭММ и тем самым решать актуальные на сегодняшний день задачи энергосбережения и повышения точности мехатронных систем.

## Список литературы

1. Поливанов К. М. Теория электромагнитного поля. М.: Энергия, 1975. 208 с.
2. Уайт Д. С., Вудсон Г. Х. Электро-механическое преобразование энергии. М.; Л.: Энергия, 1964. 528 с.
3. Каплянский А. Е., Лысенко А. П., Полотовский Л. С. Теоретические основы электротехники. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961. 527 с.
4. Зельдович Я. Б., Мышкис А. Д. Элементы математической физики. М.: Наука, 1973. 352 с.

**С. М. Афонин**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., доц.,  
eduems@mail.ru,

Московский государственный институт  
электронной техники (ТУ)

## Исследование электрохимического преобразования энергии пьезоактюаторами нано- и микроперемещений

*Исследованы электрохимические деформация и преобразование энергии пьезоактюаторами нано- и микроперемещений при продольном и поперечном пьезоэффектах, получены аналитические выражения для коэффициентов преобразования и полезного действия многослойных пьезоактюаторов при продольном и поперечном пьезоэффектах и для максимальных значений этих коэффициентов.*

**Ключевые слова:** пьезоактюатор, нано- и микроперемещения, преобразование энергий, электрохимическая деформация, коэффициенты преобразования и полезного действия

**Введение.** При использовании пьезоактюаторов в точных электрохимических системах в нанотехнологиях, нанобиологии, астрономии и микроэлектронике необходимо учитывать особенности электрохимического преобразования энергии пьезоактюатором при продольном и поперечном пьезоэффектах и соответствующие значения коэффициентов полезного действия. Пьезоактюатор (пьезопреобразователь, пьезодвигатель нано- и микроперемещений) работает на основе обратного пьезоэффекта, в котором эффект перемещения достигается за счет его деформации при приложении внешнего электрического напряжения. Пьезоактюатор нано- и микроперемещений из пьезоэлектрической керамики на основе цирконата и титаната свинца марок ЦТС или PZT, например, ЦТС-19, ЦТС-21, ЦТС-23, ЦТС-26, ЦТБС-3, ПКР-7, ПКР-7М или PZT-4, PZT-5Н обеспечивает диапазон перемещения от единиц нанометров до единиц микрометров с точностью до десятых долей нанометров в статических и квазистатических режимах эксплуатации [1—8]. Увеличение диапазона перемещения пьезоактюатора до десятков микрометров достигается за счет применения многослойного пьезоактюатора.

**Коэффициенты преобразования и полезного действия пьезоактюатора.** Найдем коэффициенты преобразования и полезного действия пьезоактюатора из закона сохранения энергии [2—6]: подводимая энергия или энергия на входе пьезоактюатора равна энергии на выходе пьезоактюатора плюс запасенная энергия и энергетические потери.

Исходные параметры для расчетов коэффициентов преобразования и полезного действия соответ-

ствуют статическим и низкочастотным квазистатическим условиям эксплуатации пьезоактюаторов с полосой пропускания до 100 Гц, которые широко используются для точной юстировки, нано- и микроперемещений в нанотехнологиях и адаптивной оптике. При производстве пьезоактюаторов контролируются и ограничиваются статические параметры — пьезомодуль, гистерезис, упругие податливости, модуль Юнга и динамический параметр — тангенс угла диэлектрических потерь. Эти параметры применяются для расчета электрохимических характеристик и коэффициентов преобразования, полезного действия пьезопреобразователей микроперемещений, работающих в статических и низкочастотных режимах [2—7], в отличие от нахождения потерь в резонансных режимах на высоких частотах при распространении волн в пьезорезонаторах и пьезопередатчиках с использованием комплексных коэффициентов — пьезомодуля, упругой податливости, диэлектрической проницаемости [8—12].

Деформация пьезодвигателя из пьезокерамики зависит от марки сегнетокерамики, поляризации и формы пьезопреобразователя. Для линейных нано- и микроперемещений используются простые или составные пьезоактюаторы прямоугольного или кольцевого типа с продольной и поперечной деформацией [4, 7]. Пьезодвигатели с возбуждением сдвиговых и крутильных деформаций практически не используются для линейных микроперемещений. Следовательно, актуальным является исследование преобразования энергии и коэффициента полезного действия (КПД) пьезодвигателей нано- и микроперемещений при продольном и поперечном пьезоэффектах.

При рассмотрении КПД при перемещении нагрузки по одной из осей, например оси 3 или 1, учет потерь энергии по взаимно перпендикулярным осям 3, 2, 1 позволяет получить нижнюю (минимальную) оценку КПД по сравнению с верхней (максимальной) оценкой КПД при одномерной теории [2, 3, 9] с учетом потерь только по одной оси.

Рассмотрим особенности преобразования энергии составными пьезодвигателями микроперемещений при продольном пьезоэффекте (рис. 1) и при поперечном пьезоэффекте (рис. 2). Для пьезодвигателя входная энергия — электрическая, энергия на выходе — механическая, запасенная энергия — как электрическая, так и механическая, энергия потерь — тепловая, возникающая за счет диэлектрических и гистерезисных потерь.

Для учета эффективности преобразования пьезодвигателем подводимой электрической энергии в механическую энергию на выходе электрохимической системы, выбора необходимого источника питания и обеспечения требуемых механических

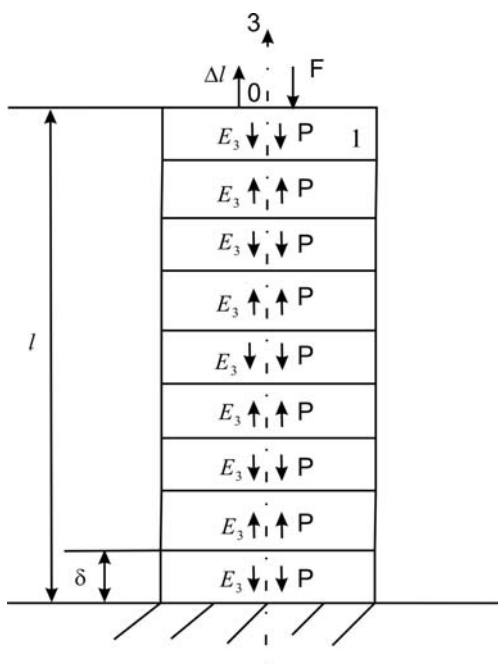


Рис. 1. Структурная схема пьезоактюатора наноперемещений при продольном пьезоэффекте

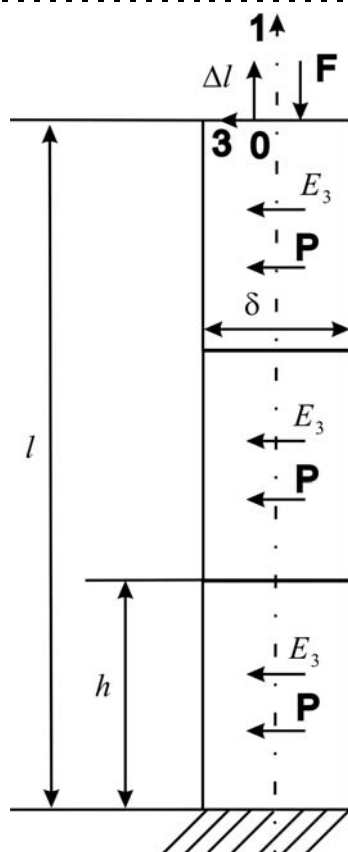


Рис. 2. Структурная схема пьезоактюатора наноперемещений при поперечном пьезоэффекте

характеристик пьезодвигателя введем коэффициент преобразования пьезодвигателя

$$\chi = W_m / (W_m + W_s + W_l), \quad (1)$$

где  $W_m$  — механическая работа;  $W_s = W_c + W_e$  — запасенная энергия;  $W_c$  — энергия, накопленная в составном пьезодвигателе как конденсаторе;  $W_e$  — механическая энергия упругой деформации;  $W_l = W_d + W_g$  — энергия потерь;  $W_d$  — энергия диэлектрических потерь;  $W_g$  — энергия потерь на гистерезис.

Расчет потерь и тепловыделения [6] пьезодвигателя осуществляется с использованием КПД пьезодвигателя

$$\eta = W_m / (W_m + W_l). \quad (2)$$

**Электромеханическое преобразование энергии многослойными пьезодвигателями нано- и микроперемещений.** Для рассмотрения электромеханической деформации и преобразования энергии пьезодвигателями при продольном и поперечном эффектах рассмотрим матричные уравнения состояния [8, 12], связывающие электрические и упругие переменные для поляризованной пьезокерамики в общем виде:

$$\begin{aligned} \mathbf{D} &= \mathbf{d}\mathbf{T} + \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{E}; \\ \mathbf{S} &= \mathbf{s}^E \mathbf{T} + \mathbf{d}^T \mathbf{E}. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь первое уравнение описывает прямой пьезоэффект, а второе — обратный;  $\mathbf{S}$  — матрица-столбец относительных деформаций;  $\mathbf{T}$  — матрица-столбец механических напряжений;  $\mathbf{E}$  — матрица-столбец напряженности электрического поля по координатным осям;  $\mathbf{D}$  — матрица-столбец электрической индукции по координатным осям;  $\mathbf{s}^E$  — матрица упругой податливости при  $\mathbf{E} = \text{const}$ ;  $\boldsymbol{\varepsilon}^T$  — матрица диэлектрических проницаемостей при  $\mathbf{T} = \text{const}$ .

Поляризованная керамика представляет собой пьезоэлектрическую текстуру с симметрией  $\infty, m$ , поэтому в матрице упругой податливости для поляризованной пьезокерамики пять независимых компонент:  $s_{11}^E, s_{12}^E, s_{13}^E, s_{33}^E, s_{55}^E$ :

$$\mathbf{s}^E = \begin{bmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ s_{12}^E & s_{11}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ s_{13}^E & s_{13}^E & s_{33}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{55}^E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{55}^E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(s_{11}^E - s_{12}^E) \end{bmatrix}.$$

Транспонированная матрица пьезоэлектрических модулей  $\mathbf{d}^T$  в данном случае имеет вид

$$\mathbf{d}^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{15} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Матрица диэлектрических проницаемостей  $\epsilon^T$  при  $\mathbf{T} = \text{const}$  записывается в виде

$$\epsilon^T = \begin{bmatrix} \epsilon_{11}^T & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{22}^T & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33}^T \end{bmatrix}.$$

Направление оси поляризации  $P$ , т. е. направление, по которому проведена поляризация, обычно принимают за направление оси 3.

Обобщенное уравнение пьезоэффекта [8] при управлении по напряжению с учетом компонент механических напряжений пьезодвигателя по соответствующим осям и свойств симметрии поляризованной сегнетокерамики типа ЦТС или PZT записывается в виде

$$S_j = d_{ij}E_i + s_{jk}^E T_k, \quad (4)$$

где  $j = 1, 2, \dots, 6$ ,  $k = 1, 2, \dots, 6$ ,  $i = 1, 2, 3$ ;  $S_j = S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6$  — относительные деформации пьезодвигателя;  $d_{ij} = d_{15}, d_{31}, d_{33}$  — пьезомодули;  $E_i = E_1, E_2, E_3$  — напряженности электрического поля в пьезодвигателе;  $s_{jk}^E = s_{11}^E, s_{12}^E, s_{13}^E, s_{33}^E, s_{55}^E$  — упругие податливости;  $T_k = T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6$  — механические напряжения; соответственно, с учетом симметрии электромеханических характеристик сегнетокерамики имеем  $d_{31} = d_{32}$  и  $s_{55}^E = s_{44}^E$ .

Рассмотрим работу пьезодвигателя нано- и микроперемещений при продольном и поперечном пьезоэффектах. Уравнения электроупругости [8] для пьезодвигателя записываются в следующем виде:

- при продольном пьезоэффекте

$$S_3 = d_{33}E_3 + s_{33}^E T_3;$$

- при поперечном пьезоэффекте

$$S_1 = d_{31}E_3 + s_{11}^E T_1,$$

где  $S_3$  — относительная деформация пьезодвигателя по оси 3;  $S_1$  — относительная деформация пьезодвигателя по оси 1;  $d_{33}$  — пьезомодуль при продольном пьезоэффекте;  $d_{31} = d_{32}$  — пьезомодули при поперечном пьезоэффекте;  $E_3$  — напряженность электрического поля по оси 3;  $s_{33}^E$  — упругая податливость по оси 3 при напряженности электрического поля  $E = \text{const}$ ;  $s_{11}^E$  — упругая податливость по оси 1 при напряженности электрического поля  $E = \text{const}$ ;  $T_3$  — механическое напряжение по оси 3;  $T_1$  — механическое напряжение по оси 1.

Соответственно, при приложении напряжения  $U = E_3\delta$ , где  $E_3$  — напряженность электрического поля по оси 3,  $\delta$  — толщина пьезопластины, к электродам пьезодвигателя получаем выражения для абсолютной деформации пьезодвигателя (рис. 1, 2) для статического режима работы в следующем виде:

- при продольном пьезоэффекте

$$\Delta l = d_{33}nU(1 - F/F_{3\max}) = d_{33}nU(1 - f), \quad (5)$$

- при поперечном пьезоэффекте

$$\begin{aligned} \Delta l &= d_{31}n(h/\delta)U(1 - F/F_{1\max}) = \\ &= d_{31}n(h/\delta)U(1 - f), \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\Delta l$  — абсолютное перемещение пьезодвигателя;  $F$  — сила;  $F_{3\max} = d_{33}US_0/(\delta s_{33}^E)$  — максимальная сила, развиваемая зажатым пьезодвигателем при продольном пьезоэффекте по оси 3;  $F_{1\max} = d_{31}US_0/(\delta s_{11}^E)$  — максимальная сила, развиваемая зажатым пьезодвигателем при поперечном пьезоэффекте по оси 1;  $n$  — число пьезопластин;  $S_0$  — площадь поперечного сечения, перпендикулярного оси действия силы  $F$ ;  $l = n\delta$ ,  $S_0 = bh$  — длина и площадь поперечного сечения составного пьезодвигателя при продольном пьезоэффекте и перемещении нагрузки по оси 3;  $l = nh$ ,  $S_0 = b\delta$  — длина и площадь поперечного сечения составного пьезодвигателя при поперечном пьезоэффекте и перемещении нагрузки по оси 1;  $\delta, h, b$  — толщина, высота и ширина пьезопластины;  $f = F/F_{\max}$  — коэффициент силы,  $F_{\max} = F_{1\max}$  — при поперечном пьезоэффекте,  $F_{\max} = F_{3\max}$  — при продольном пьезоэффекте.

При приложении напряжения  $U$  к электродам пьезодвигателя при продольном пьезоэффекте (рис. 1) и при поперечном пьезоэффекте (рис. 2) пьезопреобразователь деформируется [2–5], совершая при этом следующую полезную механиче-

скую работу  $W_m$  по перемещению внешней статической нагрузки:

- при продольном пьезоэффекте

$$W_m = F\Delta l/2 = d_{33}nU(1 - F/F_{3\max})F/2 = d_{33}nU(1 - f)F/2; \quad (7)$$

- при поперечном пьезоэффекте

$$W_m = F\Delta l/2 = d_{31}n(h/\delta)U(1 - F/F_{1\max})F/2 = d_{31}n(h/\delta)U(1 - f)F/2. \quad (8)$$

Выражения (7), (8) для механической работы пьезодвигателя в статике преобразуем к следующему виду:

- при продольном пьезоэффекте

$$W_m = d_{33}nU(1 - F/F_{3\max})fF_{3\max}/2 = f(1 - f)[d_{33}^2/(s_{33}^E \varepsilon_{33}^T)](n\varepsilon_{33}^T S_c/(2\delta))U^2,$$

откуда получаем

$$W_m = f(1 - f)k_{33}^2 C_n U^2/2; \quad (9)$$

- при поперечном пьезоэффекте

$$W_m = d_{31}n(h/\delta)U(1 - F/F_{1\max})fF_{1\max}/2 = f(1 - f)[d_{31}^2/(s_{11}^E \varepsilon_{33}^T)](n\varepsilon_{33}^T S_c/(2\delta))U^2, \quad (10)$$

откуда имеем

$$W_m = f(1 - f)k_{31}^2 C_n U^2/2, \quad (11)$$

где  $k_{33} = d_{33}/\sqrt{s_{33}^E \varepsilon_{33}^T}$  — коэффициент электромеханической связи при продольной деформации пьезодвигателя по оси 3 в электрическом поле, параллельном его длине;  $k_{31} = d_{31}/\sqrt{s_{11}^E \varepsilon_{33}^T}$  — коэффициент электромеханической связи при поперечной деформации пьезодвигателя по оси 1 в электрическом поле, перпендикулярном его длине;  $\varepsilon_{33}^T$  — диэлектрическая проницаемость при механическом напряжении  $T = \text{const}$ ;  $C_n = n\varepsilon_{33}^T S_c/\delta$  — емкость составного пьезодвигателя при продольном или поперечном пьезоэффекте;  $S_c = bh$  — площадь конденсатора пьезопластины.

Электрическая энергия, накопленная в составном пьезодвигателе как конденсаторе при приложении напряжения  $U$  к его электродам (рис. 1 и 2), равна при продольном и поперечном пьезоэффектах

$$W_c = C_n U^2/2 = n\varepsilon_{33}^T S_c U^2/(2\delta). \quad (12)$$

При приложении напряжения  $U$  к электродам пьезодвигателя механическая энергия упругой деформации [4, 7], накопленная в пьезопреобразователе при его деформации по трем главным взаимно перпендикулярным осям 1, 2, 3, определяется с учетом потенциальных энергий, накопленных при упругой деформации по этим осям, равных площадям соответствующих прямоугольных треугольников со сторонами  $\Delta l_{\max}$  и  $F_{\max}$  и имеет вид

$$W_e = W_{e_1} + W_{e_2} + W_{e_3}. \quad (13)$$

При продольном и поперечном пьезоэффектах

$$W_{e_1} = F_{1\max}\Delta l_{1\max}/2 = nd_{31}^2 S_c U^2/(2\delta s_{11}^E) —$$

механическая энергия при деформации по оси 1;

$$W_{e_2} = F_{2\max}\Delta l_{2\max}/2 = nd_{31}^2 S_c U^2/(2\delta s_{11}^E) —$$

механическая энергия при деформации по оси 2;

$$W_{e_3} = F_{3\max}\Delta l_{3\max}/2 = nd_{33}^2 S_c U^2/(2\delta s_{33}^E) —$$

механическая энергия при деформации по оси 3.

Энергия диэлектрических тепловых потерь в квазистатическом или статическом режиме при представлении пьезопреобразователя последовательной или параллельной эквивалентной электрической схемой из конденсатора и резистора, рассеивающего энергию диэлектрических потерь, записывается при продольном и поперечном пьезоэффектах в следующем виде:

$$W_d = C_n U^2 \text{tg } \delta_d/2 = n\varepsilon_{33}^T S_c U^2 \text{tg } \delta_d/(2\delta), \quad (14)$$

где  $\text{tg } \delta_d$  — тангенс угла диэлектрических потерь.

Энергия потерь на гистерезис определяется с применением теории механического гистерезиса: энергия, потерянная на гистерезис за один цикл деформации во всем объеме пьезодвигателя, равна площади цикла для гистерезисной петли в координатах "эквивалентная сила, вызывающая деформацию, и абсолютная деформация составного пьезодвигателя". Гистерезисная петля (цикл) соответствует четырем изменениям напряжения относительно нуля: 1 — от нуля до максимального положительного значения  $U$ ; 2 — от максимального положительного значения  $U$  до нуля; 3 — от нуля до минимального отрицательного значения  $U$ ; 4 — от минимального отрицательного значения  $U$  до нуля. Следовательно, потери на гистерезис при однополярном изменении напряжения от нуля до максимального положительного значения  $U$  или от нуля до минимального отрицательного значения  $U$  равны четверти площади цикла для гистерезисной петли.

Следовательно, при кусочно-линейной аппроксимации гистерезисной петли в виде параллелограмма соответственно для продольного пьезоэффекта при максимальном перемещении  $d_{33}nU$  и остаточном

гистерезисе  $\gamma_{33}d_{33}nU$  и для поперечного пьезоэффекта при максимальном перемещении  $d_{31}n(h/\delta)U$  и остаточном гистерезисе  $\gamma_{31}d_{31}n(h/\delta)U$  получаем выражение для потерь на гистерезис при однополлярном изменении напряжения

$$W_g = W_{g_1} + W_{g_2} + W_{g_3}. \quad (15)$$

При продольном и поперечном пьезоэффектах

$W_{g_1} = \gamma_{31} W_{e_1} = \gamma_{31} F_{1\max} \Delta l_{1\max} / 2 = \gamma_{31} n d_{31}^2 \times$   
 $\times S_c U^2 / (2\delta s_{11}^E)$  — энергия потерь на гистерезис при деформации по оси 1;

$W_{g_2} = \gamma_{31} W_{e_2} = \gamma_{31} F_{2\max} \Delta l_{2\max} / 2 = \gamma_{31} n d_{31}^2 \times$   
 $\times S_c U^2 / (2\delta s_{11}^E)$  — энергия потерь на гистерезис при деформации по оси 2;

$W_{g_3} = \gamma_{33} W_{e_3} = \gamma_{33} F_{3\max} \Delta l_{3\max} / 2 = \gamma_{33} n d_{33}^2 \times$   
 $\times S_c U^2 / (2\delta s_{33}^E)$  — энергия потерь на гистерезис при деформации по оси 3, где  $\gamma_{31}$  — коэффициент гистерезиса, равный отношению остаточной деформации пьезодвигателя по оси 1 к максимальной деформации по этой оси при приложении электрического поля по оси 3;  $\gamma_{33}$  — коэффициент гистерезиса, равный отношению остаточной деформации пьезодвигателя по оси 3 к максимальной деформации по этой оси при приложении электрического поля по оси 3.

