

УДК 681.513.6

В.В. Павлов, Н.Н. Комар

## Применение самовосстанавливающихся систем управления в обеспечении безопасности управляемого полета

Рассмотрена необходимость создания системы автоматического управления самолетом, основанная на принципах самонастраивающихся систем с учетом возможных отказов системы управления.

The necessity of creation an automatic aircraft control system based on the principles of self-tuning systems taking into account the possible of aircraft control system failure is presented.

Описано необхідність створення системи автоматичного управління літаком, заснованої на принципах самоналаштувальних систем з урахуванням можливої відмови системи управління.

**Введение.** Безопасность полетов воздушного транспорта – актуальный вопрос в авиационной отрасли, особенно для пассажирских перевозок. Всемирный трафик авиаперевозок устойчиво растет в течение последних десятилетий. Это ведет к увеличению интенсивности воздушного движения в крупных густонаселенных районах. По данным как зарубежных, так и отечественных исследований, несмотря на то что количество ежегодных летных часов более чем удвоилось за период 1993–2013 гг., число несчастных случаев, к сожалению, остается на постоянном уровне. Это достигается ужесточением требований к мерам безопасности в отрасли, внедрением технологий повышения безопасности и улучшением подготовки всех работников авиации.

Рост безопасности полетов гражданской авиации обеспечивается путем разработки новых методов автоматического управления, позволяющих предотвратить аварийную ситуацию при возникновении отказа. Эти методы автоматического управления включают в себя, так называемую, концепцию активного отказоустойчивого управления полетом, когда ее система способна обнаружить изменение в поведении самолета и адаптироваться к ним путем оперативного изменения параметров или структуры используемых законов управления. Отказоустойчивое управле-

ние полетом должно позволить улучшить живучесть и восстановление после влияния неблагоприятных условий полета, вызванных неисправностями и повреждениями. Это достигается использованием неповрежденных управляющих поверхностей и двигателей (или их комбинации), которые адекватно реагируют на управляющий сигнал. Основная цель методов управления – восстановление стабильности и маневренности самолета для дальнейшей безопасной эксплуатации.

Анализ распределения инцидентов с самолетами первого–третьего класса позволяет выделить две основные причины авиационных происшествий. Первая – это столкновение с землей (когда полностью функционально исправный самолет врывается в землю в результате ошибки пилота из-за потери пространственной ориентации). Вторая причина – это неисправность системы управления самолетом либо ошибка пилота, которая ведет к потере контроля над самолетом в полете. Эта категория насчитывает 16 процентов от всех случаев авиационных происшествий [1].

Большинство инцидентов с потерей контроля в полете вызваны отказами подсистем, внешними угрозами и человеческим фактором. В дальнейшем сосредоточимся на отказах компонентов, связанных с системой управления самолетом.

**Ключевые слова:** адаптивные системы управления, отказобезопасность, самонастройка, изменение конфигурации.

Работы в сфере отказоустойчивого управления напрямую связаны с приоритетами Международной организации гражданской авиации, опубликованными в Глобальном плане обеспечения безопасности полетов. Постоянное сокращение показателя аварийности – первоочередная задача Глобального плана. Меры, направленные на сокращение количества авиационных происшествий и инцидентов, связанных с потерей управления в полете, будут способствовать реализации этой задачи [2].

### **Анализ литературы и новейших исследований. Неразрешенная часть проблемы**

Существенным требованием при разработке самовосстанавливающихся систем управления самолетом есть обеспечение высоких динамических свойств при значимой параметрической неопределенности. Адаптивное управление [3] – один из основных методов выполнения указанных требований. Избранный способ адаптации должен удовлетворять противоречивым требованиям к быстродействию процесса адаптации и качеству процессов в системе при недостатке текущей информации о элементах движения самолета.