Для учета ограничений по мощности для источников питания с учетом особенностей электро-механического преобразования энергии пьезодвигателями наноперемещений получаем следующие выражения для коэффициентов преобразования (1) пьезодвигателя:

- при продольном пьезоэффекте

$$\chi_{33} = 0,5f(1-f) / \{0,5f(1-f) + [k_{31}^2(1+\gamma_{31}) + 0,5(1+\operatorname{tg} \delta_d)] / k_{33}^2 + 0,5\gamma_{33} + 0,5\}; \quad (16)$$

- при поперечном пьезоэффекте

$$\chi_{31} = 0,5f(1-f) / \{0,5f(1-f) + 0,5[k_{33}^2(1+\gamma_{33}) + (1+\operatorname{tg} \delta_d)] / k_{31}^2 + \gamma_{31} + 1\}. \quad (17)$$

Аналогично записываем следующие выражения для КПД (2) пьезодвигателя:

- при продольном пьезоэффекте

$$\eta_{33} = f(1-f) / [f(1-f) + (2k_{31}^2 \gamma_{31} + \operatorname{tg} \delta_d) / k_{33}^2 + \gamma_{33}]; \quad (18)$$

- при поперечном пьезоэффекте

$$\eta_{31} = f(1-f) / [f(1-f) + 1(k_{33}^2 \gamma_{33} + \operatorname{tg} \delta_d) / k_{31}^2 + 2\gamma_{31}]. \quad (19)$$

Определим максимумы коэффициентов преобразования и полезного действия при продольном и поперечном пьезоэффектах.

Из условий

$$d\chi/df = 0, \quad (20)$$

$$d\eta/df = 0 \quad (21)$$

определяем  $\chi_{\max}$ ,  $\eta_{\max}$  — максимумы коэффициентов преобразования и полезного действия пьезодвигателя. Условия (21, 22) выполняются при  $f = 0,5$ .

Следовательно, выражения (17), (18) для максимумов коэффициентов преобразования пьезодвигателя записываем в следующем виде:

- при продольном пьезоэффекте

$$\chi_{33\max} = 1 / \{ [8k_{31}^2(1+\gamma_{31}) + 4(1+\operatorname{tg} \delta_d)] / k_{33}^2 + 4\gamma_{33} + 5 \}; \quad (22)$$

- при поперечном пьезоэффекте

$$\chi_{31\max} = 1 / \{ [4k_{33}^2(1+\gamma_{33}) + 4(1+\operatorname{tg} \delta_d)] / k_{31}^2 + 8\gamma_{31} + 9 \}. \quad (23)$$

Выражения, аналогичные (19), (20), для максимумов КПД пьезодвигателя получаем в следующем виде:

- при продольном пьезоэффекте

$$\eta_{33\max} = 1 / [(8k_{31}^2 \gamma_{31} + 4\operatorname{tg} \delta_d) / k_{33}^2 + 4\gamma_{33} + 1]; \quad (24)$$

- при поперечном пьезоэффекте

$$\eta_{31\max} = 1 / [(4k_{33}^2 \gamma_{33} + 4\operatorname{tg} \delta_d) / k_{31}^2 + 8\gamma_{31} + 1]. \quad (25)$$

Из выражений (25), (19) с учетом особенностей электро-механического преобразования энергии пьезодвигателями наноперемещений определяем предельные максимальные значения КПД пьезодвигателей при продольном и поперечном пьезоэффектах, равные единице:

$$\lim_{\substack{\gamma_{33} \rightarrow 0 \\ \gamma_{31} \rightarrow 0 \\ \operatorname{tg} \delta_d \rightarrow 0}} \eta_{33\max} = \lim_{\substack{\gamma_{33} \rightarrow 0 \\ \gamma_{31} \rightarrow 0 \\ \operatorname{tg} \delta_d \rightarrow 0}} \eta_{31\max} = 1. \quad (26)$$

В статике при отсутствии потерь на гистерезис и диэлектрических потерь КПД пьезодвигателя будет стремиться к единице.

В работах по исследованию КПД при одномерной модели пьезодвигателя [2, 3, 9] с учетом потерь по одной оси приведены значения КПД пьезодвигателей в пределах 0,6...0,9 и КПД 0,1...0,6 — для вибрационных пьезодвигателей [9, 10].

Экспериментальные исследования электро-механических деформаций и эффективности преобразования энергии составными пьезодвигателями, коэффициентов преобразования и полезного действия для пьезодвигателей из пьезоэлектрической керамики на основе цирконата и титаната свинца марок ЦТС проводились на прессе марки УММ-5 в диапазоне рабочих нагрузок в составных пьезодвигателях от 5 МПа до 100 МПа.

Для многослойных пьезоактюаторов с параметрами  $k_{31} = 0,36$ ,  $k_{33} = 0,7$ ,  $\text{tg } \delta_d = 0,02$ ,  $\gamma_{33} = 0,2$ ,  $\gamma_{31} = 0,2$ ,  $f = 0,5$  получены соответствующие коэффициенты преобразования и полезного действия пьезоактюаторов  $\chi_{33\text{max}} = 0,06$ ,  $\chi_{31\text{max}} = 0,017$ ,  $\eta_{33\text{max}} = 0,42$ ,  $\eta_{31\text{max}} = 0,16$ .

Для многослойных пьезоактюаторов с параметрами  $k_{31} = 0,38$ ,  $k_{33} = 0,71$ ,  $\text{tg } \delta_d = 0,02$ ,  $\gamma_{33} = 0,1$ ,  $\gamma_{31} = 0,1$ ,  $f = 0,5$  определены коэффициенты преобразования и полезного действия пьезоактюаторов  $\chi_{33\text{max}} = 0,062$ ,  $\chi_{31\text{max}} = 0,019$ ,  $\eta_{33\text{max}} = 0,5$ ,  $\eta_{31\text{max}} = 0,4$ .

Для многослойных пьезоактюаторов с параметрами  $k_{31} = 0,4$ ,  $k_{33} = 0,72$ ,  $\text{tg } \delta_d = 0,01$ ,  $\gamma_{33} = 0,06$ ,  $\gamma_{31} = 0,06$ ,  $f = 0,5$  определены коэффициенты преобразования и полезного действия пьезоактюаторов  $\chi_{33\text{max}} = 0,064$ ,  $\chi_{31\text{max}} = 0,021$ ,  $\eta_{33\text{max}} = 0,68$ ,  $\eta_{31\text{max}} = 0,4$ .

**Заключение.** При рассмотрении КПД пьезоактюатора при перемещении нагрузки по одной из осей, например оси 3 или оси 1, учет потерь энергии по взаимно перпендикулярным осям 3, 2, 1 по-

зволяет получить нижнюю минимальную оценку КПД 0,2...0,7 по сравнению с верхней максимальной оценкой КПД 0,6...0,9 при учете потерь только по одной оси.

Полученные зависимости отражают особенности электро-механического преобразования энергии пьезоактюаторами и позволяют определять с учетом нагрузки режимы работы и потери для пьезоактюаторов в оборудовании для нанотехнологий.

#### Список литературы

1. Миров В. Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. М.: Техносфера, 2004. 144 с.
2. Джагунов Р. Г., Ерофеев А. А. Пьезоэлектронные устройства вычислительной техники, систем управления и контроля: Справочник. СПб.: Политехника, 1994. 608 с.
3. Ерофеев А. А., Проклин А. И., Уланов В. Н. и др. Пьезоэлектроника М.: Радио и связь, 1994. 240 с.
4. Афонин С. М. Пьезопреобразователи для приводов микроперемещений // Приборы и системы управления. 1998. № 2. С. 41—42.
5. Афонин С. М. Обобщенная структурно-параметрическая модель электромагнитоупругого преобразователя для систем управления нано- и микроперемещениями. II. Об обобщенной структурно-параметрической модели составного электромагнитоупругого преобразователя // Изв. РАН. ТиСУ. 2005. № 4. С. 108—111.
6. Афонин С. М. Исследование абсолютной устойчивости системы управления деформацией пьезопреобразователя для нано- и микроперемещений // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 1. С. 10—16.
7. Афонин С. М. Решение матричных уравнений в задачах электроупругости для многослойных актюаторов нано-перемещений // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 8. С. 39—45.
8. Физическая акустика. Т. 1. Ч. А. Методы и приборы ультразвуковых исследований / Под ред. У. Мэзона. М.: Мир, 1966. 592 с.
9. Лавриненко В. В., Каргашев И. А., Вишневский В. С. Пьезоэлектрические двигатели. М.: Энергия, 1980. 112 с.
10. Бансявичус Р. Ю., Рагульскис К. М. Вибродвигатели. Вильнюс: Мокслас, 1981. 193 с.
11. Акопян В. А., Панин А. Е., Соловьев А. Н., Шевцов С. Н. Некоторые физико-механические проблемы пьезоэлектрических актюаторов и области их применения // Нано- и микро-системная техника. 2006. № 10. С. 35—40.
12. Окадзаки К. Технология керамических диэлектриков: Пер. с яп. М.: Энергия, 1976. 336 с.

**В. И. Бусурин**<sup>1</sup>, д-р техн. наук, проф.,

vibusurin@mega.ru,

**А. В. Казарьян**<sup>2</sup>,

канд. физ.-мат. наук, зам. ген. директора,

kazaryan1@ya.ru,

**В. С. Чижов**<sup>3</sup>, гл. инженер,

**Звей Нэй Зо**<sup>1</sup>, аспирант,

<sup>1</sup> Московский авиационный институт

(государственный технический университет),

<sup>2</sup> ОАО "ЦНИТИ "Техномаш",

<sup>3</sup> ЗАО "ЦНИТИ "Техномаш-ВОС"

## Исследование характеристик преобразователей электрического напряжения и температуры на основе оптического туннелирования

*Теоретически и экспериментально исследуется кварцевый преобразователь на основе эффекта оптического туннелирования с плоскопараллельным зазором, управляемым с помощью электрического напряжения и температуры. Описывается конструкция и рассчитываются характеристики преобразователя. Экспериментально исследуется функция преобразования для случая коллимированного светового пучка. Определен рабочий диапазон, обеспечивающий максимальную чувствительность преобразователя. Исследована чувствительность преобразователя к термическому расширению элементов конструкции и возможность ее использования для измерения температуры.*

**Ключевые слова:** измерительный преобразователь, плавленый кварц, оптическое туннелирование, функция преобразования, чувствительность, пьезопакет, электрическое напряжение, температура, эксперимент

### Введение

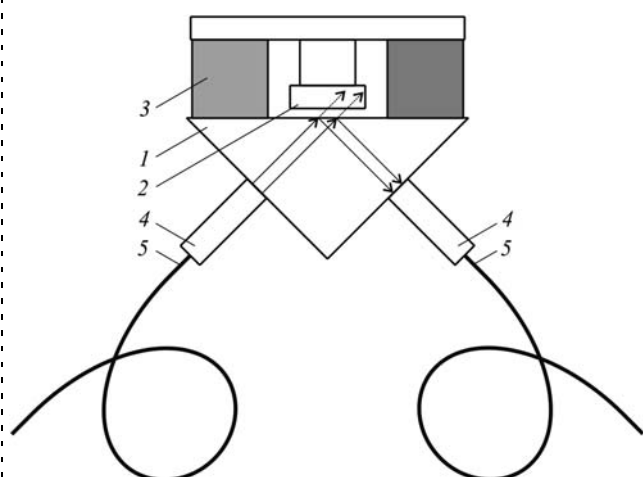
Современные требования, предъявляемые к измерительным преобразователям (давления, температуры) систем автоматического управления авиационными газотурбинными двигателями, могут быть удовлетворены за счет применения первичного преобразователя (ПП) на основе эффекта оптического туннелирования, выполненного из плавленого кварца [1]. Принцип действия такого ПП основан на зависимости коэффициента отражения света структурой "среда—зазор—среда" от величины зазора. Угол падения света на границу между первой средой и зазором (воздухом) выбирается таким, что при большом зазоре по сравнению с длиной волны оптического излучения происходит полное внутреннее отражение. Если значение зазора сравнимо с длиной волны света, то часть излучения проходит (туннелирует) через зазор во вторую среду и коэффициент отражения структуры "среда—зазор—среда" уменьшается. Таким образом, мощность оптического

излучения, отраженного от структуры "среда—зазор—среда", несет информацию о значении зазора.

При проектировании ПП на основе оптического туннельного эффекта важно иметь полное представление об особенностях поведения реальной функции преобразования значения зазора в изменение оптической мощности при различных сочетаниях параметров ПП, а также о том, насколько точно функция преобразования может быть описана теоретическими зависимостями в диапазоне возможных изменений зазора. Кроме того, следует учитывать, что требования оптимизации функциональных характеристик ПП, как правило, находятся в противоречии с требованиями технологичности конструкции ПП.

Если в качестве материала ПП на основе эффекта оптического туннелирования используется плавленый кварц (показатель преломления  $n = 1,48$ ), то минимальный угол, при котором на границе раздела с воздушной средой происходит полное внутреннее отражение, составляет  $42,5^\circ$ . В этом случае можно выбрать угол падения коллимированного светового пучка  $\theta$  равным  $45^\circ$ . Это позволяет упростить технологию сборки ПП и использовать в конструкции ПП прямоугольную равнобедренную призму, обладающую минимальной трудоемкостью изготовления, минимальной себестоимостью и лучшими показателями точности изготовления.

Для экспериментальной проверки функции преобразования значения зазора в изменение оптической мощности при нарушении полного внутреннего отражения была использована конструкция ПП, в которой вместо гибкой мембраны использовали плоскопараллельную пластину (диск), также изготовленную из плавленого кварца (рис. 1). Для



**Рис. 1. Конструкция ПП:**

1 — призма полного внутреннего отражения; 2 — подвижный диск; 3 — пьезопакет; 4 — коллимирующее устройство; 5 — оптоволокно



регулирования зазора в качестве одного из элементов конструкции применялся пьезопакет. Коллимирующие устройства, в которых применяли градиентные линзы, устанавливали перпендикулярно катетным граням призмы.

### Функция преобразования

В наиболее общем случае, когда обе среды и зазор имеют различные показатели преломления, эффект оптического туннелирования описывается сложными для анализа, громоздкими соотношениями [2, 3]. В случае, когда для первой и третьей среды применяется один и тот же материал ( $n_1 = n_3 = n$ ), а вторая среда представляет собой воздушный зазор ( $n_2 = 1$ ), формулы существенно упрощаются и для коэффициента отражения света  $R$  от структуры "среда—воздушный зазор—среда" могут быть записаны в виде

$$R(b) = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{1 + \frac{\sin^2 \varphi_{TE}}{\operatorname{sh}^2 b}} + \frac{1}{1 + \frac{\sin^2 \varphi_{TM}}{\operatorname{sh}^2 b}} \right), \quad (1)$$

где

$$\varphi_{TE} = \arctan \left( \frac{2n \cos \theta \sqrt{n^2 \sin^2 \theta - 1}}{\cos^2 \theta - n^2 (n^2 \sin^2 \theta - 1)} \right);$$

$$\varphi_{TM} = \arctan \left( \frac{2n \cos \theta \sqrt{n^2 \sin^2 \theta - 1}}{n^2 \cos^2 \theta - n^2 \sin^2 \theta + 1} \right); \quad (2)$$

$$b = -2\pi \frac{d}{\lambda} \sqrt{n^2 \sin^2 \theta - 1}; \quad (3)$$

$d$  — зазор;  $\lambda$  — длина волны света в вакууме.

В рассматриваемой конструкции ПП значение зазора  $d$  определяется толщиной пьезопакета, которая неоднозначно зависит от электрического напряжения  $U$ , подаваемого на пьезопакет. На рис. 2 показан характерный пример зависимости толщины пьезопакета от напряжения, полученной экспериментально. Изменение толщины пьезопакета контролировали с помощью измерительной головки 0,5ИПМУ с ценой деления шкалы 0,5 мкм. Зависимость толщины пьезопакета от напряжения имеет явно выраженный гистерезисный характер, условно показанный штриховой линией (рис. 2). По результатам многократных измерений для линейных участков гистерезисной зависимости была определена чувствительность пьезопакета:  $\alpha_k = 4,7 \pm 0,9$  мкм/кВ. Поскольку погрешность измерения чувствительности достаточно велика, то полученное значение в дальнейшем применяли в качестве оценочного.

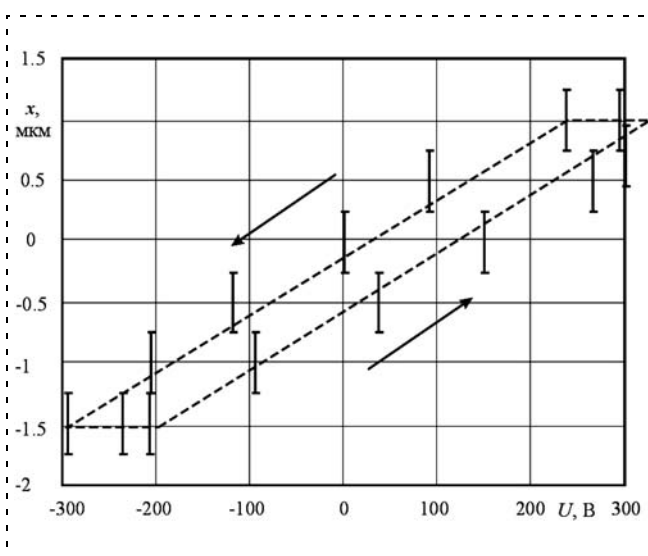


Рис. 2. Зависимость толщины пьезопакета от электрического напряжения

В случае монотонного изменения напряжения  $U$ , подаваемого на пьезопакет, зависимость зазора от напряжения можно задать кусочно-линейной функцией:

$$d = \begin{cases} \alpha(U - U_0) & \text{при } U > U_0; \\ 0 & \text{при } U < U_0, \end{cases} \quad (4)$$

где  $\alpha$  — чувствительность пьезопакета;  $U_0$  — напряжение, которому соответствует нулевое значение зазора.

В таком случае функция преобразования преобразователя электрического напряжения, определяемая как зависимость мощности выходного оптического излучения  $P$  от электрического напряжения, с учетом суммарных потерь  $k_{\Pi}$  может быть представлена следующим образом:

$$P(U) = \begin{cases} P_0 k_{\Pi} R \left[ 2\pi \frac{\alpha(U - U_0)}{\lambda} \sqrt{n^2 \sin^2 \theta - 1} \right] & \text{при } U > U_0; \\ 0 & \text{при } U < U_0, \end{cases} \quad (5)$$

где  $P_0$  — оптическая мощность, поступающая на вход датчика.

### Экспериментальная проверка функции преобразования

На рис. 3 показана схема установки для экспериментального исследования функции преобразования преобразователя электрического напряжения  $P = f(U)$ . В качестве источника оптической мощности использовали модуль FOD 2115, работающий в режиме генерации излучения с длиной волны 1,31 мкм. Выходное оптическое излучение регист-

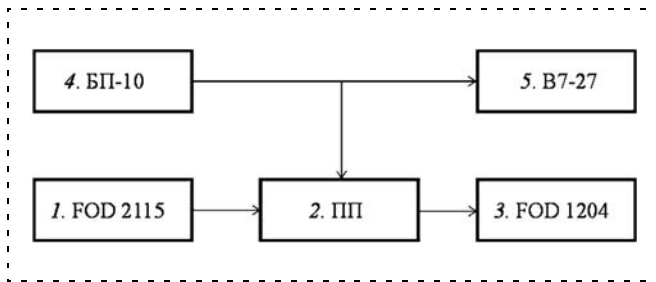


Рис. 3. Схема экспериментальной установки: 1 — источник излучения, 2 — первичный преобразователь, 3 — измеритель мощности; 4 — источник электрического напряжения; 5 — вольтметр

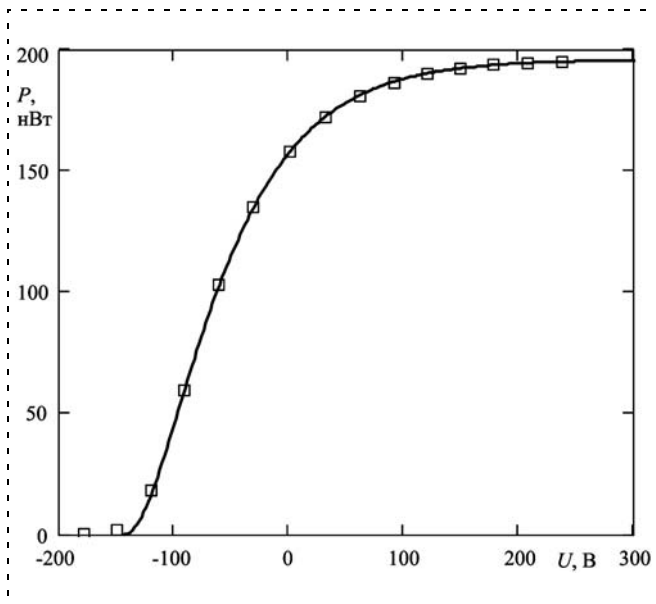


Рис. 4. Функция преобразования ПП электрического напряжения (квадратные маркеры — эксперимент, сплошная линия — расчетная кривая)

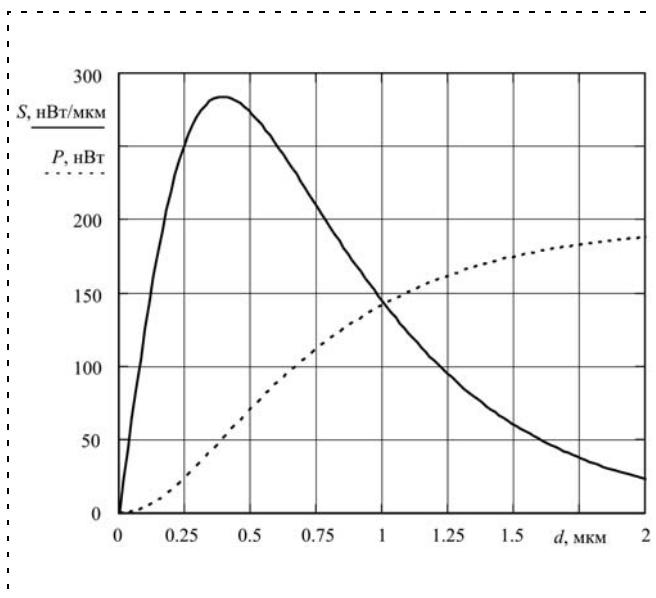


Рис. 5. Зависимость чувствительности  $S$  и выходной оптической мощности ПП  $P$  от зазора  $d$

рировали измерителем мощности FOD 1204. Значение оптической мощности на входе ПП составило 1,7 мкВт. Электрическое напряжение поступало на ПП от блока питания БП-10 и контролировалось вольтметром В7-27.