Отечественными учеными указанная тематика активно исследовалась с начала 50-х годов XX ст. академиками Н.Н. Лузиным, В.С. Кулебакиным, Б.Н. Петровым, А.Ю. Ишлинским, член-корреспондентами АН УССР А.Г. Иващенко, А.И. Кухтенко, профессорами Б.А. Рябовым, П.И. Кузнецовым и др. В 1957 г. по просьбе академика П.Д. Грушина в институте автоматики и телемеханики под руководством академика Б.Н. Петрова начались исследования по разработке принципов построения и теории адаптивных систем управления, результатом которых стала разработка теории беспойсковых самонастраивающихся систем (БСНС) управления [4]. В настоящее время эти системы в нашей и мировой литературе известны как адаптивные системы с моделью.

Были предложены принципы построения БСНС, метод синтеза основного контура на основе теории инвариантности, эвристические алгоритмы адаптации, линеаризованные модели БСНС, алгоритмы адаптации Ляпунова, крите-

рий адаптируемости и частотный метод исследования БСНС. Разработаны структуры и теория БСНС для различных классов летательных аппаратов [5].

В настоящее время теории адаптивности и практическим вопросам построения адаптивных систем уделяется все большее внимание.

Множество литературных источников связано с теорией адаптивного и оптимального управления. Однако некоторые из них [6] дают лишь общее представление об адаптации, основываясь на научных трудах по теории вопроса.

Автором работы [7] изложены вопросы построения адаптивных систем идентификации реальных динамических объектов, подверженных воздействию как аддитивных, так и мультипликативных помех, уменьшения взаимного влияния настраиваемых параметров.

В работе [8] вводятся понятия и формулируются задачи оптимального и адаптивного управления, излагаются математические теории оптимизации и адаптации, на основании которых строятся методы расчета оптимальных и адаптивных систем.

Другие авторы рассматривают адаптивное управление применительно непосредственно к системам управления летательными аппаратами и предлагают различные методы расчета беспойсковых адаптивных систем автоматического управления [7, 9].

В работе [10] авторы изложили принципы формирования структуры и методы расчета параметров быстродействующих беспойсковых адаптивных систем автоматического управления летательными аппаратами. Приведены различные методы идентификации переменных параметров объекта управления, рассмотрены принципы построения беспойсковых адаптивных систем с медленно изменяющимися параметрами.

Необходимо отметить, что адаптивные системы управления получили большое распространение в практике управления. Именно поэтому многие авторы [7, 11] приводят в своих работах классификацию, общие принципы их построения, анализа и использования.

Так, например, в некоторых трудах рассматриваются вопросы, посвященные только беспой-

исковым системам или следящим системам [12], а авторы [13] уделяют внимание еще более узкому классу адаптивных систем – системам с эталонными моделями.

В зарубежной литературе отказоустойчивое управление, основанное на методах адаптации, изучается такими учеными, как Рон Паттон, Ю. Шианг, Ян Мачийовски и др. Существующие подходы к обеспечению отказоустойчивости предполагают резервирование либо формирование специального управления, позволяющее сохранять важнейшие характеристики системы при наличии в ней дефектов или отказов (возможно, при ухудшении второстепенных характеристик). Последний подход принято называть аккомодацией к дефектам [14].

Различают пассивный и активный подходы к решению задачи аккомодации [15]. Пассивный подход предполагает, что закон управления изначально разработан так, что обеспечивает адаптацию к параметрическим возмущениям, вызываемым дефектами. Возможности пассивного подхода ограничиваются так называемыми «малыми» дефектами. В основе активного подхода лежит формирование нового управления, позволяющего в той или иной степени устранить влияние дефектов на систему. Активный подход предоставляет больше возможностей, однако его реализация требует, как минимум, предварительного обнаружения дефектов. Более того, многие существующие методы, разработанные в рамках активного подхода, предполагают предварительное оценивание размера дефекта (что требует дополнительных временных и вычислительных затрат), после чего задача аккомодации может быть решена на основе методов адаптивного управления [16].

Отметим, что результаты работ, которые проводились ранее в области обеспечения отказоустойчивого управления самолетом, имеют ряд проблем и ограничений. Они варьируются в зависимости от количества отказов, их типа и степени повреждения, которые могут быть компенсированы за счет реконфигурации системы управления. Для некоторых подходов не ясно, что произойдет, когда поведение, близкое к эталон-

ной модели, не достижимо в условиях, возникающих после отказа.