Результаты измерений показаны на рис. 4 квадратными маркерами. Функцию преобразования (сплошная линия) рассчитывали по формуле (5) при  $P_0 = 1,7$  мкВт;  $\lambda = 1,31$  мкм;  $n = 1,48$ ;  $\theta = 45^\circ$ . Для определения параметров  $k_{\text{п}}$ ,  $\alpha$  и  $U_0$  применялся метод наименьших квадратов. В качестве меры отклонения экспериментальных точек ( $U_i, P_i$ ) от расчетной кривой, заданной формулой (5), использовали сумму квадратов  $Q$  отклонений измеренного значения мощности  $P_i$  от расчетного  $P = f(U_i)$ :

$$Q(k_{\text{п}}, \alpha, U_0) = \sum_{i=1}^{13} \left[ P_0 k_{\text{п}} R \left[ 2\pi \frac{\alpha(U_i - U_0)}{\lambda} \sqrt{n^2 \sin^2 \theta - 1} \right] - P_i \right]^2. \quad (6)$$

Параметры  $k_{\text{п}}$ ,  $\alpha$  и  $U_0$ , определенные из условия минимума функции  $Q(k_{\text{п}}, \alpha, U_0)$ , имели следующие значения:  $k_{\text{п}} = 0,12$ ;  $\alpha = 5,54$  мкм/кВ;  $U_0 = -145$  В.

Полученное значение чувствительности пьезопакета  $\alpha = 5,54$  мкм/кВ соответствует  $\alpha_{\text{к}} = 4,7 \pm 0,9$  мкм/кВ, найденному в результате непосредственного измерения толщины пьезопакета. Следует заметить, что в области  $U < -130$  В расчетная кривая дает значительные расхождения с экспериментальными точками. Это объясняется тем, что из-за неидеальности формы подвижного диска и призмы они при уменьшении зазора соприкасаются в некоторой точке раньше, чем наступает оптический контакт по всему сечению падающего светового пучка. Кроме того, при таком соприкосновении диск начинает самопроизвольно притягиваться к призме за счет действия сил Ван-дер-Ваальса. В эксперименте это проявлялось в том, что для установления постоянного значения выходной оптической мощности после уменьшения напряжения требовался длительный интервал времени — порядка нескольких минут. Экспериментальные точки, соответствующие этой области, были исключены при расчете аппроксимирующей кривой.

Найденные параметры функции преобразования позволили определить зависимость чувствительности ПП к изменению зазора  $d$  от его значения  $S(d) = \frac{P(d + \Delta d) - P(d)}{\Delta d}$ . Результаты расчета приведены на рис. 5. Сплошной линией показана чувствительность ПП к изменению зазора, а штриховой — зависимость выходной оптической мощности ПП от зазора  $d$ . Максимальное значение чувствительности  $S = 284$  нВт/мкм наблюдается при  $d = 0,4$  мкм. В этой области изменению зазора на 0,1 мкм соответствует изменение выходной мощности на 20 %.

## Температурная чувствительность преобразователя

Поскольку ПП чувствителен к малым (десятки нм) изменениям зазора, а элементы конструкции, обеспечивающие позиционирование подвижного диска относительно катетной грани призмы, имеют значительную (до 10 мм) толщину, то необходимо учесть возможное изменение зазора за счет температурного расширения элементов конструкции. Для ПП, в котором все конструкционные элементы, кроме пьезопакета, изготовлены из плавленого кварца, дополнительное изменение зазора, связанное с изменением температуры, может быть записано следующим образом:

$$\Delta d_T = l(\text{ТКЛР}_1 - \text{ТКЛР}_2), \quad (7)$$

где  $l = 12$  мм — толщина пьезопакета;  $\text{ТКЛР}_1 = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$  и  $\text{ТКЛР}_2 = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$  — температурные коэффициенты линейного расширения пьезопакета и плавленого кварца соответственно. Это приводит к изменению зазора на 0,024 мкм на  $1^\circ \text{C}$ , что в точке максимальной чувствительности соответствует изменению оптической мощности на  $\sim 5\%$ . Таким образом, ПП обладает существенной чувствительностью к изменению температуры. Влияние температуры может быть скомпенсировано за счет сочетания конструкционных элементов с соответствующими ТКЛР и размерами. Температурная стабильность экспериментального образца ПП обеспечивалась тем, что деталь, к которой крепился подвижный диск, изготавливалась из материала с ТКЛР несколько большим, чем у пьезопакета.

Температурная чувствительность может быть использована для построения преобразователя температуры. Для этого целесообразно вместо пьезопакета использовать кольцо из плавленого кварца, а в качестве термочувствительного элемента — деталь, к которой крепится подвижный диск, изготовленную из материала с большим ТКЛР (рис. 6). Тогда вместо (4) будем иметь следующее выражение для зазора  $d$ :

$$d = \begin{cases} l(\text{ТКЛР}_1 - \text{ТКЛР}_2)(T - T_0) & \text{при } T > T_0; \\ 0 & \text{при } T < T_0, \end{cases} \quad (8)$$

где  $T_0$  — температура, которой соответствует нулевое значение зазора.

Зависимость мощности выходного оптического излучения от температуры  $P = f(T)$  будет иметь следующий вид:

$$P(T) = \begin{cases} P_0 k_{\text{п}} R \left[ 2\pi \frac{l(\text{ТКЛР}_1 - \text{ТКЛР}_2)(T - T_0)}{\lambda} \times \right. \\ \left. \times \sqrt{n^2 \sin^2 \theta - 1} \right] & \text{при } T > T_0; \\ 0 & \text{при } T < T_0. \end{cases} \quad (9)$$

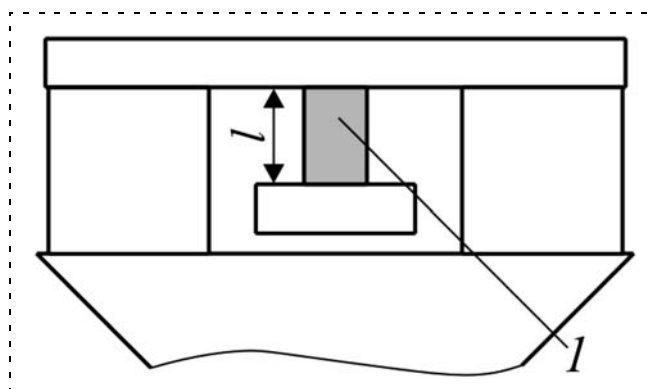


Рис. 6. Фрагмент конструкции ПП температуры:  
1 — деталь из материала с большим ТКЛР

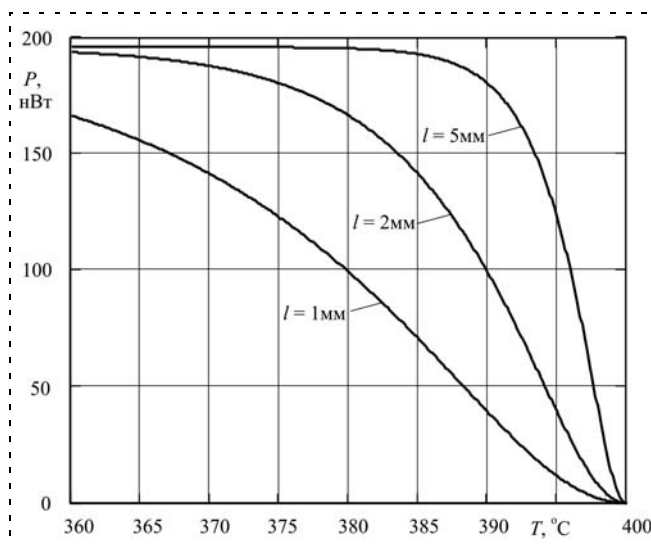


Рис. 7. Функция преобразования ПП температуры

На рис. 7 показано семейство функций преобразования ПП температуры, рассчитанных для ряда значений высоты  $l$  элемента 1 (см. рис. 6), изготовленного из алюминиевого сплава Д16 ( $\text{ТКЛР}_1 = 22,9 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ ) для значений  $P_0 = 1,7$  мкВт,  $k_{\text{п}} = 0,12$  и  $T_0 = 400^\circ \text{C}$ . Анализ расчетных зависимостей показывает, что, варьируя высоту термочувствительного элемента, можно в широком диапазоне изменять чувствительность ПП.

## Заключение

Таким образом, результаты выполненных экспериментов показали, что использование теоретических зависимостей при расчете преобразователей на основе эффекта оптического туннелирования дает хорошее согласие с экспериментальными данными. При этом из рабочего диапазона зазоров преобразователей следует исключать область  $d < 0,2$  мкм, в которой могут наблюдаться такие явления, как механический контакт вне сечения оптического пучка, препятствующий оптическому контакту, и самопроизвольное уменьшение зазора за счет дей-

ствия сил Ван-дер-Ваальса. Также целесообразно исключить область, в которой зазор превышает длину волны оптического излучения, где чувствительность падает более, чем в три раза по сравнению с максимальным значением.

Высокая чувствительность к изменению зазора приводит вследствие теплового расширения деталей конструкции к температурной зависимости выходной оптической мощности. Расчеты показали, что этот эффект, с одной стороны, необходимо учитывать при обеспечении температурной стабильности ПП, а с другой, его можно использовать для построения преобразователя температуры. Варьируя геометрические параметры конструкции, а также

материал термочувствительного элемента, можно в широких пределах изменять границы диапазона измеряемой температуры и чувствительность преобразователя.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 10-08-00104).*

#### Список литературы

1. Бусурин В. И., Шток К. В., Звей Нэй Зо. Преобразователи давления и силы на основе оптического туннельного эффекта // Приборы. № 2. 2010. С. 1—5.
2. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1983. 721 с.
3. Бусурин В. И., Носов Ю. Р. Волоконно-оптические датчики. М.: Энергоатомиздат, 1990. 256 с.

## ИНФОРМАЦИЯ



**Весной 2012 г. в Санкт-Петербурге  
на базе ОАО "Концерн "Электроприбор"  
состоится конференции:**

- ♦ **с 13 по 16 марта XIV конференция молодых ученых  
"Навигация и управление движением" (XIV КМУ2011)**

#### *Тематика конференции*

- Интегрированные и спутниковые системы навигации
- Теория и системы управления
- Обработка информации в навигационных системах
- Электронные и электромеханические устройства систем навигации и управления
- Интеллектуальные системы навигации и управления
- Гироскопические системы
- Чувствительные элементы систем навигации и управления
- Микромеханические датчики, системы и технологии
- Навигация и управление движением
- Информационные технологии на предприятиях навигационного приборостроения
- Новые образовательные технологии в области навигации и управления

*Подробную информацию о конференции см. сайте:  
<http://www.elektropribor.spb.ru/enf/kmul4/rindex.php>*

- ♦ **с 28 по 30 мая 2012 XIX Санкт-Петербургская  
международная конференция по интегрированным  
навигационным системам (МКИНС2012)**

#### *Тематика конференции*

- Системы навигации, управления и наведения и их элементы
- Интегрированные навигационные системы для морских, наземных и аэрокосмических объектов
- Инерциальные системы и датчики
- Спутниковые системы GLONASS, GPS, Galileo и их дополнения
- Микромеханические системы
- Алгоритмы и программное обеспечение
- Испытания и метрология

*Подробную информацию о конференции см. сайте:  
<http://www.elektropribor.spb.ru/cnf/icins2012/rindex.php>*

УДК 62-523.6

**А. Н. Шемякин**<sup>1</sup>, науч. сотр.,

**М. Ю. Рачков**<sup>2</sup>, д-р техн. наук, проф.,  
michyur@gmail.com,

**Н. Г. Соловьев**<sup>1</sup>, д-р физ.-мат. наук, зав. лаб.,

<sup>1</sup> Учреждение Российской академии наук

Институт проблем механики

им. А. Ю. Ишлинского РАН,

<sup>2</sup> Московский государственный  
индустриальный университет

## Исследование влияния натекания воздуха в газовый контур на мощность излучения лазерного технологического комплекса. Часть 2

*Исследовано влияние натекания воздуха в газовый контур на мощность излучения лазерного технологического комплекса с несамостоятельным тлеющим разрядом и предложен метод, который расширяет диагностические возможности системы управления, позволяя контролировать натекание воздуха в газовый контур лазера.*

**Ключевые слова:** лазерный технологический комплекс, несамостоятельный тлеющий разряд, мощность излучения лазера, газовый контур, диагностика, система управления

### Введение

Натекание воздуха в газовый контур лазера является труднодиагностируемой неисправностью, приводящей к снижению мощности излучения лазерного технологического комплекса (ЛТК). Важнейшим элементом ЛТК является лазер, в основе которого лежит оригинальный способ организации тлеющего разряда в камере большого объема — несамостоятельный тлеющий разряд (НТР) с импульсной емкостной ионизацией [1]. В серии экспериментов исследовали зависимость мощности лазерного излучения от парциального давления воздуха при различных значениях частоты импульсов ионизации. Схема эксперимента и предварительная обработка полученных результатов приведены в работе [2].

### Исследование влияния натекания воздуха в газовый контур лазера на параметры излучения

Результаты экспериментов обработаны по методике, изложенной в ГОСТ Р ИСО 11554—2008 "Методы испытаний лазеров и измерений мощности, энергии и временных характеристик лазерного пучка" [3]. Для сглаженной мощности лазерного излучения  $\bar{W}_s$  вычислены эмпирические средние значения

$$\bar{W}_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n W_{s_i}$$

и эмпирическое стандартное отклонение

$$s_{W_s} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (W_{s_i} - \bar{W}_s)^2}. \quad (1)$$

По этим оценкам определена относительная флуктуация мощности

$$\Delta P = \pm \frac{2s_{W_s}}{\bar{W}_s}. \quad (2)$$

### Влияние натекания воздуха на эмпирическое среднее значение мощности лазерного излучения

Результаты расчета эмпирических средних значений мощности  $\bar{W}_s$  представлены на рис. 1.

Значительное, до 28 %, падение мощности происходит уже при давлении воздуха 0,1 мм рт. ст. (частота ионизации 1540 Гц). В связи с этим детально исследовали диапазон давления воздуха от 0 до 0,1 мм рт. ст. В уточняющей серии экспериментов снимали зависимость мощности лазерного излучения от частоты импульсов ионизации при парциальном давлении воздуха 0; 0,025; 0,05; 0,075; 0,1 мм рт. ст.

На рис. 2 показаны зависимости эмпирического среднего значения мощности  $\bar{W}_s$  от частоты ионизации при парциальном давлении воздуха от 0 до 0,1 мм рт. ст.

Из рис. 2 следует, что существенное, до 19 %, падение мощности происходит уже при давлении воздуха 0,05 мм рт. ст. (частота ионизации 1540 Гц).

Зависимости эмпирического среднего значения мощности  $\bar{W}_s$  от парциального давления воздуха при фиксированной частоте импульсов ионизации 1540, 2190, 2550, 2730 Гц показаны на рис. 3.

Наиболее равномерное и значительное первоначальное падение мощности происходит при частоте импульсов ионизации, составляющей 1540 Гц. На остальных частотах ионизации при парциальном давлении воздуха 0,025 мм рт. ст. среднее значение мощности не изменяется, и эти частоты не могут

быть использованы для диагностики начального натекания воздуха в газовый контур.

Итоговый трехмерный график зависимости эмпирического среднего значения мощности  $\bar{W}_s$  от частоты импульсов ионизации и парциального давления воздуха приведен на рис. 4.

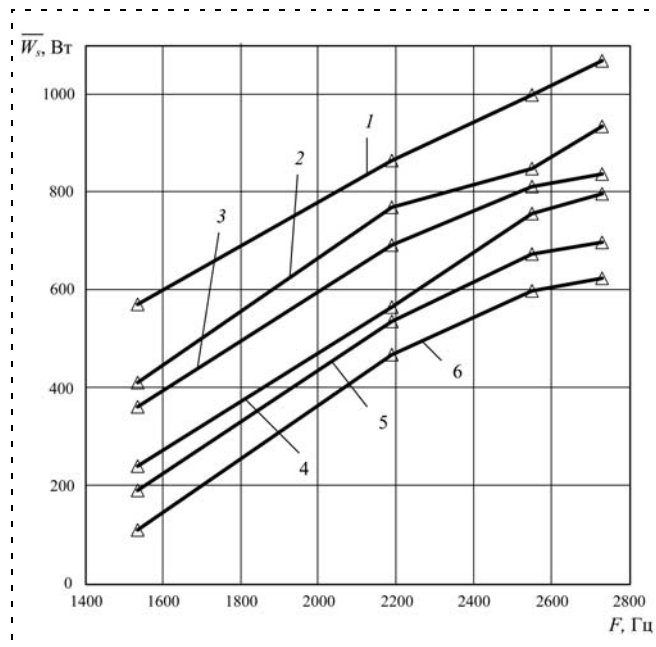


Рис. 1. Зависимости эмпирического среднего значения мощности  $\bar{W}_s$  от частоты ионизации  $F$  при парциальном давлении воздуха  $p$  от 0 до 1 мм рт. ст.:  
1 —  $p = 0$  мм рт. ст.; 2 —  $p = 0,1$  мм рт. ст.; 3 —  $p = 0,2$  мм рт. ст.; 4 —  $p = 0,4$  мм рт. ст.; 5 —  $p = 0,8$  мм рт. ст.; 6 —  $p = 1,0$  мм рт. ст.

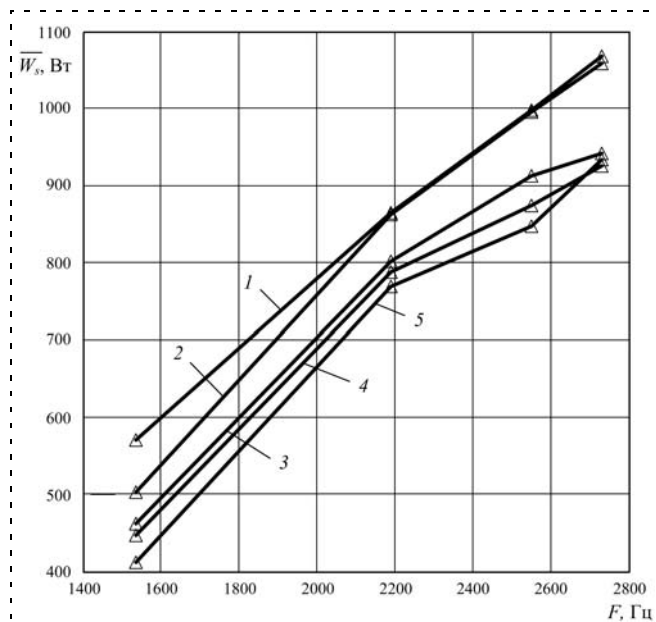


Рис. 2. Зависимости эмпирического среднего значения мощности  $\bar{W}_s$  от частоты ионизации  $F$  при парциальном давлении воздуха  $p$  от 0 до 0,1 мм рт. ст.:  
1 —  $p = 0$  мм рт. ст.; 2 —  $p = 0,025$  мм рт. ст.; 3 —  $p = 0,05$  мм рт. ст.; 4 —  $p = 0,075$  мм рт. ст.; 5 —  $p = 0,1$  мм рт. ст.

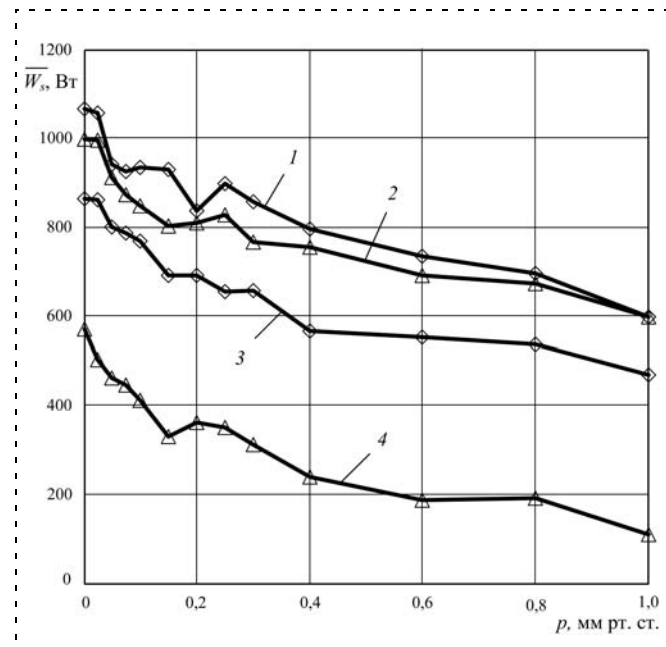


Рис. 3. Зависимости эмпирического среднего значения мощности  $\bar{W}_s$  от парциального давления воздуха  $p$  при частоте импульсов ионизации  $F$ :  
1 —  $F = 2730$  Гц; 2 —  $F = 2550$  Гц; 3 —  $F = 2190$  Гц; 4 —  $F = 1540$  Гц

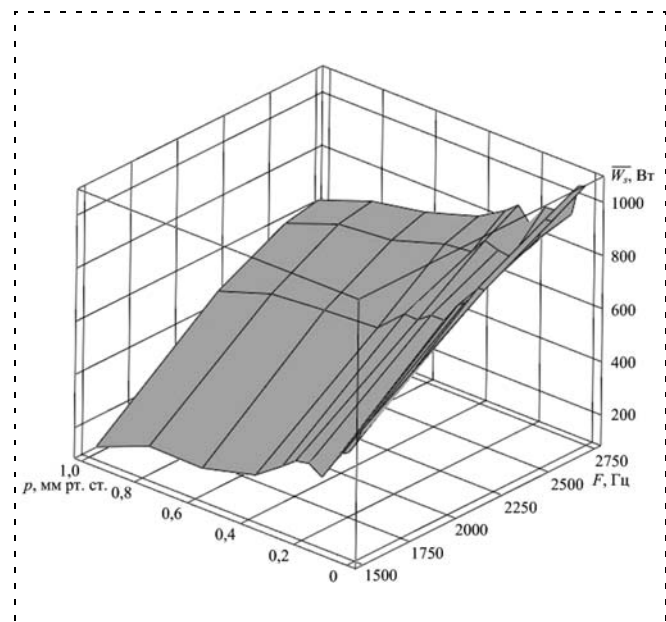


Рис. 4. Трехмерный график зависимости эмпирического среднего значения мощности  $\bar{W}_s$  от частоты импульсов ионизации  $F$  и парциального давления воздуха  $p$

Мощность излучения линейно растет с увеличением частоты импульсов ионизации и равномерно падает с увеличением парциального давления воздуха.

### Влияния натекания воздуха на эмпирическое стандартное отклонение мощности лазерного излучения

Результаты расчета эмпирического стандартного отклонения  $s_{W_s}$  (1) представлены в табл. 1.

На рис. 5 показаны зависимости эмпирического стандартного отклонения  $s_{W_s}$  от парциального давления воздуха при фиксированной частоте импульсов ионизации 1540, 2190, 2550, 2730 Гц.

При частотах импульсов ионизации 2190, 2550 и 2730 Гц стандартное отклонение  $s_{W_s}$  практически не изменяется с увеличением парциального давления воздуха и изменяется вблизи своего среднего значения. Значительные отклонения от среднего значения наблюдаются только при частоте импульсов ионизации, составляющей 1540 Гц. На рис. 5 эта зависимость выделена жирной линией.

Трехмерный график зависимости эмпирического стандартного отклонения  $s_{W_s}$  от частоты импульсов ионизации  $F$  и парциального давления воздуха  $p$  приведен на рис. 6.

Определим минимальное и максимальное значения стандартного отклонения  $s_{W_s}$ :

$$\min s_{W_s} = 72,12 \text{ Вт}, \max s_{W_s} = 132,42 \text{ Вт}.$$

Среднее значение стандартного отклонения  $s_{W_s}$  равно

$$\bar{s}_{W_s} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n s_{W_{si}} = 95,70 \text{ Вт},$$

а стандартное отклонение самого стандартного отклонения составляет

$$s_{s_{W_s}} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (s_{W_{si}} - \bar{s}_{W_s})^2} = 11,91 \text{ Вт}.$$

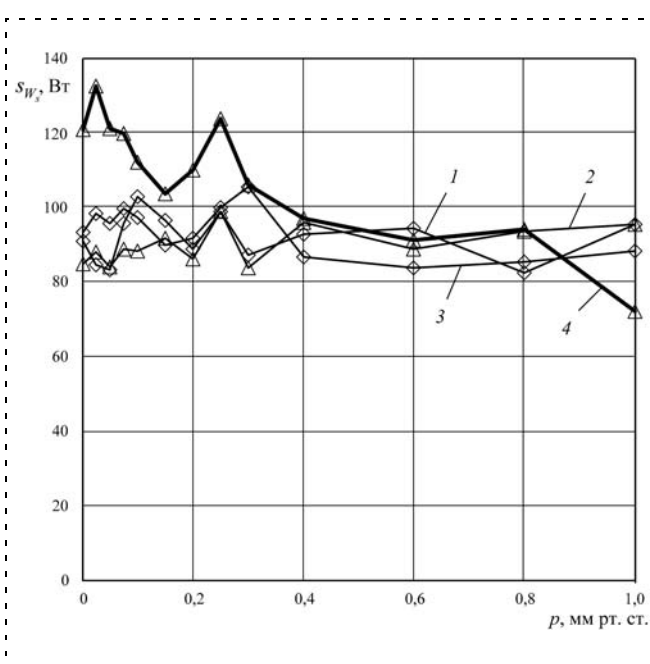


Рис. 5. Зависимости эмпирического стандартного отклонения  $s_{W_s}$  от парциального давления воздуха  $p$  при частоте импульсов ионизации, Гц:  
1 – 2730; 2 – 2550; 3 – 2190; 4 – 1540

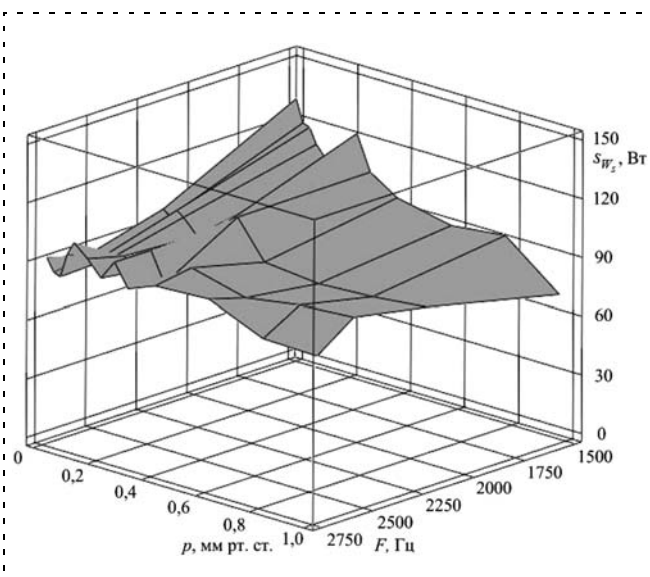


Рис. 6. Трехмерный график зависимости эмпирического стандартного отклонения  $s_{W_s}$  от частоты импульсов ионизации  $F$  и парциального давления воздуха  $p$

Таблица 1

Результаты расчета эмпирического стандартного отклонения  $s_{W_s}$

| Частота импульсов ионизации $F$ , Гц | Парциальное давление воздуха $p$ , мм рт. ст. |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |      |      |
|--------------------------------------|-----------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|
|                                      | 0                                             | 0,025 | 0,05  | 0,075 | 0,1   | 0,15  | 0,2   | 0,25  | 0,3   | 0,4  | 0,6  | 0,8  | 1,0  |
| 1540                                 | 120,9                                         | 132,4 | 121,0 | 119,8 | 112,1 | 103,6 | 109,9 | 123,8 | 106,0 | 97,0 | 91,0 | 94,1 | 72,1 |
| 2190                                 | 93,2                                          | 98,3  | 95,6  | 99,6  | 97,1  | 89,6  | 91,7  | 99,7  | 105,4 | 86,4 | 83,7 | 85,2 | 88,1 |
| 2550                                 | 84,7                                          | 87,9  | 83,9  | 88,6  | 88,3  | 91,6  | 86,0  | 98,7  | 83,6  | 95,9 | 88,8 | 93,4 | 95,4 |
| 2730                                 | 90,9                                          | 84,5  | 83,1  | 95,7  | 102,7 | 96,5  | 88,6  | 98,8  | 87,2  | 92,8 | 94,2 | 82,4 | 95,4 |

Тогда относительная флуктуация  $s_{W_s}$  равна

$$\Delta s_{W_s} = \pm \frac{2s_{W_s}}{s_{W_s}} 100 = 24,9 \, \%.$$

Можно утверждать, что эмпирическое стандартное отклонение  $s_{W_s}$  слабо зависит от парциального давления воздуха и находится вблизи своего среднего значения  $\bar{s}_{W_s}$ . Значительные отклонения  $s_{W_s}$  от среднего значения при частоте импульсов ионизации 1540 Гц могут быть связаны с особенностью работы лазера без обратной связи при малых значениях частоты импульсов ионизации.

#### Влияния натекания воздуха на эмпирическое среднее значение мощности лазерного излучения при оптимальной частоте импульсов ионизации

Проведенный анализ показал, что натекание воздуха в газовый контур явно влияет только на среднее значение мощности  $\bar{W}_s$ , приводя к его снижению. Наиболее равномерное и сильное первоначальное падение мощности происходит при частоте импульсов ионизации 1540 Гц. Средние значения мощности  $\bar{W}_s$  при различных значениях парциального давления воздуха  $p$  для частоты импульсов ионизации 1540 Гц приведены в табл. 2.

Для аналитического представления зависимости  $\bar{W}_s = f(p)$  применим экспоненциальную регрессию вида  $y = a_1 e^{a_2 x} + a_3$ . Для расчета коэффициентов регрессии воспользуемся функцией `expfit` программы компьютерной математики MathCAD 13 [4]. Уравнение экспоненциальной регрессии принимает вид

$$\text{Rg } \bar{W}_s = 414,089e^{-2,954p} + 120,557. \quad (3)$$

Вычисленные параметры экспоненциальной регрессии удовлетворяют принципу наименьших квадратов по  $\bar{W}_s$ : сумма квадратов отклонений эмпирических значений  $\bar{W}_s$  от рассчитанных по уравнению экспоненциальной регрессии  $\text{Rg } \bar{W}_s$  меньше,

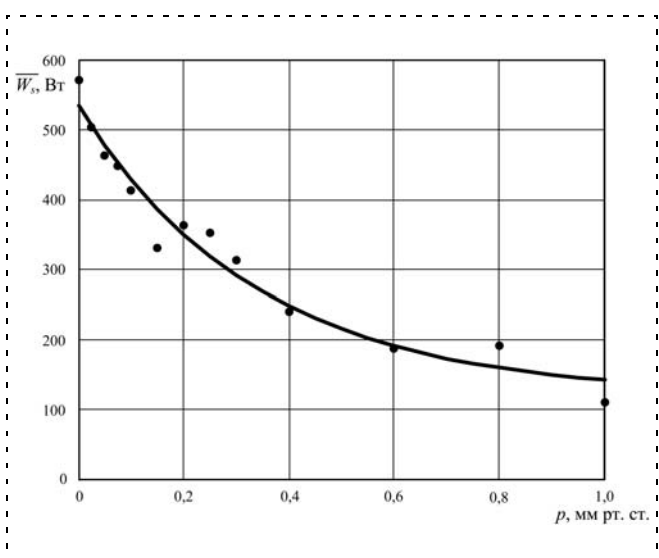


Рис. 7. Зависимость среднего значения мощности  $\bar{W}_s$  от парциального давления воздуха  $p$  при частоте импульсов ионизации 1540 Гц (точки) и кривая экспоненциальной регрессии  $\bar{W}_s$  на  $p$  (3)

чем сумма квадратов их отклонений от любой другой кривой этого вида.

Кривая экспоненциальной регрессии  $\bar{W}_s$  на  $p$  изображена на рис. 7.

Для оценки достоверности аппроксимации вычислим коэффициент корреляции  $r$ , который отражает степень линейной зависимости между двумя множествами данных  $\bar{W}_s$  и  $\text{Rg } \bar{W}_s$ :

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{13} \left( \bar{W}_{s_i} - \frac{1}{13} \sum_{i=1}^{13} \bar{W}_{s_i} \right) (\text{Rg } \bar{W}_{s_i} - \overline{\text{Rg } \bar{W}_s})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{13} \left( \bar{W}_{s_i} - \frac{1}{13} \sum_{i=1}^{13} \bar{W}_{s_i} \right)^2 (\text{Rg } \bar{W}_{s_i} - \overline{\text{Rg } \bar{W}_s})^2}}.$$

Для расчета коэффициента корреляции воспользуемся функцией `corr` программы компьютерной математики MathCAD 13:

$$r = 0,9798, \quad r^2 = 0,96.$$

Таблица 2

Средние значения мощности  $\bar{W}_s$  при различных значениях парциального давления воздуха  $p$  для частоты импульсов ионизации 1540 Гц

| № измерения                              | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    |
|------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Среднее значение мощности, Вт            | 570,6 | 503,7 | 463,0 | 447,7 | 412,3 | 330,0 | 362,7 | 351,9 | 312,6 | 240,3 | 187,7 | 191,9 | 110,8 |
| Парциальное давление воздуха, мм рт. ст. | 0     | 0,025 | 0,05  | 0,075 | 0,1   | 0,15  | 0,2   | 0,25  | 0,3   | 0,4   | 0,6   | 0,8   | 1,0   |



Чем ближе значение  $r^2$  к 1, тем ближе значения регрессии к исходным эмпирическим значениям. Убывание среднего значения мощности  $\bar{W}_s$  с ростом парциального давления воздуха  $p$  довольно точно описывается экспоненциальной регрессией  $Rg \bar{W}_s$ .

Рассчитаем скорость уменьшения среднего значения мощности  $\bar{W}_s$ . Для этого вычислим производную регрессии  $Rg \bar{W}_s$ .

Аналитическое выражение для производной регрессии  $Rg \bar{W}_s$  имеет вид

$$Rg(\bar{W}_s)' = -414,089 \cdot 2,954e^{-2,954p} = -1223,219e^{-2,954p}. \quad (4)$$

Для повышения точности рассчитаем скорость уменьшения среднего значения мощности  $\bar{W}_s$  в численном виде по исходным данным из табл. 2:

$$(\bar{W}_s)'(i) = \frac{\bar{W}_{s_{i+1}} - \bar{W}_{s_i}}{p_{i+1} - p_i},$$

где  $i = 1, \dots, 12$ .

Для аналитического представления полученной зависимости  $(\bar{W}_s)' = f(p)$  применим экспоненциальную регрессию вида  $y = a_1 e^{a_2 x} + a_3$ . Для расчета коэффициентов регрессии воспользуемся функцией `exrfit` программы компьютерной математики MathCAD 13, в результате получим уравнение экспоненциальной регрессии вида

$$Rg[\bar{W}_s^d]' = -3344,3e^{-17,337p} - 350,409. \quad (5)$$

Зависимость скорости изменения среднего значения мощности  $\bar{W}_s'$  от парциального давления воздуха  $p$  показана на рис. 8.

Так как производная от функции, значения которой уменьшаются, есть величина отрицательная, то для наглядности на рис. 8 все значения представлены со знаком минус. Точками показаны результаты численного расчета скорости уменьшения среднего значения мощности  $\bar{W}_s'$ , сплошной линией — кривая экспоненциальной регрессии  $(\bar{W}_s)'$  при  $p = p_{\text{возд}}$  (5), штриховой линией — результат символического вычисления скорости уменьшения среднего значения мощности  $(\bar{W}_s)'$  (4).

Для оценки достоверности аппроксимации вычислим квадрат коэффициента корреляции  $r^2$ .

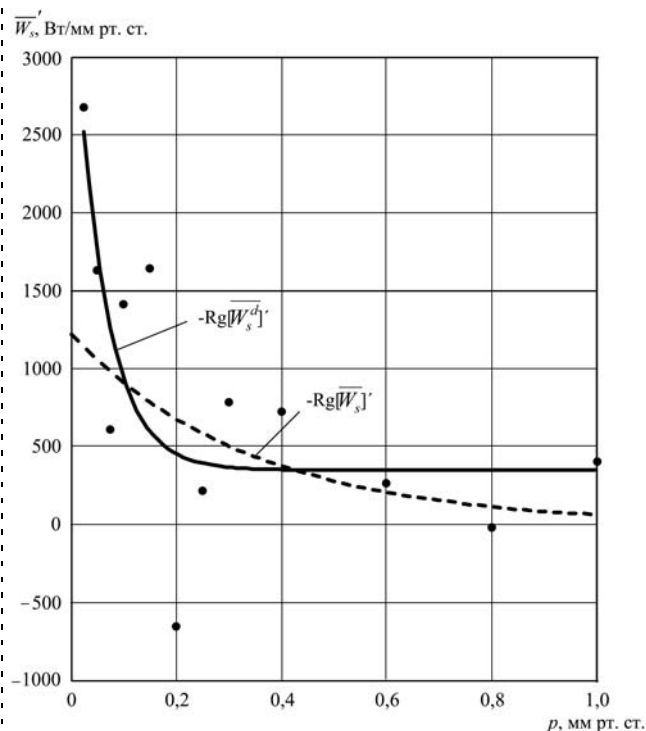


Рис. 8. Зависимость скорости изменения среднего значения мощности  $\bar{W}_s'$  от парциального давления воздуха  $p$  при частоте импульсов ионизации 1540 Гц и (точки) кривые экспоненциальной регрессии  $\bar{W}_s'$  на  $p$  для аналитического (4) и численного (5) расчетов

Для экспоненциальной регрессии, полученной в результате численного расчета,  $Rg[\bar{W}_s^d]'$

$$r = 0,7791, r^2 = 0,6069.$$

Для производной регрессии, полученной аналитически,  $Rg(\bar{W}_s)'$

$$r = 0,6524, r^2 = 0,4256.$$

Таким образом, регрессия  $Rg[\bar{W}_s^d]'$  (5) более точно описывает скорость уменьшения среднего значения мощности, чем производная регрессии  $Rg(\bar{W}_s)'$  (4), полученная аналитически.

Из рис. 8 следует, что самое быстрое уменьшение среднего значения мощности  $\bar{W}_s$  происходит во время начального натекания при парциальном давлении воздуха до 0,1 мм рт. ст. Затем скорость уменьшения среднего значения мощности замедляется и при давлении 0,2 мм рт. ст. выходит на практически постоянный уровень.

## Метод диагностики натекания воздуха в газовый контур ЛТК с НТР

Характерными местами натекания воздуха в газовый контур являются вакуумные манжеты зеркал резонатора, вакуумные уплотнения электродов основного разряда и ионизации, вакуумные уплотнения камер газового контура и штуцеры газового контура. Резкое натекание воздуха порядка 60 мм рт. ст./ч может вызвать трещина в выходном зеркале резонатора. Предельно допустимое значение натекания воздуха в газовый контур составляет 0,05 мм рт. ст./ч.

Существующий метод диагностики натекания воздуха в газовый контур лазерного комплекса описан в работе [5]. Газовый контур ЛТК с НТР тщательно откачивается. Остаточное давление в контуре контролируется по стрелочному указателю давления. После этого лазерный комплекс выключается. По истечении не менее 20 ч комплекс включается и снова определяется давление в контуре. Оно не должно превышать 1 мм рт. ст.

Предлагаемый метод основан на уменьшении среднего значения мощности излучения при натекании воздуха в газовый контур лазера при неизменной частоте импульсов ионизации. Из проведенных исследований следует, что выбирать частоту импульсов ионизации необходимо таким образом, чтобы мощность лазерного излучения при отсутствии натекания воздуха составляла 500...600 Вт. При большей мощности метод оказывается нечувствителен к малому, до давления порядка 0,025 мм рт. ст., натеканию воздуха. При меньшей мощности излучения в случае большого, до давления порядка 1 мм рт. ст., натекания воздуха мощность излучения опускается ниже 200 Вт, что является областью неустойчивой работы лазерного комплекса.

Для диагностики натекания воздуха в газовый контур ЛТК с НТР необходимо на работающем комплексе отключить обратную связь по мощности, установить выбранную частоту импульсов ионизации и измерить среднее значение мощности излучения. Зная это значение, из уравнения (3) можно вычислить парциальное давление воздуха

$$p(\bar{W}_s) = \frac{-\ln\left(\frac{\bar{W}_s - 120,557}{414,089}\right)}{2,954}. \quad (6)$$

Тогда натекание воздуха можно определить как

$$n_{\text{возд}} = \frac{p(\bar{W}_s)}{t_{\text{натек}}},$$

где  $t_{\text{натек}}$  — время натекания воздуха в часах, которое равно времени, прошедшему от завершения последней откачки газового контура до измерения  $\bar{W}_s$ . Если полученное  $n_{\text{возд}} < 0,05$  мм рт. ст./ч, то нате-

кание воздуха находится в пределах нормы, и работа лазерного комплекса может быть продолжена.

В противном случае необходимо выключить комплекс и приступить к поиску места натекания. По значению натекания нельзя точно указать место течи, за исключением случая трещины в выходном зеркале резонатора, когда резкое натекание воздуха может достигать 60 мм рт. ст./ч. Поэтому поиск следует проводить последовательно в характерных местах натекания, перечень которых приведен выше. Поиск ведется с помощью гелиевого течеискателя, который подключается к предварительно откаченному газовому контуру. Снаружи газовый контур последовательно обдувается гелием. В местах натекания гелий проникает внутрь контура, что и регистрируется течеискателем. В выявленных таким образом местах натекания необходимо проверить герметичность сборки и при необходимости заменить вакуумные уплотнения.

Предложенный метод диагностики позволяет проверить и качество проведенного вакуумного уплотнения газового контура. Для этого по уравнению (3) вычислим максимальное значение средней мощности излучения  $\bar{W}_s$  в отсутствии натекания при парциальном давлении воздуха  $p = 0$ :

$$\bar{W}_{s \max} = 414,089e^{-2,954 \cdot 0} + 120,557 = 534,7 \text{ Вт.}$$

По уравнению (6) найдем значения парциального давления воздуха, при которых среднее значение мощности излучения  $\bar{W}_s$  снижается до уровня  $0,95 \bar{W}_{s \max}$ ,  $0,9 \bar{W}_{s \max}$ ,  $0,85 \bar{W}_{s \max}$ ,  $0,8 \bar{W}_{s \max}$ . Вычислим время в минутах, необходимое для такого снижения при предельно допустимой скорости натекания 0,05 мм рт. ст./ч:

$$t_{\text{натек}} = \frac{p(\bar{W}_s)}{0,05} \cdot 60.$$

Результаты расчета представлены в табл. 3.

Из табл. 3 следует, что при предельно допустимой скорости натекания среднее значение мощности излучения  $\bar{W}_s$  уменьшится на 20 % за 2 ч.

Для диагностики качества работ по вакуумному уплотнению газового контура ЛТК с НТР необходимо тщательно откачать газовый контур, провести стандартную процедуру включения лазерного ком-

Таблица 3

Время снижения среднего значения мощности излучения  $\bar{W}_s$  до уровня  $0,95 \bar{W}_{s \max}$ ,  $0,9 \bar{W}_{s \max}$ ,  $0,85 \bar{W}_{s \max}$ ,  $0,8 \bar{W}_{s \max}$

| Мощность $\bar{W}_s$ | $0,95 \bar{W}_{s \max}$ | $0,9 \bar{W}_{s \max}$ | $0,85 \bar{W}_{s \max}$ | $0,8 \bar{W}_{s \max}$ |
|----------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|
| Время, мин           | 27                      | 56                     | 88                      | 121                    |

плекса, отключить обратную связь по мощности, установить выбранную частоту импульсов ионизации и периодически проводить измерения среднего значения мощности излучения  $\overline{W}_s$ . Если в течение двух часов среднее значение мощности уменьшится не более чем на 20 %, то натекание воздуха — ниже предельно допустимого, и лазерный комплекс готов к эксплуатации. В противном случае необходимо снова провести работы по поиску мест натекания и вакуумному уплотнению газового контура. По сравнению с существующим методом диагностики натекания воздуха в газовый контур время диагностики сокращается в 10 раз, а именно, с 20 до 2 ч.

### Заключение

В статье исследовано влияние натекания воздуха в газовый контур на мощность излучения лазерного технологического комплекса с несамостоятельным тлеющим разрядом.

Определено, что натекание воздуха явно влияет только на среднее значение мощности  $\overline{W}_s$ , приводя к ее снижению. Выяснено, что наиболее равномерное и сильное уменьшение мощности происходит при частоте импульсов ионизации, составляю-

щей 1540 Гц во время начального натекания при парциальном давлении воздуха до 0,1 мм рт. ст.

На основании проведенных исследований предложен метод диагностики натекания воздуха в газовый контур ЛТК. По сравнению с существующим методом время диагностики сокращается на порядок.

Предложенный метод расширяет диагностические возможности системы управления лазерным комплексом, позволяя контролировать натекание воздуха в газовый контур лазера.

### Список литературы

1. А. С. 615795 СССР, МКИ<sup>3</sup> HOIS 3/22. Способ получения непрерывного тлеющего разряда / Н. А. Генералов, В. П. Зимаков, В. Д. Косынкин и др. Оpubл. 21.03.1978.
2. Шемякин А. Н., Рачков М. Ю., Соловьев Н. Г. Исследование влияния натекания воздуха в газовый контур на мощность излучения лазерного технологического комплекса. Часть 1 // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 7. С. 46—50.
3. ГОСТ Р ИСО 11554—2008. Методы испытаний лазеров и измерений мощности, энергии и временных характеристик лазерного пучка. М.: Стандартиформ, 2008. 13 с.
4. Дьяконов В. П. MathCAD 11/12/13 в математике. Справ. М.: Горячая линия — Телеком, 2007. 958 с.
5. Лазер газовый технологический комбинированного действия ЛГТ-2.02 УХЛ4.2. Техническое описание и инструкция по эксплуатации ИЕГВ 433713.001 ТО. Л.: ВНИИЭСО, 1988. Ч. 1. 125 с.