Алгоритмы управления динамическими системами обеспечивают высокое быстродействие при парировании параметрических возмущений в некоторой области [17], но в общем случае не обеспечивают оптимального поведения замкнутой системы. Методы настройки регулятора, основанные на адаптивной идентификации [3], облегчают возможность решения задач оптимизации, но обычно связаны с более длительным периодом настройки.

Недостаток информации о состоянии объекта мотивирует разработку методов адаптивного управления с неизвестным относительным порядком модели объекта и при измерении только выходного сигнала [18]. Недостатком этих методов есть сложность предлагаемых алгоритмов, которая затрудняет их реализацию и снижает помехоустойчивость.

В данной статье для решения задачи обеспечения безопасности полета предлагается использовать преимущества самонастраивающихся систем. Такие как:

- обладание свойством динамической самоорганизации, самонастройки и многомерности;
- возможность их самовосстановления (т.е. вывод системы из области тяжелых в область благоприятных режимов);
- удовлетворение современных требований по быстродействию работы и настройки, затратам энергии, помехоустойчивости и точности настройки параметров управления;
- отсутствие пробных (стимулирующих) возмущений для оценки динамического состояния объекта.

Отметим, что, несмотря на многие разработки по вопросам теории адаптивных систем, методы анализа таких систем требуют дальнейшего активного исследования и развития.

### **Постановка задачи**

Основная задача и цель данной научной статьи – разработка и синтез беспоисковой адаптивной самовосстанавливающейся системы управления самолетом, в которой настройка параметров осуществляется на основе оперативной

идентификации аэродинамических характеристик самолета. Таким образом, динамика самолета при возникновении отказа будет максимально приближена к динамике эталонной модели с помощью поверхностей управления, которые реагируют на управляющие сигналы.

Анализ литературы показал, что отказ приводов поверхностей системы управления – один из критических сбоев для самолета [15]. Отказ влияет на летные качества, маневренность, рабочий диапазон полета, безопасность и, наконец, может привести к катастрофе самолета. Поэтому для канала управления полетом особенно важно обеспечение отказоустойчивости. После отказа одного из приводов, немедленное изменение конфигурации системы управления должно привести к переназначению оставшихся исправных приводов.

Прежде чем рассматривать возможные отказы системы управления самолетом, необходимо дать определения терминам *неисправность* и *отказ*.

*Неисправность* – состояние объекта, при котором он не соответствует хотя бы одному из требований нормативно-технической и/или конструкторской (проектной) документации. Исходя из этого определения, неисправность – это ненормальное состояние, которое не может повлиять на правильное функционирование системы, но в конечном итоге может привести к отказу.

*Отказ* – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта, что гораздо серьезнее, чем неисправность. Например, при возникновении неисправности привода элерона его еще можно использовать, но он может иметь более медленную реакцию или становится менее эффективным. Но когда элерон блокируется в фиксированном положении – это отказ и привод больше не работает, необходимо перераспределение приводов для получения желаемого эффекта.

Отказы приводов системы управления полетом можно разделить на две категории:

- приводящие к полной потере эффективности управления приводом;
- вызывающие частичную потерю эффективности.

Общие типы отказов приводов показаны на рис. 1–4.

*Блокировка на месте* – отказ, в результате которого привод заводится в определенном положении и не реагирует на сигналы управления, что может быть вызвано механическим повреждением, например, из-за отсутствия смазки. Этот тип отказа не только уменьшает количество доступных приводов, но также может вызвать постоянное возмущение в динамике полета самолета.