УДК 658.52.011.56

Н. Г. Чикуров, канд. техн. наук, доц.,  
tchikurov@yandex.ru,

М. С. Мавлютов, аспирант,  
mavlitbay@yandex.ru,

Уфимский государственный  
авиационный технический университет

## Высокоскоростной сплайновый интерполятор повышенной точности для компьютерных устройств ЧПУ

*Дано решение задачи сплайновой интерполяции для устройств ЧПУ металлорежущими станками и промышленными роботами. Предложен метод решения указанной задачи путем ее сведения к задаче оптимизации и численного интегрирования. Представлены результаты работы интерполятора в режимах высокоскоростной обработки.*

**Ключевые слова:** устройства ЧПУ, сплайновая интерполяция, высокоскоростная обработка

### Постановка задачи

Современные технологии высокоскоростной обработки сложнопрофильных деталей на многокоординатных металлорежущих станках предъявляют

жесткие требования к системам ЧПУ. Нередко на таких станках приходится воспроизводить в реальном масштабе времени сложные кривые с быстрыми изменениями кривизны при высоких контурных скоростях. Управление сложными движениями рабочих органов металлорежущих станков и промышленных роботов с помощью устройств ЧПУ основано на решении обыкновенных дифференциальных уравнений численными методами [2, 3]. Такую вычислительную процедуру в устройствах ЧПУ называют интерполяцией. В процессе интерполяции на станке воспроизводится заданная траектория движения инструмента относительно детали. Выбирая в системе дифференциальных уравнений в качестве независимой переменной путь вдоль дуги  $s$ , можно регулировать скорость движения текущей точки вдоль этой дуги простым изменением шага интегрирования  $\Delta s$ . С увеличением контурной скорости обработки шаг интегрирования  $\Delta s$  увеличивается. Однако при некотором критическом значении шага происходит потеря цифровой устойчивости численного решения системы дифференциальных уравнений [2]. В связи с этим необходимы новые, более устойчивые и точные алгоритмы интерполяции сложных пространственных траекторий. Поскольку в настоящее время контуры

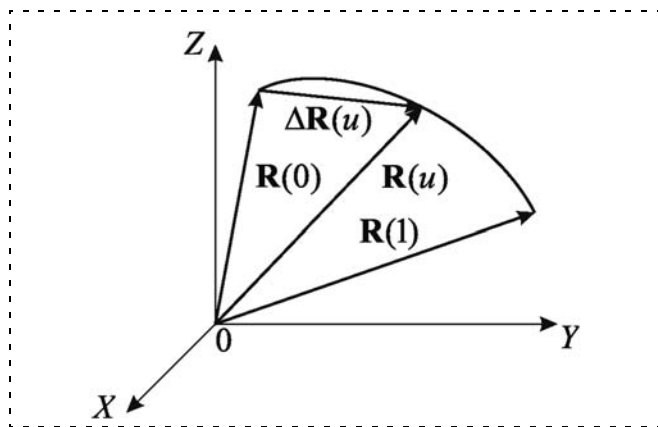


Рис. 1. Сегмент кубического параметрического сплайна

сложнопрофильных деталей чаще всего аппроксимируют с помощью сплайн-функций, то, прежде всего, требуется алгоритм сплайновой интерполяции, свободный от указанного недостатка.

Рассмотрим сегмент кубического параметрического сплайна, который описывается векторным уравнением (рис. 1) [4]:

$$\mathbf{r}(u) = \mathbf{a}u^3 + \mathbf{b}u^2 + \mathbf{c}u + \mathbf{d}, \quad 0 \leq u \leq u_k,$$

где  $\mathbf{a}$ ,  $\mathbf{b}$ ,  $\mathbf{c}$ ,  $\mathbf{d}$  — векторные коэффициенты;  $u$  — скалярный параметр,  $u_k = 1$ .

Запишем это векторное уравнение в координатной форме (в системах ЧПУ коэффициент  $d$  принимается равным нулю):

$$\begin{aligned} x &= a_x u^3 + b_x u^2 + c_x u; \\ y &= a_y u^3 + b_y u^2 + c_y u; \\ z &= a_z u^3 + b_z u^2 + c_z u. \end{aligned} \quad (1)$$

Перед началом сплайновой интерполяции в интерполятор в качестве параметров передаются значения коэффициентов  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$ , длина дуги вдоль контура обработки  $s$  и значения координат в конечной точке. В процессе интерполяции модуль разгона—торможения рассчитывает приращения пути вдоль контура обработки  $\Delta s$ . Требуется определить в каждом цикле интерполяции приращение параметра  $\Delta u$ , которому соответствует заданное приращение пути  $\Delta s$ . С этой целью выведем систему дифференциальных уравнений сплайнового интерполятора, в которых в качестве независимой переменной выступает приращение вдоль дуги сплайна  $s$ .

Продифференцируем уравнения (1):

$$\begin{aligned} \frac{dx}{du} &= 3a_x u^2 + 2b_x u + c_x = V_x; \\ \frac{dy}{du} &= 3a_y u^2 + 2b_y u + c_y = V_y; \\ \frac{dz}{du} &= 3a_z u^2 + 2b_z u + c_z = V_z. \end{aligned} \quad (2)$$

Продифференцируем уравнения (2):

$$\begin{aligned} \frac{dV_x}{du} &= 6a_x u + 2b_x = W_x; \\ \frac{dV_y}{du} &= 6a_y u + 2b_y = W_y; \\ \frac{dV_z}{du} &= 6a_z u + 2b_z = W_z. \end{aligned} \quad (3)$$

Продифференцируем уравнения (3):

$$\begin{aligned} \frac{dW_x}{du} &= 6a_x; \\ \frac{dW_y}{du} &= 6a_y; \\ \frac{dW_z}{du} &= 6a_z. \end{aligned} \quad (4)$$

Запишем дифференциал дуги сплайна:

$$ds = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2} du. \quad (5)$$

Тогда

$$\frac{du}{ds} = \frac{1}{\sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}} = \varphi, \quad (6)$$

откуда получаем

$$du = \varphi ds. \quad (7)$$

Продифференцируем уравнение (6):

$$\frac{d\varphi}{du} = -\varphi^3 (V_x W_x + V_y W_y + V_z W_z). \quad (8)$$

Подставляя выражение  $du$  из соотношения (7) в уравнения (2), (3), (4) и (8), получаем общую систему дифференциальных уравнений сплайнового интерполятора в форме Коши:

$$\begin{aligned} \frac{du}{ds} &= \varphi; \\ \frac{d\varphi}{ds} &= -\varphi^4 (V_x W_x + V_y W_y + V_z W_z); \\ \frac{dx}{ds} &= \varphi V_x; \quad \frac{dV_x}{ds} = \varphi W_x; \quad \frac{dW_x}{ds} = \varphi 6a_x; \\ \frac{dy}{ds} &= \varphi V_y; \quad \frac{dV_y}{ds} = \varphi W_y; \quad \frac{dW_y}{ds} = \varphi 6a_y; \\ \frac{dz}{ds} &= \varphi V_z; \quad \frac{dV_z}{ds} = \varphi W_z; \quad \frac{dW_z}{ds} = \varphi 6a_z. \end{aligned} \quad (9)$$

Значения параметров тестируемых сплайнов (рис. 2)

| Параметры | Сплайн а | Сплайн б | Сплайн в       | Сплайн г       |
|-----------|----------|----------|----------------|----------------|
| $a_x$     | -0,0002  | -0,00027 | -0,0011203704  | -0,0007314815  |
| $a_y$     | -0,00029 | -0,00007 | -0,0001944444  | 0,0001944444   |
| $a_z$     | 0        | 0        | -0,0006574074  | -0,0006574074  |
| $b_x$     | 0,03     | 0,044    | 0,1066666667   | 0,06           |
| $b_y$     | 0,038    | 0,007    | 0,0116666667   | -0,0116666667  |
| $b_z$     | 0        | 0        | 0,0533333333   | 0,065          |
| $c_x$     | 0        | -0,7     | -0,7           | 0,7            |
| $c_y$     | 0,1      | 0        | 0              | 0              |
| $c_z$     | 0        | 0        | 0              | -0,7           |
| $s$       | 151,6261 | 111,2568 | 119,2571541962 | 117,1682393591 |

Исходя из требований точности для численного решения уравнений (9) более подходят методы типа Рунге—Кутты. Назовем такой метод сплайновой интерполяции дифференциальным методом.

В результате машинного эксперимента выяснилось, что погрешность метода Рунге—Кутты 4-го порядка при интегрировании параметрических кубических сплайнов с малоизменяющейся кривизной имеет приемлемые значения. Однако если кривизна траектории на каком-либо участке изменяется резко, то погрешность решения увеличивается многократно, причем, если контурная скорость подачи возрастает до 1,5...3 м/мин, то решение часто становится неустойчивым.

Можно значительно повысить точность сплайнового интерполятора, если представить дифференциальные уравнения (9) в форме Шеннона и применить для их численного решения степенной метод [2, 3]. Однако и в этом случае проблема цифровой неустойчивости решения при больших контурных скоростях подачи полностью не решается.

Значения параметров тестируемых сплайнов представлены в табл. 1, а графики этих сплайнов показаны на рис. 2.

Приведенные сплайны могут быть воспроизведены рассмотренным выше интерполятором лишь при сравнительно низких скоростях подач. В связи с этим возникает задача создания высокоскоростного сплайнового интерполятора, способного управлять следящими электроприводами металлорезающих станков и промышленных роботов на скоростях подачи 80...100 м/мин при погрешности вычислений координат, не превышающей 1 мкм.

### Решение задачи

Обозначим  $\Delta u = u_c - u_0$ , где  $u_c$  — значение параметра  $u$  в конце текущего шага интегрирования, а  $u_0$  — в начале шага. Тогда приращения координат на выходе сплайнового интерполятора составят

$$\begin{aligned}\Delta x &= x(u_c) - x(u_0); \\ \Delta y &= y(u_c) - y(u_0); \\ \Delta z &= z(u_c) - z(u_0).\end{aligned}\quad (10)$$

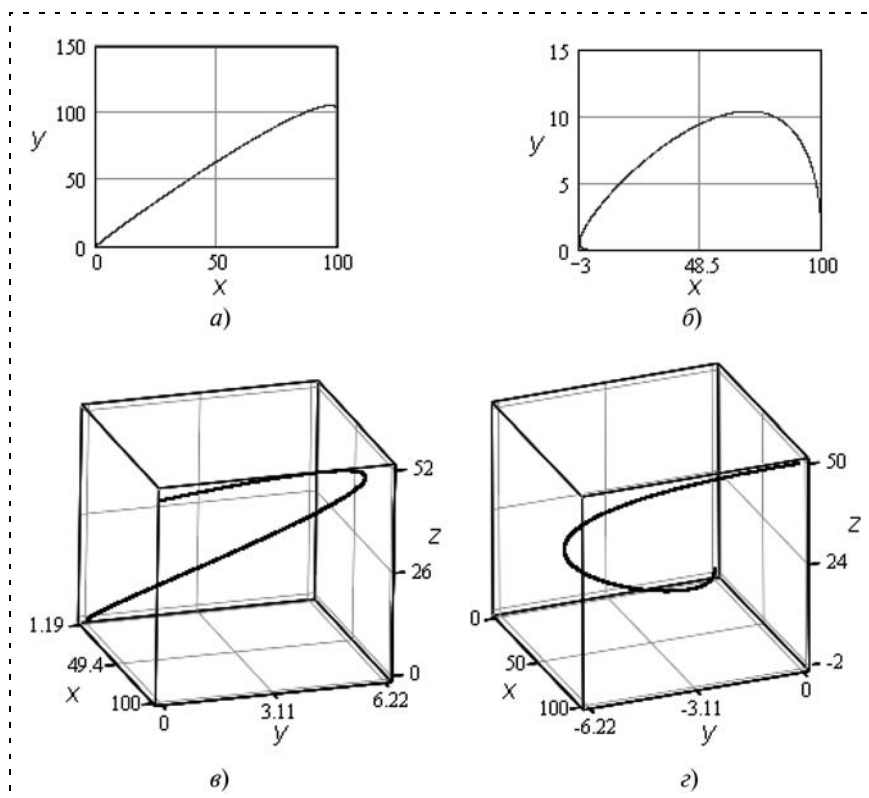


Рис. 2. Графики тестируемых сплайнов

Таким образом, задача сводится к отысканию такого значения  $u_c$ , при котором приращения координат, вычисленные по формулам (10), обеспечат приращение дуги  $s$  на заданную величину  $\Delta s$ .

Проинтегрируем уравнение (5):

$$\Delta s = \int_{u_0}^{u_c} \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2} du,$$

тогда

$$\int_{u_0}^{u_c} \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2} du - \Delta s = 0. \quad (11)$$

Данное равенство выполняется при точном значении параметра  $u_c$ . Чтобы найти этот параметр, зададимся его начальным значением и будем вычислять значение интеграла в уравнении (11) каким-либо численным методом. В случае, если значение  $u_c$  окажется меньше точного, разность в левой части равенства (11) будет меньше нуля. Это следует из положительности подынтегральной функции  $\sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$ . Аналогично, если значение  $u_c$  окажется больше точного, то величина указанной разности будет больше нуля. Отсюда следует, что задачу отыскания параметра  $u_c$  можно свести к задаче оптимизации (минимизации) модуля величины

$$f(u_c) = \int_{u_0}^{u_c} \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2} du - \Delta s \rightarrow 0. \quad (12)$$

Для решения данной задачи можно применить любой метод поиска нуля функции  $f(u_c)$ , который обеспечит необходимую точность в сочетании с заданной скоростью работы (последнее условие диктуется исходя из характера самой системы ЧПУ, работающей в режиме жесткого реального времени). Метод деления отрезка пополам в данном случае не приемлем ввиду того, что допустимая погрешность решения на несколько порядков меньше исходного интервала поиска и для отыскания нуля потребуется большое число шагов. Поэтому для решения задачи используем метод Ньютона, который обеспечивает более высокую скорость сходимости решения.

Итерационный процесс Ньютона определяется известной формулой [1]

$$u_c^{n+1} = u_c^n - \frac{f(u_c^n)}{f'(u_c^n)}, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (13)$$

Геометрически этот процесс означает замену на каждой итерации графика  $g = f(u_c)$  касательной к нему. Задается начальное приближение  $u_c^0$ . Далее проводится касательная к кривой  $g = f(u_c)$  в точке  $u_c^0$ , т. е. кривая заменяется прямой линией. В качестве следующего приближения выбирается точка пересечения этой касательной с осью абсцисс. Итерационный процесс повторяется до тех пор, пока приращение не станет меньше наперед заданной величины  $\varepsilon$ .

Принимая во внимание, что приращение вдоль дуги задано модулем разгона—торможения, т. е.  $\Delta s = \text{const}$ , найдем производную функции (12):

$$\left( \int_{u_0}^{u_c} \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2} du - \Delta s \right)' = \left( \int_{u_0}^{u_c} \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2} du \right)' = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2} = V.$$

Подставив полученное выражение производной в уравнение (13), получаем итерационную формулу вычисления параметра  $u_c$  на каждом шаге сплайновой интерполяции:

$$u_c \leftarrow u_c - \frac{\int_{u_0}^{u_c} \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2} du - \Delta s}{V(u_c)}. \quad (14)$$

Чтобы вычислить входящий в формулу интеграл, можно использовать любой численный метод, например, метод Симпсона, метод Ромберга и др., обеспечивающий необходимую точность и производительность вычислений. Назовем рассмотренный метод сплайновой интерполяции интегральным методом.

Одно из условий применимости метода Ньютона заключается в том, что требуется задать некоторое первое приближение к искомому значению [1]. В случае, если такое приближение окажется слишком далеким, решение может разойтись. Для нахождения первичного значения  $u_c^0$  можно численно

проинтегрировать функцию  $V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$  с шагом, достаточно малым для того, чтобы первичное приближение, полученное в результате интегрирования, удовлетворяло условиям сходимости итерационного процесса. Конкретное значение шага может быть определено на основе опытных данных о характеристиках вычисляемых сплайнов. Интегрирование начинается со значения  $u_0$  и продолжается до тех пор, пока разность в левой части выражения (11) не изменит знак с отрицательного на положительный.

Можно сразу найти первичное приближение  $u_c^0$  исходя из линейной аппроксимации:

$$u_c^0 = u_0 + u_k \frac{\Delta s}{s}, \quad (15)$$

где  $s$  — длина дуги всего сплайна;  $u_k$  — конечное значение параметра  $u$ . Данный подход позволяет избавиться от процедуры предварительного интегрирования, но его применимость должна быть проверена в отношении видов интерполируемых сплайнов.

Сравнение результатов работы интерполяторов для сплайнов, приведенных на рис. 2

| Контурная скорость, м/мин | Метод интерполяции               | Накопленная ошибка в конечной точке сплайна, мкм |                       |                      |                       |
|---------------------------|----------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|
|                           |                                  | Сплайн <i>a</i>                                  | Сплайн <i>b</i>       | Сплайн <i>в</i>      | Сплайн <i>г</i>       |
| 0,75                      | Дифференциальный<br>Интегральный | 837<br>0,022                                     | 3,1<br>0,06           | 0,2<br>0,02          | 0,0002<br>0,001       |
| 1,5                       | Дифференциальный<br>Интегральный | Реш. неуст.<br>0,012                             | 755<br>0,01           | 6,3<br>0,0025        | 0,003<br>0,0044       |
| 3,0                       | Дифференциальный<br>Интегральный | Реш. неуст.<br>0,012                             | Реш. неуст.<br>0,003  | 31<br>0,014          | 0,05<br>0,0028        |
| 6,0                       | Дифференциальный<br>Интегральный | Реш. неуст.<br>0,024                             | Реш. неуст.<br>0,0047 | 2922<br>0,015        | 1<br>0,006            |
| 60                        | Дифференциальный<br>Интегральный | Реш. неуст.<br>0,006                             | Реш. неуст.<br>0,005  | Реш. неуст.<br>0,005 | Реш. неуст.<br>0,0009 |
| 100                       | Дифференциальный<br>Интегральный | Реш. неуст.<br>0,015                             | Реш. неуст.<br>0,004  | Реш. неуст.<br>0,011 | Реш. неуст.<br>0,0002 |

Значение параметра  $u_k$  можно принять равным длине дуги сплайна  $u_k = s$ . В результате мы получим нормализованный сплайн. Параметр  $u$  в конечной точке нормализованного сплайна равен значению длины дуги сплайна  $s$ . Тогда формула (15) упрощается и принимает следующий вид:

$$u_c^0 = u_0 + \Delta s. \quad (16)$$

### Результаты испытаний

В табл. 2 приведено сравнение результатов интерполяции сплайнов дифференциальным и интегральным методами. Параметры тестируемых сплайнов приведены в табл. 1. Дифференциальные уравнения (9) решали методом Рунге—Кутты. Значения интеграла в формуле (14) вычисляли методом Симпсона.

Для всех сплайн-функций первичные приближения параметра  $u_c^0$  вычисляли по формуле (15). Максимальная погрешность интерполяции не превышала 0,06 мкм. Максимальное время одного шага интерполяции не превышает 0,05 мс, что вполне приемлемо для систем ЧПУ, работающих при цикле таймера 10 мс. Контурная скорость движения по дуге сплайна при подаче 60 мм/мин поддерживается с точностью около 0,01 %.

Ошибка интерполяции определяется погрешностью вычисления интеграла в формуле (14) и значением константы  $\epsilon$ , которая ограничивает число итераций при поиске нуля функции. Погрешность интерполятора можно еще уменьшить за счет некоего увеличения времени шага интерполяции.

Разработанный алгоритм сплайнового интерполятора позволяет воспроизводить на станках с ЧПУ траектории обработки сложнопрофильных деталей с высокой точностью при контурных скоростях вплоть до 100 м/мин. Такие режимы используются на металлорежущих станках, предназначенных для высокоскоростной обработки. Рассмотренный сплайновый интерполятор также полезен для использования в системах управления точными быстродействующими роботами.

### Список литературы

1. Бахвалов Н. С., Жидков Н. П., Кобельков Г. М. Численные методы, М.: Бином. Лаборатория знаний, 2004. 640 с.
2. Чикуров Н. Г. Интерполяция сложных траекторий в компьютерных устройствах ЧПУ класса ICNC // Станки и инструмент. 2010. № 11. С. 4—7.
3. Чикуров Н. Г. Интерполяция сложных траекторий в компьютерных устройствах ЧПУ класса ICNC // Станки и инструмент. 2010. № 12. С. 2—5.
4. Фокс А., Пратт М. Вычислительная геометрия. Применение в проектировании и на производстве: Пер. с англ. М.: Мир, 1982. 304 с.

**М. М. Аршанский**, д-р техн. наук, проф.,

**Р. С. Ганюшин**, канд. техн. наук, доц.,

**А. В. Зазвонных**, аспирант,

kor3nha@bk.ru,

Московский государственный университет  
приборостроения и информатики

## Адаптация технологических возможностей ЧПУ к условиям обработки на основе интегрированной клиент-серверной системы

*Предложена новая инновационная идея адаптации технологических возможностей систем числового программного управления к условиям обработки и программный продукт для реализации этой идеи в интегрированной клиент-серверной системе.*

**Ключевые слова:** системы числового программного управления, интеграция, система клиент-сервер

Современное машиностроение сталкивается с проблемой обработки все более сложных по конфигурации и точности деталей. Для реализации этих задач требуются системы числового программного управления (СЧПУ), обладающие большим набором необходимых функций, что значительно удорожает их стоимость и стоимость внедрения этих функций. Особенно остро эта проблема проявляется в свете

предъявляемых к эффективности производства требований, основными из которых являются (рис. 1):

- сокращение трудоемкости;
- снижение периодов между модернизацией или заменой станочного оборудования;
- уменьшение периодов простоя, связанных с внедрением новых технологических операций и устранения брака при отладке управляющих программ.

Однако не все требования могут быть реализованы с помощью СЧПУ, автономно установленных на используемых в производстве станках, а требуют интеграции с системами автоматизированного проектирования и системами подготовки технологического процесса производства изделий, т. е. с CAD-CAM-системами предприятия. Все это сказывается на себестоимости обработки деталей и требует новой инновационной идеи, содержащей креативный смысл (далее будем использовать термин "концепт"), позволяющей разорвать замкнутый круг, приводящий к увеличению стоимости обработки.

Одним из способов решения проблемы расширения технологических возможностей при возрастающей сложности изготавливаемых деталей является использование СЧПУ, воспринимающей стандарт STEP-NC [6]. Такая СЧПУ является полномасштабным вариантом STEP-NC-CNC и, реализуя цепочку CAD-CAM-CNC, выполненную на основе модели ISO 14649, обеспечивает полную автоматизацию цикла от наладки до измерения. Управляющие программы ISO 14649 содержат самые разнообразные данные. Используя их, СЧПУ способна гене-

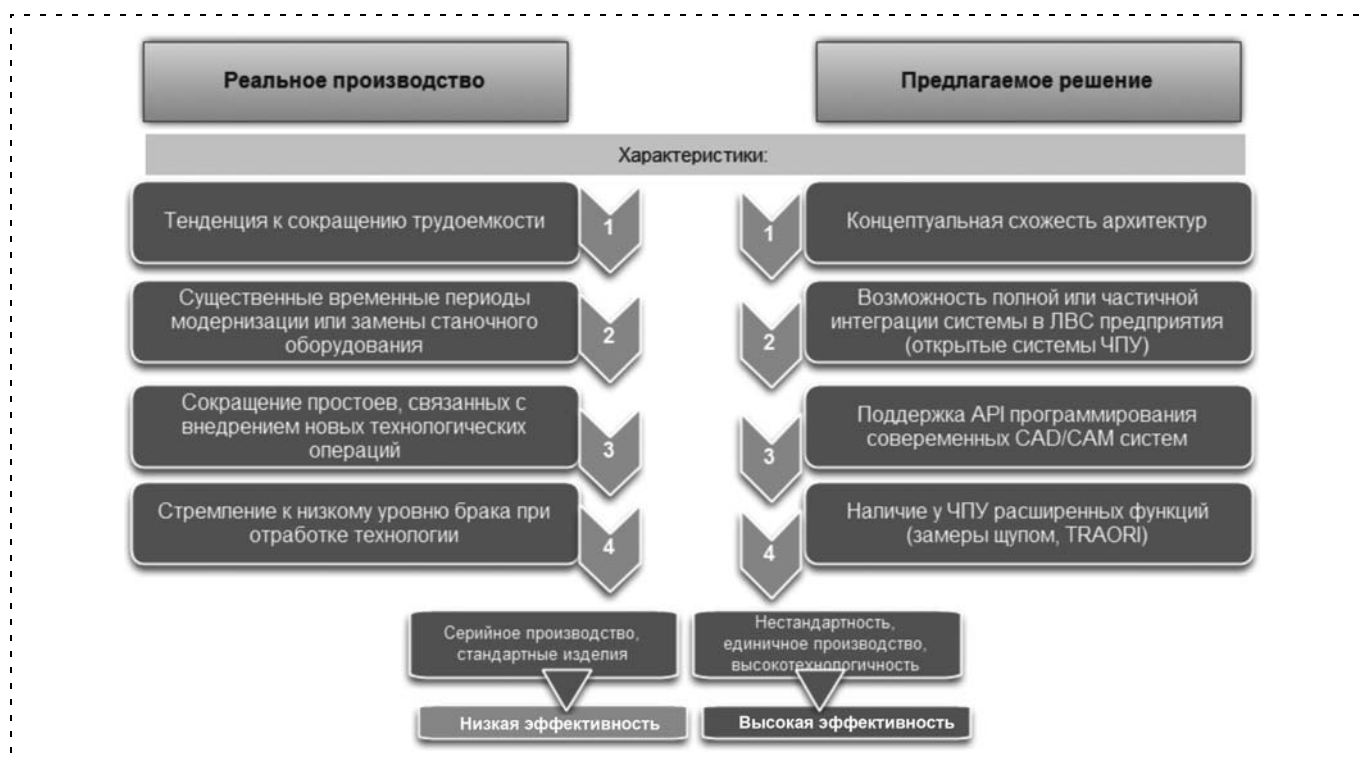


Рис. 1. Сопоставление характеристик реального производства возможностям предлагаемого решения



рировать траектории инструмента соответственно текущей цеховой ситуации, а также самостоятельно составлять планы операции и адекватно реагировать на непредвиденные события. Однако основным недостатком STEP-NC-CNC в условиях современного производства является очень большая стоимость внедрения, что заметно осложняет использование этой системы.

В данной статье для снижения себестоимости обработки предлагается концепт, базирующийся на представлении о том, что СЧПУ, имеющие возможность взаимодействовать с клиент-серверной системой и системами подготовки технологического процесса производства изделий, т. е. интегрированные в CAD-CAM-системы, обладая минимально необходимым набором компонентов (функций), дополнительные компоненты, требующиеся для решения конкретной технологической задачи, могут получить из предложенной клиент-серверной системы.

В основе предлагаемого решения лежит предположение о том, что любая система управления, являющаяся объектом расширения, содержит основные функции управления движением и дополнительные, с помощью которых можно сформировать более сложные контурные перемещения.

Например, одной из основных (имеющихся у всех СЧПУ) функций управления движением является линейная интерполяция G01, а при наличии также основной функции look-ahead (G652) функция круговой интерполяции (G2, G3) и команда на перемещение холостого хода G0 становятся не основными, так как могут быть реализованы посредством линейной интерполяции. Соответственно, все другие виды интерполяции (спиральная, сплайн, 3D-интерполяция) в этом случае становятся не основными. Некоторые функции априори не являются основными, например такие, как вывод интерактивного диалогового окна (реализуемый в системе Sinumerik HMI-Advanced). Если СЧПУ не имеет функции look-ahead, то она в зависимости от сущности расширения либо вообще не может являться объектом функционального расширения, либо может быть расширяемой лишь с определенными ограничениями.



Рис. 2. Классификация функций ЧПУ как базовых и вспомогательных

В соответствии с изложенным был проведен анализ функций СЧПУ и их разделение на основные (базовые) и не основные (специальные). При таком подходе каждая СЧПУ приобретает определенное описание (рис. 2). В описании содержится обозначение команды СЧПУ, ее внутренний идентификатор, используемый для связи с различными реализациями этой функции для разных СЧПУ. Реализация команды может иметь вид параметризованного CLSF-кода (независящего от оборудования формата траектории движения инструмента станка), который обрабатывается и добавляется вместо команды, или же в виде dll-библиотеки (как, например, в СЧПУ Power Automation).

Решение задачи в соответствии с представленным концептом осуществляется на основе системы, показанной на рис. 3 (см. вторую сторону обложки), в следующей последовательности. Сначала происходит заполнение базы данных функционала базовыми и специальными функциями. Затем описание и реализация функций попадает к менеджеру расширений, который определяет необходимость применения стандартных или расширенных функций для данной операции на основе предоставленной ему информации о типе СЧПУ. Все запросы и действия системы выполняются через сервер процессов, координирующий работу сервис-процессов (CLSFParser, CLSFFormatter, CLSFProcessor), занимающихся синтаксическим разбором CLSF-кода, формированием траектории инструмента в форме, понятной СЧПУ. Поддержка API-программирования (программного инструмента, позволяющего другим программным продуктам использовать функции и содержание данной программы) современных CAD/CAM-систем обеспечивается сервис-процессом CAD/CAM connector, реализующим высокоуровневый интерфейс с системой подготовки производства. Отдельным сервисом является терминал, реализуемый как аппаратно (SatteliteCNC — дополнительный СЧПУ терминал), так и программно (интерфейсные формы СЧПУ).

Для реализации данной идеи авторами был разработан аппаратный терминал (SatteliteCNC) на основе персонального компьютера, имеющего связь с ЧПУ по одному каналу, а по другому — связь с сервером процессов, что предоставляет дополнительные возможности по наладке и корректировке технологического процесса (рис. 4). Взаимодействие с технологическим процессом реализуется с помощью графического интерфейса (менеджера публикаций) (рис. 5), который предоставляет информацию о программах технологической обработки, сами программы с возможностью регенерации и корректировки инструмента, информацию об инструменте, базировании детали, технологическом процессе, внешнем виде станка и детали, заготовок и приспособлений.



Рис. 4. Общий вид HMI СЧПУ вместе с SatteliteCNC

Последовательность запросов при вызове регенерации программы изображена на рис. 6. Запрос на регенерацию программы технологической обработки попадает на сервер процессов из менеджера публикаций или из терминала в зависимости от способа реализации. Затем запрос обрабатывается и поступает на один из интерфейсов CAD/CAM-системы для получения CLSF-кода запрошенной операции. Далее CLSF-код передается на сервис-процесс CLSFParser для лексического разбора кода, который в уже универсальном формате попадает на сервис-процесс CLSFProcessor. На данном этапе принимается решение об используемом типе CLSF-процессора в зависимости от типа станка и его кинематической настройки. Обработанный и преобразованный во внутреннее представление СЧПУ код возвращается на сервер и передается термина-

лу, который принимает решение о его дальнейшей передаче СЧПУ.

Информация, передаваемая от сервера на терминал, не ограничивается только программами технологической обработки. Вся информация инкапсулируется в специальный пакет управляющей системы (ПУС), содержащий всю необходимую информацию и средства для сопровождения технологического процесса. Работа и выполнение ПУС осуществляется через HMI2 — программное ядро терминала. Задачи, решаемые с помощью HMI2:

- доставка управляющей системы (УС) со стороны сервера;
  - доставка УС на стойку СЧПУ HMI1;
  - транзит УС на стойку с сервера;
  - визуализация технологической информации;
  - управление вспомогательными технологическими операциями;
  - контроль и мониторинг технологического процесса;
  - программно-аппаратный экран между ЛВС и СЧПУ.
- ПУС — это структурированный пакет данных, включающий в себя:
- технологические программы обработки в понятном для СЧПУ станка коде и с учетом кинематики станка;
  - подпрограммы и циклы;
  - описание пользовательских диалоговых интерфейсов;
  - определения;
  - системные настройки;
  - PLC-модуль.
- Структура HMI2 представлена на рис. 7. Технологическая информация и 3D-модель детали или заготовки поступают в модуль визуализации текстовой или графической информации для отобра-

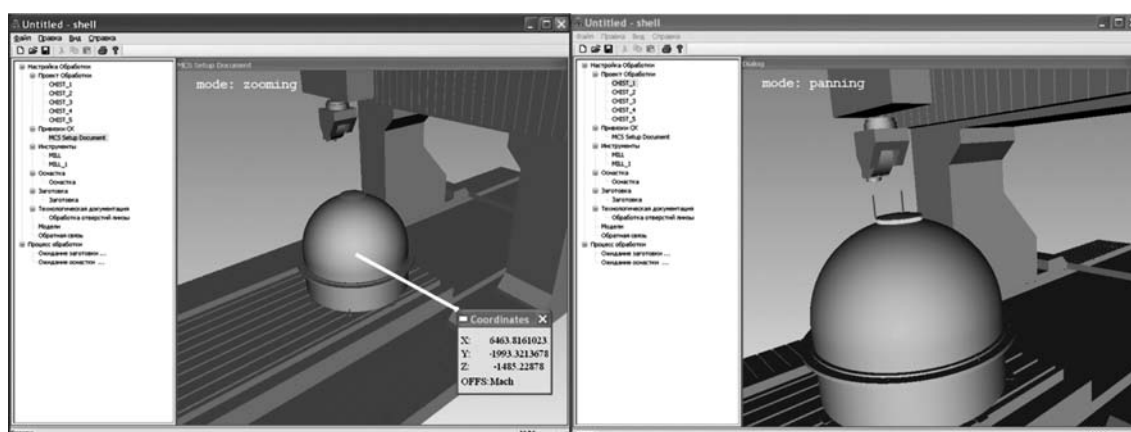


Рис. 5. Менеджер публикаций (слева — базирование детали, справа — генерация программ обработки)

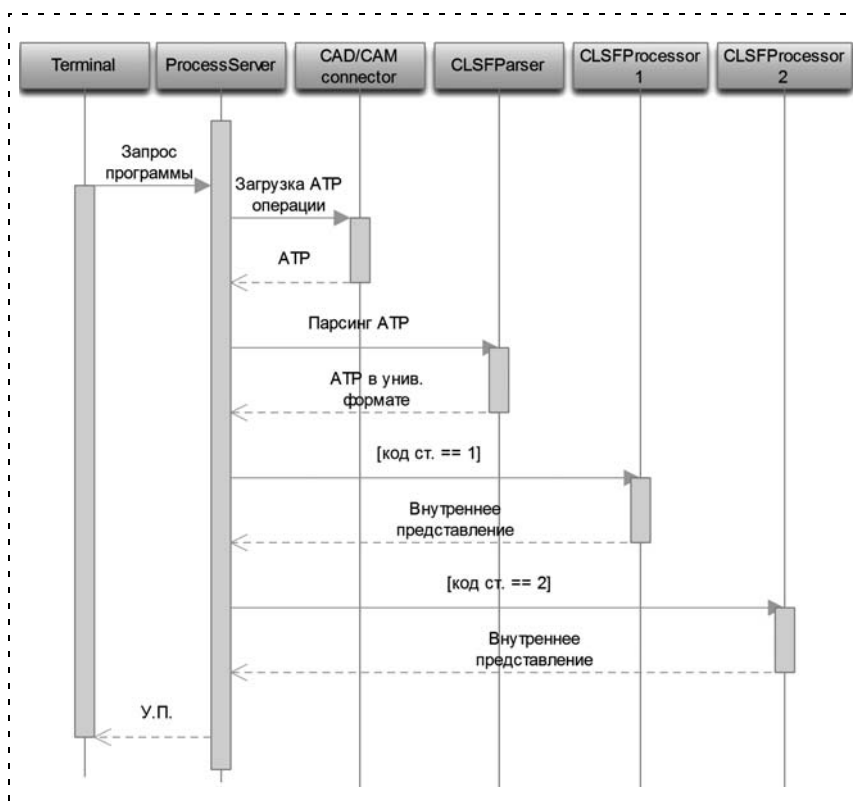


Рис. 6. Диаграмма последовательности запроса программы

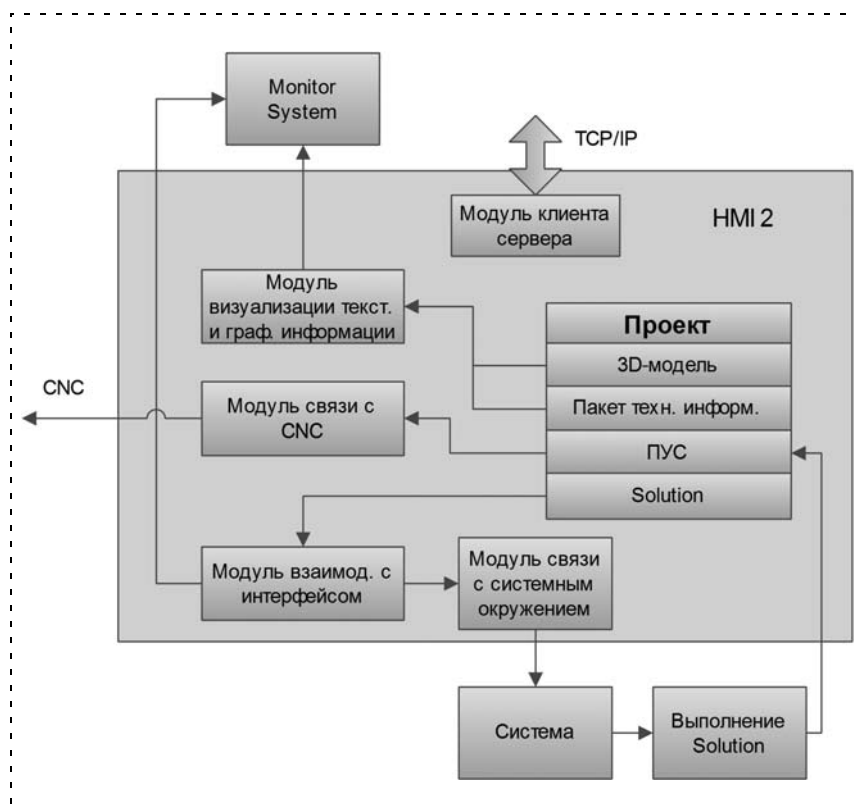


Рис. 7. Структура ПУС (пакета управляющей системы) и его инфраструктуры

жения на экране терминала по запросу оператора. ПУС через модуль взаимодействия с СЧПУ поступает в саму стойку. Все интерфейсное взаимодействие происходит через MonitorSystem. Специфические интерактивные возможности СЧПУ реализуются через механизм системного окружения и набора модулей Solution. Системное окружение при этом является платформонезависимой средой хранения промежуточных результатов. Solution представляет собой небольшой сервис, обладающий доступом к определенным клиентским функциям, необходимым для выполнения вспомогательных действий, взаимодействующих с другими Solution с помощью системного окружения.

Предложенная клиент-серверная система со стойкой SatteliteCNC используется на Савеловском машиностроительном заводе для обработки крупногабаритных (до 8 м) высокоточных деталей класса "лонжерон".

Сейчас ведутся работы по согласованию клиент-серверной системы с другими информационными технологиями, такими как OPC Foundation, и предполагается ее дальнейшее развитие в сторону STEP-NC.

#### Список литературы

1. Сосонкин В. Л., Мартинов Г. М. Программирование систем числового программного управления: учеб. пособ. М.: Логос; Университетская Книга, 2008. 344 с.
2. Сосонкин В. Л., Мартинов Г. М. Системы числового программного управления: учеб. пособ. М.: Логос, 2005. 296 с.
3. Аршанский М. М., Ганюшин Р. С. Мехатроника — новый взгляд // Вестник московской государственной академии приборостроения и информатики. 2005. № 2. 8 с.
4. OPC Foundation. URL: <http://www.opc-foundation.org/>
5. STEP-NC. URL: <http://www.step-nc.org/index.htm>
6. Сосонкин В. Л., Мартинов Г. М. Новейшие тенденции в архитектуре и математическом обеспечении систем ЧПУ. М.: Изд. МГТУ "СТАНКИН". URL: [http://www.ncsystems.ru/user/downloads/ppt/KTI2005\\_report.pdf](http://www.ncsystems.ru/user/downloads/ppt/KTI2005_report.pdf)
7. Козак Н. В. Повышение эффективности разработки систем управления промышленной электроавтоматикой на основе интеграции внешних программных компонентов... Дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук. Москва, 2008.



## Управление и информатика в авиакосмических и морских системах

№ 12 (129)  
ДЕКАБРЬ  
2011

**Главный редактор:**

ЛЕБЕДЕВ Г. Н.

**Редакционная коллегия:**

АЛЕКСЕЕВ В. В.  
БЕЛОКОНОВ И. В.  
БУКОВ В. Н.  
ВАСИЛЬЕВ В. И.  
ГОДУНОВ В. А.  
ГУРЕВИЧ О. С.  
ГУРСКИЙ Б. Г.  
ЕФИМОВ В. В.  
ЗАЙЦЕВ А. В.  
КРЫЖАНОВСКИЙ Г. А.  
НЕСТЕРОВ В. А.  
ОХТИЛЕВ М. Ю.  
ПАНКРАТОВ В. М.  
РАСПОПОВ В. Я.  
САБО Ю. И.  
СТЕПАНОВ О. А.  
СОЛДАТКИН В. М.  
ТЕРЯЕВ Е. Д.  
ФИЛИМОНОВ Н. Б.  
ШИРЯЕВ В. И.  
ШКОЛИН В. П.

**Редакция:**

БЕЗМЕНОВА М. Ю.  
ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.  
ЧУГУНОВА А. В.

## СОДЕРЖАНИЕ

**Пономаренко А. В., Василец В. М.,  
Кулабухов В. С., Халтобин В. М.**

Автоматизированные системы обучения для летного и инженерно-технического составов самолетов-истребителей пятого поколения . . . . . 61

**А. В. Пономаренко,**

д-р техн. наук, нач. отделения,

**В. М. Василец,**

д-р техн. наук, проф., гл. специалист,

rskmig@rambler.ru,

ОАО "РСК "МиГ", г. Москва,

**В. С. Кулабухов,**

канд. техн. наук, гл. конструктор,

ОАО МНПК "Авионика", г. Москва,

**В. М. Халтобин,**

канд. техн. наук, доц.,

ВВА им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина,  
г. Москва

## Автоматизированные системы обучения для летного и инженерно-технического составов самолетов-истребителей пятого поколения

*Рассмотрены состав, характеристики и инструментальное обеспечение систем обучения, разработанных в США. Исходя из анализа этих разработок и созданной в РСК "МиГ" интерактивной системы обучения для самолетов серии "МиГ-29" сформулированы общие концептуальные требования к АСО самолетов пятого поколения.*

**Ключевые слова:** автоматизированные системы обучения (АСО), встроенные средства обучения, учебные компьютерные классы, обучающее программное обеспечение, процедурный тренажер, концептуальные требования к АСО

Разработка концептуальных и методических основ построения и использования автоматизированных систем обучения (АСО) летного и инженерно-технического составов (ИТС) самолетов-истребителей пятого поколения (АСО — С5П) проводится в РСК "МиГ" и ВУНЦ ВВС. В РСК "МиГ" для самолетов серии "4+" разработана интерактивная автоматизированная система обучения — ИАСО-29. Эта система обучения неоднократно демонстрировалась на авиакосмических салонах, например, Ле Бурже (Франция) и МАКС (Россия), где вызвала большой интерес и внимание. В настоящее время актуальной является задача формирования принципов построения и использования автоматизированных систем обучения для самолетов-истребителей пятого поколения с учетом особенностей строения и применения самолетов пятого поколения и на основе современных достижений в области электронного автоматизированного обучения [1, 2].

## Система обучения летного и технического состава по программе JSF (США)

ЭВМ и сети — это основные элементы системы обучения летного и технического составов в США по программе JSF [3]. Проект создания системы обучения поддерживается в открытом виде, что позволяет учитывать современные достижения в быстро-развивающихся технологиях электронного обучения. На проектирование и изготовление всей системы обучения по программе JSF в целом отведено от 24 до 36 месяцев.

Особенности системы обучения летного и технического составов по программе JSF:

1. Предусматривается 80 % общности в программах обучения для различных видов вооруженных сил (ВС), но с сохранением специфических элементов для различных заказчиков. В учебные курсы программы системы обучения входят темы по общим основным системам и элементам самолетов, предусмотренные для всех видов ВС. Создание совершенно разных систем обучения для различных заказчиков обошлось бы в несколько раз дороже.