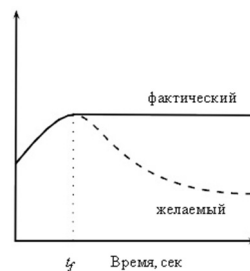


Рис. 1. Блокировка на месте

*Внезапная перегрузка* – отказ, в результате которого управляющая поверхность движется с максимальной предельной скоростью, пока не достигнет своего максимального предельного положения. С учетом структурной нагрузки и управляемости самолета – это один из наиболее катастрофических отказов. *Внезапная перегрузка* может произойти при отказе электронного компонента, генерирующего «неправильный» сигнал, посылаемый на приводы, вызывая отклонение поверхности на максимальной скорости в сторону предельного положения.



Рис. 2. Внезапная перегрузка

*Плавающий* отказ происходит, когда привод движется с нулевым моментом и не реагирует на сигналы управления. Примером отказа есть потеря гидравлической жидкости в приводе руля высоты, в результате чего он свободно перемещается и принимает направление местного угла атаки. Тогда он не эффективен вдоль оси тангажа.



Рис. 3. Плавающий отказ

Потеря эффективности характеризует приводы, отвечающие на управляющие сигналы ненормальным образом (вялый отклик, насыщенность, ухудшение времени реакции и т.д.). Например, наличие утечки цилиндра может вызвать потерю эффективности и ухудшает время отклика привода.

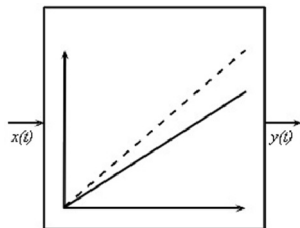


Рис. 4. Потеря эффективности

Все виды перечисленных отказов связаны с поверхностями управления самолета.

Другим типом отказов, которые происходят на борту самолета, это структурные повреждения. Они могут изменить условия полета самолета из-за изменений в аэродинамических коэффициентах или центре тяжести, что приводит к изменению в динамике системы. Структурные повреждения являют собой «исчезновение» целой части самолета, например, элеронов, руля направления, руля высоты или части крыла.

Для математического представления переходных процессов в системах автоматического управления и последующей разработки концепции отказоустойчивого адаптивного управления динамическими системами было проведено моделирование основных типов отказов приводов управляющих поверхностей.

Отказы приводов представляют собой сбои в работе системы управления, например в результате гидравлических утечек, разрыва кабелей или заклинивших рулей. Такие отказы могут

быть смоделированы как внезапное изменение номинального управляющего воздействия.

Мультипликативное моделирование чаще всего используется для представления отказов датчиков и приводов. Мультипликативные отказы приводов напрямую не влияют на динамику управляемой системы, но они могут существенно влиять на динамику системы с обратной связью. На рис. 6–9 отображены примеры различных типов отказов привода, которые приводят к неустойчивости системы с обратной связью. На рис. 5 показана модель привода, состоящая из передаточной функции  $S(S) = 1/(S - 1)$ , контролируемой пропорционально-интегральным регулятором с передаточной функцией  $C(S) = 1,5 + 5/S$ . Синусоидальный опорный сигнал отслеживается при нормальных условиях эксплуатации и после момента времени возникновения отказа  $t_f$ .