2. На самолетах F-35 предусматриваются встроенные средства обучения для специалистов по техническому обслуживанию, что является *принципиально новым* моментом в использовании автоматизированных систем обучения (АСО). В боевых эскадрильях будет обеспечиваться возможность предварительного просмотра решаемой задачи в целом или отдельной ее части, что имеет сходство с имитацией полета для летчиков и может включать элементы виртуальной реальности. Это дает возможность обучаемому выполнить пробную процедуру ремонта прежде, чем он начнет работать на самолете. Встроенные средства обучения предназначены для помощи специалистам по техническому обслуживанию, работающим на аэродромах в трудных условиях, с предоставлением им информации о непредвиденных проблемах и обновленных знаниях.

3. Подсистема технического обслуживания работает с прогнозированием состояния самолета и его оборудования и при необходимости сообщает наземным экипажам о том, что следует заменить до того, как что-то выйдет из строя. Обучаемые ориентированы на получение указаний в отношении различных средств поддержки технического состояния самолета F-35. Такой подход вызывает беспокойство у ведущих специалистов по техническому обслуживанию, так как это может привести к постепенной утрате навыков ремонта у технического персонала. Но руководство по системам обучения Министерства обороны США считает, что ставится цель не подавления способностей и инициативы специалистов по техническому обслуживанию, а поиска профессионалов с более широким диапазоном навыков.

Развитие системы обучения для самолета F-35

| № варианта | Вариант системы обучения                                                   | Уровень разработки самолета                                                              |
|------------|----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1          | Базовый уровень системы обучения.<br>Изучение боевых возможностей самолета | Реализация основных боевых возможностей самолета F-35                                    |
| 2          | Модернизация и доработка системы обучения                                  | Поставки самолетов F-35 с новым оружием и системой подавления средств ПВО                |
| 3          | Окончательная модернизация систем обучения                                 | Реализация всех задач самолета F-35 с учетом использования боевых дополнительных средств |

4. Система обучения как для летчиков, так и для специалистов по техническому обслуживанию самолета F-35, основана на применении ЭВМ и обеспечивает подготовку летного состава и ИТС и осуществляет контроль за уровнем обучения летного состава и ИТС.

Если у обучаемого обнаруживается дефицит знаний и навыков в какой-либо области, то ему будут назначаться дополнительные задания в процессе обучения. При поступлении на курсы обучаемому выдается ноутбук, через который он получает доступ к системе обучения в сети Интернет и может заниматься самостоятельно. В процессе разработки и освоения самолета планируется развитие и системы обучения для различных вариантов самолета F-35. В табл. 1 представлены варианты системы обучения и уровни разработки самолета.

Развертывание учебного оборудования фирмой "Lockhed Martin" ("Локхид Мартин") разделено на этапы в соответствии со сроками поставки самолетов. Фирма "Локхид Мартин" планирует организовать *центр поддержки заказчиков*, когда начнется эксплуатация самолета F-35. Система будет отслеживать состояние отдельных самолетов, чтобы иметь возможность сообщать специалистам по техническому обслуживанию, чего им следует ожидать до того, как они приступят к работе. Кроме того, если при управлении самолетом возникнут повторяющиеся время от времени проблемы, система поможет выявить их и помочь усовершенствовать программу обучения.

В фирме "Локхид Мартин" предполагают, что хотя многие проблемы в обучении летного и технического состава самолета F-35 решены, наибольшие трудности еще впереди, так как они возникают именно в процессе обучения летного и технического составов, эксплуатации и боевого применения самолета.

#### **Система обучения для летного и технического состава самолета F-22 (США)**

Контракт на разработку и создание комплекса систем обучения летного и технического составов для самолета F-22 ВВС США получила фирма "Боинг" совместно с фирмами "Lockheed Martin" ("Локхид Мартин") и "Pratt & Whitney" ("Пратт и Уитни") [4].

Комплекс систем обучения для самолета F-22 состоит из трех компонентов:

- системы обучения летного состава (СОЛС);
  - системы обучения технического состава (СОТС);
  - центра поддержки систем обучения (ЦПСО).
- Оборудование систем обучения включает в себя:
- учебные компьютерные классы;
  - обучающее программное обеспечение;
  - тренажеры для летчиков и техников, управляемые инструктором.

Для мультимедийного обучающего программного обеспечения в учебных классах используются технологии и методы системы обучения самолета Боинг 777.

#### **Система обучения летного состава самолета F-22**

В системе обучения летного состава самолета F-22 используются три тренажера (фирма "L3 Communications", Техас):

- полномасштабный тренажер самолета;
- тренажер боевого применения и тактики;
- процедурный тренажер.

Полномасштабный тренажер самолета (ПМТ) с неподвижным основанием (рис. 1, см. третью сторону обложки) характеризуется реалистичной визуализацией и динамикой окружающего ландшафта, имитацией атмосферных условий, опасных и прочих целей, а также объектов летной обстановки. С помощью повышенной точности органов управления, дисплеев и приборов летчик приобретает опыт реалистичного полета по приборам или действий в боевом сценарии. Внешняя обстановка отображается всеракурсно с учетом высоты и скорости полета.

В ПМТ летчик сидит в полномасштабной, полностью оборудованной кабине, установленной внутри частичного геодезического купола с девятью гранями задней проекции. Тренажеры ПМТ учебного центра соединены по сети, в группы из четырех единиц на каждой точке, где проходит обучение. В этих учебных центрах каждый ПМТ может работать как самостоятельно, так и совместно с любым другим или со всеми другими ПМТ для выполнения задач обучения. Эти тренажеры оснащены системой видеорегистрации кабины и действий летчика во время выполнения задания для последующего разбора полета.

Тренажер боевого применения и тактики (ТБПТ) (рис. 2, см. третью сторону обложки) предназначен для совершенствования навыков работы с системами самолета и применения оружия в фазе, предшествующей обучению на ПМТ или на самолете F-22. ТБПТ представляет собой часть кабины с динамической визуализацией закабинного пространства в одном (фронтальном) направлении, с точной имитацией оборудования, применяемого в процессе задания. В этом тренажере в достаточной мере представлена навигация, коммуникация и подготовка вооружения, а также индикация, пульта и переключатели.

Для подготовки данных перед работой на ПМТ, ТБПТ и самолете F-22 летчики используют систему поддержки летного задания ВВС для F-22. Процедурный тренажер (ПТ) (рис. 3, см. третью сторону обложки) используется для обучения летчиков правильным действиям при посадке в кабину и высадке из кабины в нормальных и чрезвычайных условиях, а также действиям при катапультировании в воздухе и на Земле.

### **Система обучения технического состава**

Система обучения технического состава состоит из:

- комплекса специализированных тренажеров (КСТ);
- интегрированной информационной системы техобслуживания F-22;
- переносной системы техпомощи.

Комплекс специализированных тренажеров включает в себя девять тренажеров для изучения и освоения следующих систем и комплексов самолета F-22:

- двигателя и программного обеспечения (ПО) обучению работе двигателя;
- топливной системы;
- системы структурного ремонта самолета;
- вооружения;
- шасси;
- вторичной системы электроснабжения;
- задней части фюзеляжа;
- кабины и носовой части фюзеляжа;
- кресла и фонаря.

Интегрированная информационная система техобслуживания F-22 (ИИСТО) — это инструмент, который записывает и связывает по сети информацию по техобслуживанию.

Более сложные тренажеры, включающие бортовые средства диагностики, имитирующие соответствующие функции на реальном самолете, записывают информацию в ИИСТО для эмуляции передачи данных техобслуживания реального самолета.

Обучаемые самолетные механики используют переносную систему технической помощи (ПСТП) — ноутбук — в самолете, в тренажерном классе, а также в транспортабельных системах ИИ-СТО F-22.

Для инструктажа и обучения летного и технического состава используются компьютерные классы с мультимедийными компьютерными средствами обучения.

Обучающие дидактические элементы включают в себя:

- аудио- и видеоматериалы (оцифрованные из аналоговых записей);
- сложные графические материалы (рис. 4, см. третью сторону обложки) из электронной конструкторской документации F-22;
- цифровые фотографии.

Для разработки учебного программного обеспечения (ПО) используются современные методы создания технических систем обучения, инструменты и технологии, программы обучения по самолету Боинг 777. Обучаемые в классе могут работать на индивидуальных рабочих местах, оборудованных персональными компьютерами (ПК), самостоятельно или под руководством преподавателя-инструктора, а также проходить полностью интегрированный оперативный курс проверки при использовании интерактивной графики, видео- и аудиосюжетов. При обучении технического персонала инструктор применяет пульт управления с отображением учебного материала и может направить обучающим необходимый учебный материал на их рабочие места и контролировать их действия. При обучении летного персонала обучаемые могут работать в учебных компьютерных классах под руководством инструктора, а также в классах с тренажерами боевого применения и тактики, где инструктор может выводить проекцию учебно-тактической обстановки и графически показывать необходимые примеры. Затем обучаемые могут практиковаться на своих кабинах и пультах ТБПТ перед тем, как перейти на ПМТ.

### **Центр поддержки системы обучения самолетов F-22**

Центр поддержки систем обучения (ЦПСО) включает в себя инструментарий, методы и технологии, обеспечивающие поддержку систем обучения во всех точках базирования самолетов F-22. ЦПСО будет служить для модификации, улучшения и расширения программы обучения и оборудования в соответствии с опытом эксплуатации и новыми боевыми заданиями. Технологии управления конфигурацией ЦПСО обеспечивают совместимость с соответствующей конфигурацией и эксплуатацией самолета. ЦПСО готовит и выпускает учебные материалы в виде новых сценариев и заданий.

Открытие первого центра обучения технического персонала самолета F-22 состоялось в 2001 г. на авиабазе ВВС США Неллис (Невада). На базе ВВС Тиндолл (Флорида) фирма Боинг оборудовала пять компьютерных классов, две лаборатории и центр обучения, предназначенные для обучения как лет-

Особенности АСО летного состава и ИТС самолетов-истребителей МиГ-29, F-35, F-22

| № п/п | Особенности АСО/Тип ЛА                              | МиГ-29 (ИАСО-29) | F-35 | F-22 | Примечание, сокращения                                                      |
|-------|-----------------------------------------------------|------------------|------|------|-----------------------------------------------------------------------------|
| 1     | Интерактивность обучающих систем                    | +                | +    | +    | F-22, 9 типов ПТ для ИТС<br>СИС<br>ПФТ<br>ВБО СО<br>ЦПО<br>ИИС ТО<br>ЕС ДАО |
| 2     | Процедурные тренажеры (ПТ)                          | +                | н/д  | +    |                                                                             |
| 3     | Справочно-информационная система                    | +                | н/д  | +    |                                                                             |
| 4     | Полнофункциональный тренажер                        | +                | +    | +    |                                                                             |
| 5     | Встроенная в бортовое оборудование система обучения | —                | +    | —    |                                                                             |
| 6     | Центр поддержки обучения (заказчика)                | +                | (+)  | +    |                                                                             |
| 7     | Интегрированная информационная система ТО           | —                | н/д  | +    |                                                                             |
| 8     | Единая система дистанционного авиационного обучения | —                | —    | —    |                                                                             |

ного, так и технического составов. Фирма Боинг поддерживает программу летных испытаний самолета F-22 на базе ВВС Эдвардз (Калифорния) в фазе разработки и производства, осуществляя промежуточное обучение объединенной испытательной команды, состоящей из оперативных летчиков и техников. Обеспечиваются дополнительные усилия по отработке инструментального обеспечения ЦПСО такого, как защищенные компьютерные сети и инструментарий технического обслуживания учебного ПО. ЦПСО будет сохранять и применять прототип средств обучения оперативных летчиков и техников как часть всего инструментария в целях обеспечения анализа и реализации изменений в системе обучения.

#### Концептуальные требования к АСО летного состава и ИТ самолетов-истребителей пятого поколения

В табл. 2 представлены основные особенности АСО летного состава и ИТС самолетов-истребителей МиГ-29, F-35, F-22. Из табл. 2 видно, что для создания АСО самолетов-истребителей пятого поколения (АСО-С5П) должна быть проведена большая работа [5, 6].

При эксплуатации самолетов-истребителей пятого поколения АСО летного состава и ИТС будут иметь очень большое значение, так как цена ошибки летного и ИТ состава при использовании этих самолетов очень высока. Можно отметить следующие тенденции. Прогресс в авиации сопровождается существенным ростом стоимостных показателей. Так, за последние годы стоимость авиационных комплексов возросла во много раз. В настоящее время на вооружение ВВС США поступают самолеты F-22 стоимостью порядка 50...75 млн долларов. Угроза потери столь дорогого летательного аппа-

рата при обучении летчиков служит существенным стимулом развития тренажерных систем и технологий. Далее, увеличение сложности и стоимости авиационных комплексов приводит к росту стоимостных показателей тренажерной техники. Стоимость тренажеров может превосходить на 20—50 % стоимость реального объекта, для которого они создавались. Удорожание авиационной техники приводит и к увеличению стоимости подготовки летного и ИТ состава.

Обобщая свойства существующих и перспективных авиационных АСО, можно сформулировать общие, концептуальные требования к АСО-С5П летного и ИТ составов самолетов-истребителей пятого поколения:

1. АСО должна быть интерактивной и быть частью единой системы дистанционного авиационного обучения.

2. В состав АСО должны входить интегрированные в сети полнофункциональные и процедурные тренажеры для летного состава и ИТС и УКК.

3. АСО должна быть связана с системой контроля бортового оборудования самолета.

#### Список литературы

1. Пономаренко А. В., Василец В. М., Михайлов В. В. и др. Интеллектуальные интерактивные учебно-тренировочные комплексы. М.: Воениздат, 2006. 255 с.
2. Хортон У. и др. Электронное образование: инструменты и технологии. М.: Кудиц-Образ, 2005. 639 с.
3. Aviation Week, 19/VIII 2002. P. 53, 54, 56.
4. URL: <http://www.boeing.com/defense-space/military/f22/f22train.html>
5. Пономаренко А. В. ИАСО ИТС для самолетов МиГ-29. Человеческий фактор в авиации и космонавтике / Под ред. А. А. Мendenкова. М.: Полет, 2007. С. 272—278.
6. Кулабухов В. С., Михальченко С. В., Халтобин В. М. Комплекс авторских программ "КОСМОС" для сетевых мультимедийных обучающих систем // Матер. НМК академии. М.: ВВИА им. Н. Е. Жуковского, 2007. С. 74—81.



# Указатель статей, опубликованных в журнале "Мехатроника, автоматизация, управление" в 2011 году

## ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕХАТРОНИКИ И УПРАВЛЕНИЯ

- Виттих В. А.** Когнитология развивающихся систем. № 10.
- Виттих В. А.** Управление ситуациями в сложных развивающихся системах с применением интерсубъективных теорий. № 12.
- Егоров О. Д.** Проектирование интегрированных мехатронных модулей. № 11.
- Иванов А. С., Лапковский Р. Ю., Уков Д. А., Филимонок Л. Ю.** Кибернетический подход к моделированию разнородных процессов в мехатронных системах. № 1.
- Кориков А. М.** Еще раз о мехатронике как науке. № 5.

## МЕТОДЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

- Александров А. Г., Михайлова Л. С., Степанов М. Ф., Брагин Т. М., Степанов А. М.** О развитии концепции автоматического решения задач теории управления в системе ГАММА-3. № 9.
- Арановский С. В., Фуртат И. Б.** Робастное управление безредукторным прецизионным электроприводом оси оптического телескопа с компенсацией возмущений. № 9.
- Артемова С. В., Грибков А. Н.** Синтез управления теплотехническими аппаратами на основе интегрированного графа. № 3.
- Вильвер П. Ю., Протасов А. В.** Имитационное моделирование сложных динамических систем с использованием сетей Петри. № 7.
- Воробьев В. В., Макаров Н. Н., Парамонова А. А.** Метод гарантированной точности для релейных следящих систем. № 10.
- Зайцева М. В., Паршева Е. А.** Робастное управление линейным объектом при наличии возмущений и помех. № 3.
- Ким Д. П.** Алгебраический метод синтеза линейных непрерывных систем управления. № 1.
- Ким Д. П.** Определение желаемой передаточной функции при синтезе систем управления алгебраическим методом. № 5.

- Кириллов А. Н.** Задача оптимального управления в системе со структурными изменениями. № 9.
- Коваль В. А., Осенин В. Н., Торгашова О. Ю.** Применение спектрального метода для анализа распределенных объектов управления, описываемых интегро-дифференциальными уравнениями. № 9.
- Колобашкина Л. В., Алюшин М. В., Алюшин В. М.** Синтез оптимальных законов коррекции цифровых высокоразмерных слабодемпфированных систем. № 3.
- Макаров Н. Н., Семашкин В. Е.** Метод предельных отклонений в сравнении с другими методами  $L_\infty$ -оптимизации систем управления. № 10.
- Паршева Е. А., Лежнина Ю. А.** Робастное децентрализованное управление с компенсацией возмущений нелинейными многосвязными объектами. № 6.
- Потапов А. М., Гушин М. А.** О связи показателей качества систем автоматического управления во временной, частотной и корневой областях. № 2.
- Пшихопов В. Х., Медведев М. Ю.** Блочный синтез робастных автоматических систем при ограничениях на управления и координаты состояния. № 1.
- Разоренов Г. Н.** Метод синтеза законов "мягкого" и "сверхмягкого" управления конечным состоянием динамических систем. № 4.
- Сельвесюк Н. И., Титов А. А.** Аналитический синтез регуляторов заданной точности для подавления ограниченных в  $L_{inf}$ -норме внешних возмущений. № 10.
- Теряев Е. Д., Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б., Петрин К. В.** Концепция "гибких кинематических траекторий" в задачах терминального управления подвижными объектами. № 12.
- Фалдин Н. В., Моржов А. В.** Теорема о числе переключений при управлении с помощью инерционных рулей. № 10.
- Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б.** Динамическая коррекция процессов регулирования методом линейно-квадратичной оптимизации. № 5.
- Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б.** О проблеме неробастности спектра в задачах модального управления. № 10.
- Фуртат И. Б.** Консенсусное управление линейной динамической сетью по выходу с компенсацией возмущений. № 4.

## РОБОТОТЕХНИКА

- Александров В. В., Кулешов С. В.** Цифровая программируемая технология управления робототехническими комплексами. № 2.
- Андреев В. П.** Система технического зрения с круговым обзором для мобильного робота. № 6.
- Большаков А. А., Лисицкий Д. Л., Петров Д. Ю.** Управление роботом при объезде препятствий. № 9.
- Гапонов И. Ю., Подураев Ю. В., Чхо Х.-Ч.** Генерация силы на основе изображения в дистанционно-управляемых микроробототехнических системах. № 8.
- Герасун В. М., Рогачёв А. Ф., Несмиянов И. А., Павловский В. Е.** Синтез манипулятора для мобильного робота на гусеничном шасси. № 5.
- Головин В. Ф., Архипов М. В., Журавлёв В. В.** Эргатические и биотехнические системы управления в медицинской робототехнике. № 5.
- Головин В. Ф., Архипов М. В., Журавлев В. В.** Обзор состояния робототехники в восстановительной медицине. № 8.
- Градецкий В. Г., Ермолов И. Л., Князьков М. М., Собольников С. А.** Построение подвижных коммуникационных сетей на базе наземных автономных мобильных роботов. № 11.
- Косенок Б. Б.** Аналитические решения пространственных векторных контуров, необходимых для кинематического исследования рычажных механизмов. № 6.
- Лопатин П. К.** Планирование путей манипуляционного робота в неизвестной статической среде. № 10.
- Немцев Е. М.** Применение платформы QNX для цифрового адаптивного нейросетевого управления приводами робота PUMA-560. № 2.
- Нусратов О. К., Джафаров П. С., Зейналов Э. Р., Мустафаева А. М., Джафаров С. М.** Аналитический метод синтеза регулятора с нечеткой TS-моделью для управления манипулятором робота с гибким соединением. № 8.
- Павловский В. Е., Забегаев А. Н., Калиниченко А. В., Павловский В. В.** Объединенная система навигации мобильного робота по маякам и видеоориентирам. № 10.
- Подураев Ю. В.** Компьютерная свертка видеоизображений в робототехнике: поиск решений в композициях древнерусской иконографии. № 5.

- Подураев Ю. В., Илюхин Ю. В., Яковлев С. Ф., Возжинский А. В.** Основные аспекты создания отечественных робототехнических комплексов лазерной сварки с адаптивной системой управления. № 11.
- Притыкин Ф. Н.** Методы и технологии виртуального моделирования движений адаптивных промышленных роботов с использованием средств компьютерной графики. № 6.
- Серебрянный В. В., Рыбальченко Д. Е.** Перспективы отечественного роботостроения. № 8.
- Сочнев А. Н.** Методы сокращения размеров сетевых моделей роботизированных технологических систем. № 7.
- Фархатдинов И. Г., Подураев Ю. В.** Об устойчивости системы двустороннего действия в дистанционном управлении мобильным роботом. № 11.

## АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

- Алиев М. Т., Буканова Т. С.** Метод формирования изображений в режиме реального времени. № 5.
- Басыров А. Г., Лебедев Д. М., Мاستин А. Б.** Энергосберегающая информационная технология конфигурирования бортовых вычислительных систем космических аппаратов. № 6.
- Васильев Д. А.** Гибридная модель прогнозирования электрических нагрузок промышленных предприятий. № 9.
- Егоров Г. А., Белоногов А. Д., Островский М. А., Рейзман Я. А.** Реализация человеко-машинного интерфейса в интегрированной технологии проектирования автоматизированных систем контроля и управления. № 7.
- Жарковский А. В., Лямкин А. А., Тревгода Т. Ф.** Автоматизация процесса отладки программных комплексов управления сложными техническими системами. № 4.
- Жданов А. В.** Направления развития мехатронных модулей систем вспомогательного кровообращения и искусственного сердца пульсирующего типа. № 8.
- Игнатов Н. А.** Реализация концепции энергоэффективности в автоматизированных системах управления на основе прогнозирования параметров рынка электрической энергии. № 6.
- Козак Н. В., Мартинова Л. И., Савинов К. А., Дубровин И. А.** Построение гетерогенной распре-

ленной компьютерной системы управления для высокотехнологичных децентрализованных производств на основе web-технологий. № 11.

**Лукьянов Д. В., Иващенко В. А.** Реконфигурация структур электрических сетей при нарушениях электроснабжения промышленных предприятий. № 6.

**Петухов И. В.** К вопросу обеспечения надежности эргатических систем управления. № 1.

**Прохоров Н. Л., Швейн А. А., Знайко Г. Г., Красовский В. Е.** Проблемы управления информационными процессами в проектировании и применении медицинской техники. № 7.

**Тарасов Е. Н.** Централизованное управление автоматизированной информационной системой. № 3.

**Фельдман В. М.** Направления развития вычислительных устройств серии Эльбрус. № 7.

**Юревич Е. И.** Фундаментальные задачи робототехники. № 2.

### **ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ**

**Вульфин А. М., Фрид А. И.** Интеллектуальная автоматизированная система поддержки принятия решений для технологического комплекса приема—сдачи нефти. № 5.