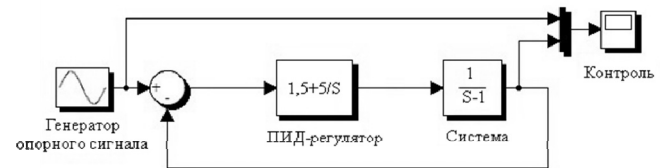


Рис. 5. Модель привода в среде Matlab

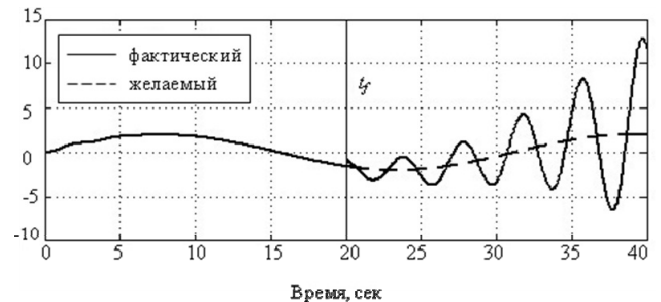


Рис. 6. Потеря эффективности привода

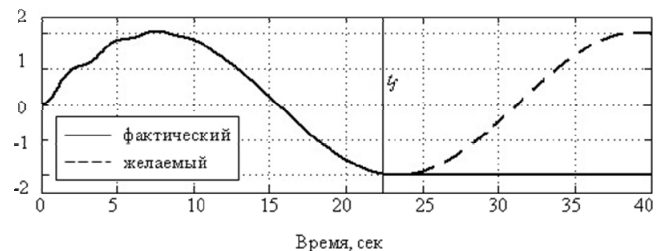


Рис. 7. Блокировка привода на месте

Этот пример показывает, что даже «простые» ошибки могут значительно ухудшить производительность и дестабилизировать систему. От-

метим, что мультипликативное моделирование, используемое для отображения широкого спектра отказов датчиков и приводов, не может быть использовано для отображения отказов более сложных систем.

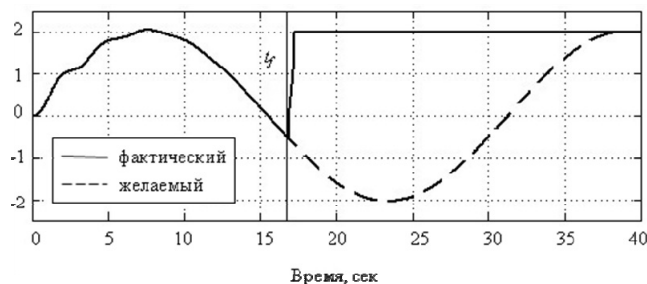


Рис. 8. Внезапная перегрузка привода

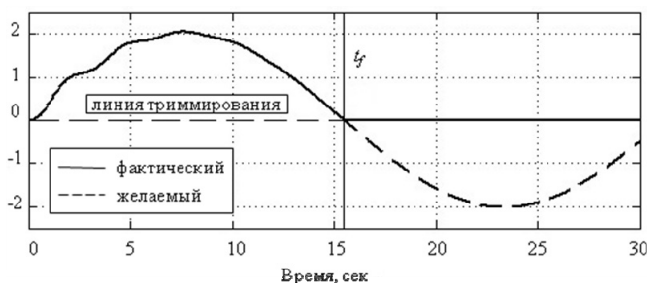


Рис. 9. Плавающий отказ привода

### Концепция адаптивного управления в обеспечении безопасности полетов

Сегодня пути и способы предотвращения авиационных происшествий на различных типах самолетов существенно различаются между собой и в ряде случаев недостаточно эффективны. Поэтому задача состоит в том, чтобы при ограниченных ресурсах выбрать направления, реализация которых может дать наибольший суммарный эффект по предотвращению авиационных происшествий при меньших затратах материальных средств.

Известно, что при современном уровне развития мировой авиационной науки и техники невозможно создать абсолютно безотказные системы самолета. Поэтому при его проектировании предусматривается возможность безопасного завершения полета при отказах в системах путем резервирования, применения высоконадежных составных частей, т.е. обеспечивается отказобезопасность.

Итак, для удовлетворения жестких требований норм летной годности системы управле-

ния полетом многократно резервированы. Тем не менее, увеличение степени физического резервирования не только предполагает более высокие издержки производства и обслуживания, но и есть причиной увеличения веса. Производительности многократно резервированных систем не достаточно для эффективного решения ситуаций с неожиданными или множественными отказами. Очевидными недостатками резервирования, кроме увеличения габаритов и массы системы, есть так же повышенный расход энергии. При этом усложняется проверка систем и их обслуживание. Так как количество отказов увеличивается из-за увеличения количества аппаратуры. Резервирование уменьшает полезную нагрузку и увеличивает себестоимость систем.

Развитие бортовых компьютеров позволяет создавать более сложные системы управления. Создание новых способов управления, разрабатываемых для поддержания производительности и стабильности систем в случае отказов, позволяет снизить кратность резервирования при одновременном повышении уровня безопасности полетов.

Ситуация, в которой оказывается самолет в любой момент, может изменяться заранее и непредсказуемо. Система управления самолетом должна быть в состоянии эффективно приспосабливаться к этим изменениям путем оперативного изменения параметров и/или структуры используемых законов управления. Удовлетворить это требование позволяет аппарат теории адаптивного управления [3].

Такое свойство системы, как адаптация, придает ей схожесть с живыми организмами. Им так же присущи постоянство внутренней среды, которое колеблется в строго очерченных границах, и наличие совокупности механизмов, поддерживающее это постоянство. В биологии это называется *гомеостазис*. Распространим действие принципа гомеостазиса и на системы управления воздушным судном на том основании, что для нормального функционирования этих систем также важны задачи технологического самосохранения благодаря механизмам саморегуляции. Для технических систем одна

из задач – удержание существенных переменных в допустимых пределах. Существует два понятия гомеостаза.

*Функциональный гомеостазис* – это свойство системы обеспечивать при решении любой из своих частных или общих задач наличие некоторой совокупности стабильных в определенных пределах своих функциональных поведений.

*Технологический гомеостазис* – это свойство системы поддерживать свои существенные переменные в допустимых пределах [19].

Одним из эффективных подходов к реализации концепций адаптивного управления есть подход, основанный на методах и средствах самонастраивающихся систем.

В то же время один из классов самонастраивающихся систем – это системы с настройкой по динамическим характеристикам, работа которых связана с поддержанием некоторого определенного показателя качества, помимо работы по обычному замкнутому циклу автоматического управления.

Если в качестве управляемого объекта рассматривается летательный аппарат, то он может быть представлен как динамическое звено, входными координатами которого есть отклонения рулей, а выходными – кинематические параметры движения самолета. Для описания движения самолета может быть принята та или иная математическая модель, структура которой зависит от принятых упрощающих предположений, а параметры – от режима полета и внешних возмущений, действующих на самолет.

Однако при синтезе систем управления самолетом приходится учитывать различные факторы неопределенности:

- погрешность аэродинамических характеристик самолета, на основе которых проводится синтез контура управления;
- смещение центровки и изменение веса самолета в полете, вызванное выгоранием топлива и сбросом полезной нагрузки;
- неполнота математических моделей, описывающих систему управления и пространственное движение самолета;

- возможность повреждений несущих и управляющих аэродинамических поверхностей.

Разрабатываемый алгоритм адаптации, основан на поддержании на уровне эталонных значений параметров системы по принципу функционального самовосстановления.

**Заключение.** Из сказанного следует, что управление движением современных самолетов приходится обеспечивать в условиях значительных и разнообразных неопределенностей в значениях параметров и характеристик, режимов полета, воздействий внешней среды. Кроме того, в ходе полета могут возникать разнообразные нештатные ситуации, в частности, отказы оборудования и повреждения конструкции, которые необходимо парировать путем реконфигурации системы управления и органов управления самолета.

Несмотря на многочисленные научные публикации, многие результаты численного моделирования и некоторых испытаний, выполненных на реальных прототипах, применение отказоустойчивого управления все еще очень ограничено. Таким образом, методы физического резервирования продолжают выполнять существенную роль в обеспечении безопасности полетов.

Проведенные исследования показывают, что подход к управлению сложными нелинейными динамическими системами в условиях неопределенности, реализуемый с использованием механизмов адаптации, позволяет системе управления эффективно приспосабливаться к изменению текущей ситуации, включая и возникновение разнообразных отказных ситуаций.

Разработка и внедрение самовосстанавливающейся системы управления самолетом, соответствующая принципам функционального гомеостаза, позволит решить задачи:

- уменьшения психофизиологической нагрузки на экипаж при парировании отказов системы управления самолетом, что повлечет снижение влияния человеческого фактора на безопасность полета;
- снижения степени физического резервирования элементов системы управления самолетом;

- повышения безопасности авиационных перевозок в условиях постоянного роста их интенсивности;

- использования всех имеющихся исправных поверхностей управления и двигателей самолета, что позволит парировать отказы систем автоматического управления (САУ) с меньшей затратой энергии;

- снижения веса системы управления и уменьшения расхода топлива;

- снижения стоимости систем управления и расходов на их эксплуатацию;

- повышения коммерческой рентабельности авиационных перевозок.