**Городецкий В. И., Бухвалов О. Л.** Управление нагрузкой ГРИД на основе многоагентной модели самоорганизации. Часть 1. Многоагентная модель и механизмы самоорганизации. № 3.

**Городецкий В. И., Бухвалов О. Л.** Управление нагрузкой ГРИД на основе многоагентной модели самоорганизации. Часть 2. Экспериментальные исследования и их обсуждение. № 7.

**Гулуев Г. А., Рзаев А. Г., Алиев Я. Г., Ризванов М. Г., Саттаров И. Р.** Интеллектуализированная станция управления станком-качалкой. № 8.

**Еременко Ю. И., Полещенко Д. А., Глущенко А. И.** Синтез системы управления чашевым окомкователем с нейросетевой надстройкой и оценка ее эффективности относительно шаговой системы экстремального управления. № 10.

**Карсаев О. В., Конюший В. Г., Тихомиров В. В., Троцкий Д. В.** Многоагентная система планирования работ на космодроме Байконур. № 4.

**Колоденкова А. Е.** Нечетко-множественный подход к оценке реалистичности альтернатив программного обеспечения мехатронных систем. № 4.

**Коростелев В. Ф., Большаков А. Е.** Разработка нейросетевой модели процесса кристаллизации расплава под давлением. № 10.

**Крыжановский Г. А., Солодухин В. А.** Интеллектуальные транспортные системы и обратные задачи оптимизации. № 1.

**Кудинов Ю. И., Кудинов И. Ю.** Устойчивость нечетких динамических производственных систем. № 7.

**Осипов В. Ю.** Оптимизация ассоциативных интеллектуальных систем. № 3.

**Сергеев С. Ф.** Психологические основания проблемы искусственного интеллекта. № 7.

**Чебурахин И. Ф., Цурков В. И.** Синтез дискретных логических устройств обработки информации на основе теории агентов. № 3.

**Шпрехер Д. М.** Нейросетевые оптимизационные модели поиска неисправностей электромеханических систем. № 3.

### **ИЗМЕРЕНИЯ, КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА**

**Алиев Т. А., Аббасов А. М., Ализаде А. А., Етирмишли Г. Д., Гулуев Г. А., Пашаев Ф. Г.** Интеллектуальный мониторинг аномальных сейсмических процессов на острове Песчаный Каспийского моря с использованием робастной помехотехнологии. № 5.

**Алиев Т. А., Мусаева Н. Ф., Гулуев Г. А., Саттарова У. Э.** Помехоиндикация изменения динамического состояния производственных объектов. № 8.

**Алиев Э. Н.** Система мониторинга и диагностики состояний несущих конструкций в строительстве. № 3.

**Алиев Э. Р.** Комплексная информационная система мониторинга жилых зданий и социально-значимых объектов. № 8.

**Бабаян П. В., Гаврилов А. Н.** Использование систем технического зрения при автоматизации производства герконов. № 6.

**Беленький Л. Б., Боровик С. Ю., Райков Б. К., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П., Тулупова В. В.** Метод ускоренного получения информации о смещениях торцов лопаток в компрессорах и турбинах. № 7.

**Боровик С. Ю.** Система измерения смещений торцов лопаток с распределенным кластером одновитковых вихретоковых датчиков. № 4.

**Глухов В. И., Глухов А. В., Прилипко В. А.** Построение систем радиационного контроля на базе UVK CM1820M. № 7.

**Гулуев Г. А., Рзаев А. Г., Саттаров И. Р., Юсифов И. Б.** Комбинированный способ измерения дебита нефтяных скважин. № 8.

**Епишкин А. Е., Шестаков В. М.** Способы подавления электромеханического резонанса при пуске вибрационных установок. № 6.

**Коровин Я. С., Хисамутдинов М. В.** Фильтрация изображений в целях выделения эллипсов в системе бесконтактного определения разноточности тепловыделяющих сборок активной зоны реактора типа ВВЭР-1000. № 4.

**Круглова Т. Н.** Интеллектуальный метод диагностирования и прогнозирования технического состояния мехатронных комплексов, эксплуатируемых в экстремальных условиях. № 3.

**Лебедев Г. Н., Кузнецов И. Е., Михайлов В. В., Матвеев М. Г.** Оптимальное управление качеством радиометеорологических измерений. № 5.

**Мелёшин И. С.** Оценка основного сопротивления поезда метрополитена на основе фильтра Калмана. № 1.

**Морозов В. В., Жданов А. В., Трефилов М. А.** Расчет вероятности ошибки технической системы с использованием аппарата сетей Петри. № 7.

**Мусатов В. Ю., Сысоев В. В.** Газоаналитические приборы вида "электронный нос": примеры применения для различных задач. № 9.

**Никишин В. Б.** Пространственное позиционирование и аттестация магистральных трубопроводов на основе интеграции средств внутритрубой диагностики, подземной навигации и наземных геодезических измерений. № 9.

**Новик А. Ю., Иващенко В. А.** Модели и методы прогнозирования показателей качества листового стекла. № 1.

**Шаршеналиев Ж. Ш., Брякин И. В.** Инерциальные датчики с электромагнитным позиционированием. № 6.

**Шемякин А. Н., Рачков М. Ю., Соловьев Н. Г.** Исследование влияния натекания воздуха в газовый контур на мощность излучения лазерного технологического комплекса. Часть 1. № 7.

**Шемякин А. Н., Рачков М. Ю., Соловьев Н. Г.** Исследование влияния натекания воздуха в газовый контур на мощность излучения лазерного технологического комплекса. Часть 2. № 12.

## **ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ И ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ**

**Алиев Т. А., Нусратов О. К., Керимов А. Б., Масталиева Д. И.** Алгоритм устранения погрешности временного сдвига, возникающего при аналого-цифровом преобразовании многомерных сигналов. № 8.

**Афонин С. М.** Исследование электромеханического преобразования энергии пьезоактюаторами нано- и микроперемещений. № 12.

**Балковой А. П., Цаценкин В. К., Яковлев С. Ф., Костин А. В.** Актуальные вопросы создания отечественных линейных электроприводов на современной элементной базе. № 11.

**Буканова Т. С.** Способ управления и модель электрической машины с дифференциальным торможением. № 12.

**Бусурин В. И., Казарьян А. В., Чижов В. С., Звей Нэй Зо.** Исследование характеристик преобразователей электрического напряжения и температуры на основе оптического туннелирования. № 12.

**Герман-Галкин С. Г., Бормотов А. В.** Современное состояние и перспективы развития мехатронных систем с вентильными электрическими машинами. № 2.

**Горячев О. В., Минчук С. В.** Система математических моделей вентильного двигателя, основанная на численном расчете магнитостатического поля. № 10.

**Григорьев С. Н., Кузовкин В. А., Филатов В. В.** Имитационное моделирование асинхронного электропривода станков. № 11.

**Илюхин Ю. В., Арфикийн С. А.** Быстродействующие электропневматические приводы массивных объектов с дискретным компьютерным управлением. № 11.

**Коршунов А. И.** Частотный пуск синхронного двигателя с постоянными магнитами на роторе. № 2.

**Малинин Л. И., Кондратьев В. А., Малинин В. Л.** Исследование моделей процесса энергопреобразования в электромагнитном механизме постоянного тока. № 12.

**Мамедов Ф. И., Асадова Р. Ш., Асадова К. Ф., Асад-заде С. Г.** Двухмерный индуктивный преобразователь для измерения линейных и угловых перемещений. № 8.

**Новоселов Б. В.** Новые подходы в проектировании регулируемых приводов. № 2.

**Свинов А. В., Турыгин Ю. В., Гартянски Р., Ситар Я.** Изучение характеристик и разработка дистанционной системы управления линейным асинхронным двигателем. № 12.

**Садомцев Ю. В., Гривенев Д. А.** Синтез цифрового регулятора для системы стабилизации скорости вращения вала генератора. № 9.

**Фалдин Н. В., Феофилов С. В.** Прикладные методы синтеза оптимальных по точности и быстродействию релейных следящих приводов. № 10.

**Шароватов В. Т., Лощицкий П. А.** Математическая модель силового бесштокового пневмоцилиндра одностороннего действия оболочкового типа. № 2.

### **ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ**

**Аршанский М. М., Ганюшин Р. С., Зазвонных А. В.** Адаптация технологических возможностей ЧПУ к условиям обработки на основе интегрированной клиент-серверной системы. № 12.

**Бобырь М. В.** Модифицированный алгоритм нечетко-логического вывода в задачах управления оборудованием с ЧПУ. № 4.

**Васильков Д. В., Кочина Т. Б., Александров А. С.** Учет контактных взаимодействий в подвижных и неподвижных соединениях звеньев технологических машин в задачах динамики и управления. № 2.

**Григорьев С. Н.** Научно-технические проблемы построения современных технологических систем с числовым программным управлением. № 4.

**Зеленский А. А., Подураев Ю. В., Бондарь Д. В.** Подход к исследованию неравномерно распределенного множества интерполяционных узлов для неортогональных мехатронных модулей контурной обработки материалов. № 11.

**Коротков Е. Б., Левинзон Г. Л., Мороз А. В.** Стабилизация и виброгашение оборудования для нанотехнологий. № 2.

**Кулик В. И., Кулик А. В., Загашвили Ю. В., Орыщенко А. С.** Моделирование газофазных процессов получения композитов с углеродной и керамической матрицами. № 2.

**Мартинев Г. М., Нежметдинов Р. А., Рыбников С. В., Кулиев А. У.** Организация распределенного управления станком гидроабразивной резки с ЧПУ. № 11.

**Никитин Ю. Р., Абрамов И. В.** О построении системы диагностирования станков с ЧПУ. № 4.

**Чикуров Н. Г., Мавлютов М. С.** Высокоскоростной сплайновый интерполятор повышенной точности для компьютерных устройств ЧПУ. № 12.

### **ОБРАЗОВАНИЕ В ОБЛАСТИ МЕХАТРОНИКИ И РОБОТОТЕХНИКИ**

**Герман-Галкин С. Г., Загашвили Ю. В., Клещенко М. С.** Концепция дистанционного обучения на кафедре "Мехатроника и робототехника". № 2.

**Подготовка** кадров и научно-техническое сотрудничество между ГНЦ РФ ЦНИИ робототехники и технической кибернетики (ЦНИИ РТК) и кафедрой "Мехатроника и робототехника" БГТУ "Военмех" им. Д. Ф. Устинова. № 2.

**Фрадков А. Л., Андриевский Б. Р., Бойков К. Б., Андриевский А. Б.** Многомаятниковый мехатронный комплекс. № 1.

#### **Журнал в журнале**

#### **"УПРАВЛЕНИЕ И ИНФОРМАТИКА В АВИАКОСМИЧЕСКИХ И МОРСКИХ СИСТЕМАХ"**

**Алексеев К. Б., Шадян А. В.** Об одном способе оп-  
ределения динамических параметров космиче-  
ского летательного аппарата в полете. № 1.

**Афонин А. А., Сулаков А. С.** Алгоритм оценивания параметров гравитационного поля, ориентации и навигации бесплатформенного гравиинерциального комплекса. № 9.

**Басыров А. Г., Лебедев Д. М., Мастин А. Б.** Пла-  
нирование параллельной обработки информации в высокопроизводительных вычислительных системах бортовых комплексов управления космическими аппаратами. № 1.

**Бегичев Ю. И., Пономаренко А. В., Котицын Л. О., Сильвестров М. М., Чернышов В. А.** Концепция построения учебно-тренировочных средств для эргономического сопровождения разработки и создания эргатического информационно-управляющего комплекса многоцелевых беспилотных летательных аппаратов. № 5.

**Грязин Д. Г., Скалон А. И., Величко О. О., Чекма-  
рев А. Б.** Опыт аттемтации трехосного поворот-  
ного стенда фирмы Acutronic. № 4.

**Девятисильный А. С., Числов К. А.** Методы постро-  
ения устойчивых двухкомпонентных инерци-  
альных навигационных систем на основе интер-  
претации радиальной информации. № 8.

- Девятисильный А. С., Числов К. А.** Модели интеграции инерциальной, спутниковой и астронавигационной систем. № 11.
- Девятисильный А. С., Числов К. А.** Модель позиционно корректируемой двухкомпонентной гравитационной навигационной системы на основе интерпретации принципа Д'Аламбера. № 4.
- Дорожко В. М.** Идентификация снижения сопротивляемости морского судна к динамическому воздействию ветровой нагрузки. № 5.
- Желамский М. В.** Магнитный датчик положения и ориентации с шестью степенями свободы для управления подвижными объектами. № 6.
- Заболотнова О. Ю.** Решение задачи управления и оценивания при программном развертывании космической тросовой системы. № 8.
- Заведеев А. И.** Принципы построения отказоустойчивых систем управления ориентацией аэрокосмических летательных аппаратов. № 6.
- Заведеев А. И., Ковалев А. Ю.** Построение бортовой системы управления космического аппарата повышенной надежности на базе принципа реконфигурации с применением адаптивной логики в алгоритмах контроля и диагностики. № 11.
- Инсаров В. В., Щербенев А. К.** Методика компьютерного моделирования тепловых полей типовых объектов наземных сцен. № 6.
- Кабанов А. А.** Система автоматической посадки летательного аппарата корабельного базирования. Часть 2. Подсистема вертикального снижения. № 3.
- Колесниченко С. В.** Обоснование систем навигационно-временного обеспечения комплексированных систем управления высокодинамичных летательных аппаратов. № 3.
- Корсун О. Н., Лещенко И. А., Немичев М. В.** Математическое моделирование переходных процессов в авиационном газотурбинном двигателе. № 11.
- Кулифеев Ю. Б., Афанасьев Ю. Н.** Алгоритм автоматического приведения самолета к заданным высоте и скорости горизонтального полета. № 9.
- Лебедев Г. Н., Чан Ван Туен, Ву Суан Хыюнг.** Контроль и управление безопасным движением транспорта при встречном движении. № 8.
- Лопота В. А., Потапов А. М., Градовцев А. А., Каргов А. И., Даляев И. Ю.** Транспортно-манипуляционная система для обслуживания Международной космической станции и поддержки внекорабельной деятельности космонавтов. № 2.
- Нагар Ю. Н., Ольшанский В. Ю., Панкратов В. М.** Динамика пьезогироскопа в импульсном режиме. № 3.
- Пономаренко А. В., Василец В. М., Кулабухов В. С., Халтобин В. М.** Автоматизированные системы обучения для летного и инженерно-технического составов самолетов-истребителей пятого поколения. № 12.
- Сапунков Я. Г., Молоденков А. В.** Исследование особого режима управления в задаче оптимального разворота произвольного твердого тела (космического аппарата). № 4.
- Сафронов В. В., Поршнев В. А., Жебраков А. С.** Выбор стенда для проведения огневых испытаний демонстратора пульсирующего детонационного прямоточного двигателя. № 9.
- Севрюк А. Н.** Автоматическая классификация кластеризованных измерительных аномалий на борту АНПА. № 5.
- Солдаткин В. В.** Анализ погрешностей системы воздушных сигналов вертолета на основе неподвижного аэрометрического приемника и информации вихревой колонны несущего винта. № 11.
- Солдаткин В. В.** Концепция построения и синтез конструктивных параметров неподвижного многоканального аэрометрического приемника системы воздушных сигналов вертолета. № 1.
- Челноков Ю. Н., Панкратов И. А.** Переориентация круговой орбиты космического аппарата с тремя точками переключения управления. № 1.

# CONTENTS

|                                                                                                                  |   |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|
| <b>Vittikh V. A.</b> Situation Management in Complex Developing Systems Using Intersubjective Theories . . . . . | 2 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|

*The necessity to use communicative rationality in situation management in complex developing systems created by human and functioning with his involvement is being justified. The structure of intersubjective theory, playing the role "integration platform" for achievement of consensus of heterogeneous actors, is being proposed. It should be mentioned that special info-communication technologies including communication actions support systems and means for operational resource allocation are required to be applied for situation management in real time.*

**Keywords:** developing system, heterogeneous actors, communicative rationality, problematic situation, communicative action, self-organization, social partnership, intersubjective theory, real-time management

|                                                                                                                                                                                         |   |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|
| <b>Teryaev E. D., Filimonov A. B., Filimonov N. B., Petrin K. V.</b> The Conception of "Flexible Kinematic Trajectories" in the Problems of Terminal Control by Moving Objects. . . . . | 7 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|

*The problems of terminal control by moving objects are considered. Inconsistency of principle "nonperturbed — perturbed movement" in terms of big perturbations is noted as principle of "flexible trajectories" is analyzed. The idea of space synchronization of kinematic trajectories of controlled movements is advanced. The conception of "flexible kinematic trajectories" is suggested. The problem of control by landing manoeuvre of aircraft is discussed.*

**Keywords:** control by moving objects; terminal control; the conception of "nonperturbed — perturbed movement"; principle of "flexible trajectories"; kinematic aspect of controlled movements; space synchronization of control processes; control of aircrafts

|                                                                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Svinov A. V., Turygin Yu. V., Hartyanski R., Sitar J.</b> Research of Linear Asynchronous Motor Characteristics and Development of its Remote Control System . . . . . | 16 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

*The paper deals with the remote control of linear motor. Concept of linear motor and its benefits are described. For providing remote control system which is possible to monitor by Internet the basic types of distance control systems are studied. Communication between motor and a computer is usually realized by serial port (RS 232 or RS 485) which is not suitable for our solution. For that, serial port communication by USB was chosen and USB adapter was designed. Circuit design of data processing system is based on PIC microcontroller. The remote control system of the linear motor is described via software product LabView.*

**Keywords:** linear motor, remote control, distance control concept, PIC microcontroller, LabView

|                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Bukanova T. S.</b> Principle of Management and Model of the Electric Motor with Differential Braking . . . . . | 21 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

*The electric drive on the basis of the asynchronous electric motor with differential braking is offered. The principle of management is proved by electric motor, the structure of means of the electric drive is developed for management realization. The mathematical and imitating model of the electric motor with differential braking is presented. Imitating researches of law of functioning of the electric motor are conducted.*

**Keywords:** the electric motor with differential braking, mathematical model, a principle of management of an electric motor

|                                                                                                                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Malinin L. I., Kondratyev V. A., Malinin V. L.</b> Research of Models of Process of Transformation of Energy in the Electromagnetic Mechanism of a Constant Current. . . . . | 28 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

*The comparative analysis of processes of transformation of energy is carried out at use for mathematical models of devices complete and private derivative. Is shown, that the spatial-temporary description of processes in private derivative allows to reveal wave modes and adequately to describe real processes.*

**Keywords:** electromagnetic force, models of process in coordinate Lagranzha and Eylera, balance of capacity

|                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Afonin S. M.</b> Electromechanical Deformation and Energy Conversion of Piezoactuators for Nano- and Micromovement. . . . . | 34 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

*Problems of electromechanical deformation and energy conversion of piezoactuators for nano- and micromovement are discussed. Main features and principles of electromechanical energy conversion of piezoactuators for nano- and micromovement are presented. Expressions for coefficient efficiency and its maximum are given.*

**Keywords:** piezoactuator for nano- and micromovement, electromechanical deformation, energy conversion, coefficient efficiency

**Busurin V. I., Kazaryan A. V., Chizhov V. S., Zvei Nei Zo.** Investigation of Performances of Voltage and Temperature Transducers Based on Optical Tunneling ..... 40

*Quartz transducer based on optical tunnel effect with a flat gap controlled by voltage and temperature is investigated theoretically and experimentally. A design of transducer is given and performances are calculated. A transfer function is investigated for a case of collimated light beam. A working range providing a maximal sensitivity of transducer is defined. The sensitivity of transducer due to thermal expansion of design units is investigated and applied for temperature measurement.*

**Keywords:** measurement transducer, smelt quartz, optical tunneling, transfer function, sensitivity, piezoactuator, voltage, temperature, experiment

**Shemyakin A. N., Rachkov M. Yu., Solovyov N. G.** Investigation of the Impact of Air Leakage into the Gas Volume on the Laser Power. Part 2 ..... 45

*In this paper, the impact of air leakage into the gas volume of the laser with a non-self-sustained glow discharge is studied. The method that expands the diagnostic capabilities of the laser control systems is proposed. It allows controlling the leakage of air into the laser gas volume.*

**Keywords:** laser technological complex, non-self-sustained glow discharge, gas volume, diagnostics, laser power, control system

**Tchikurov N. G., Mavlyutov M. S.** High-Speed Spline Interpolator for High Precision CNC Devices ..... 51

*In this paper we solve the problem of spline interpolation for CNC devices of machine tools and industrial robots. A method for solving this problem by reducing it to an optimization problem and numerical integration is proposed. Results of the interpolator work in high-speed processing modes are presented.*

**Keywords:** CNC devices, spline interpolation, high-speed processings

**Arshanskij M. M., Ganjushin R. S., Zazvonnykh A. V.** Adaptation of Technological Capabilities of CNC System to Machining Environment Based on Integrated Client-Server System ..... 56

*Proposed the concept of adaptation of technological capabilities of CNC to machining conditions and a concept product for realization of this task in an integrated client-server system.*

**Keywords:** CNC, integration, client-server

**Ponomarenko A. V., Vasilets V. M., Kulabukhov V. S., Khaltobin V. M.** Automated Training Systems for Pilots and Engineer Technical Staff of Fifth Generation Fighter Aircraft ..... 61

*Composition, characteristics and tools of training aids, developed in the USA, were studied. Based on the analysis of these developments and the interactive training system, created in RAC "MiG" for aircraft of MiG-29 series, general concept requirements were shaped for automated training system of fifth generation fighter aircraft.*

**Keywords:** automated training systems (ACO), in-built training aids, computerized training rooms, training software, procedure trainer, conceptual requirements to ASO

---

---

**Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»**

107076, Москва, Стромынский пер., 4

Телефон редакции журнала: **(499) 269-5397**, тел./факс: **(499) 269-5510**

Дизайнер *Т. Н. Погорелова.*

Технический редактор *Е. В. Конова.* Корректор *М. Г. Джавадян.*

---

Сдано в набор 29.09.2011. Подписано в печать 17.11.2011. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.  
Усл. печ. л. 8,82. Уч.-изд. л. 9,16. Заказ 829. Цена договорная.

---

Журнал зарегистрирован в Комитете Российской Федерации по делам печати,  
телерадиовещания и средств массовых коммуникаций  
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-11648 от 21.01.02

Учредитель: Издательство "Новые технологии"

Отпечатано в ООО "Подольская Периодика". 142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, 15