Повышение безопасности воздушных перевозок – бесконечный процесс, и создание оперативно самовосстанавливающейся системы станет важным шагом на пути к достижению этой цели.

1. *CIVIL Aviation Safety Data 1993–2007. Technical report*, Civil Aviation Authority of the Netherlands (CAA-NL), – ICAO, Montreal, 2008. – 146 p.
2. *ICAO Глобальный план обеспечения безопасности полетов – 2013*, – ICAO, Montreal, 2013. – 76 p.
3. *Буков В.Н.* Адаптивные прогнозирующие системы управления полетом. – М.: Наука, 1987. – 232 с.
4. *Рутковский В.Ю.* Работы института проблем управления в области беспойсковых адаптивных систем и систем управления космическими аппаратами // *Автоматика и телемеханика*. – 1999. – № 6. – С. 42–49.
5. *Рутковский В.Ю.* Управление объектами космической и авиационной техники // *Проблемы управления*. – 2009. – № 3. – С. 87–93.
6. *Кожукало В.В.* Теория и применение самонастраивающихся систем: Сб. ст. – Киев: Техніка, 1968 – 342 с.

7. *Костюк В.И.* Беспойсковые градиентные самонастраивающиеся системы. – Там же, 1969. – 276 с.
8. *Александров А.Г.* Оптимальные и адаптивные системы. – М.: Высш. шк., 1989. – 263 с.
9. *Кухтенко А.И.* Проблема инвариантности в автоматике. – Киев: Гостехиздат УССР, 1963. – 376 с.
10. *Соколов Н.И., Рутковский В.Ю., Судзиловский Н.Б.* Адаптивные системы автоматического управления летательными аппаратами. – М.: Машиностроение, 1988. – 208 с.
11. *Фомин В.Н., Фрадков А.Л., Якубович В.А.* Адаптивное управление динамическими объектами. – М.: Наука, 1981. – 546 с.
12. *Фрадков А.Л.* Адаптивное управление в сложных системах (беспойсковые методы). – Там же, 1990. – 355 с.
13. *Земляков С.Д., Рутковский В.Ю.* О некоторых результатах развития теории и практического применения беспойсковых адаптивных систем // *Автоматика и телемеханика*. – 2001. – № 7. – С. 103–121.
14. *Жирабок А.Н., Шумский А.Е., Бобко Е.Ю.* Метод отказоустойчивого управления нелинейными динамическими системами: логико-динамический подход // *Проблемы управления*. – 2010. – № 2. – С. 11–18.
15. *Blanke M., Kinnaert M., Staroswiecki M.* *Diagnosis and Fault-Tolerant Control*. – Berlin: Springer, 2003. – 571 p.
16. *Alwi H., Edwards C.* *Fault Detection and Fault-Tolerant Control Using Sliding Modes*. – Ibid, 2011. – 340 p.
17. *Уткин В.И.* Скользящие режимы и их применения в системах с переменной структурой. – М.: Наука, 1974. – 272 с.
18. *Никифоров В.О., Фрадков А.Л.* Схемы адаптивного управления с расширенной ошибкой // *Автоматика и телемеханика*. – 1994. – № 9. – С. 3–22.
19. *Павлов В.В.* *Начала теории эргатических систем*. – К.: Наук. думка, 1975. – 240 с.

Поступила 13.10.2014  
Тел. для справок: +38 044 544-4349, 063 744-0342,  
095 346-9153 (Киев)  
E-mail: [komko08@mail.ru](mailto:komko08@mail.ru), [dep185@irtc.org.ua](mailto:dep185@irtc.org.ua)  
© В.В. Павлов, Н.Н. Комар, 2014