

Энергетическое, металлургическое и химическое машиностроение

УДК 621.5, 62-551.42, 51-37

doi: 10.18698/0536-1044-2021-5-60-75

Проблемы моделирования рабочих процессов пневмогидравлических систем и агрегатов на различных этапах жизненного цикла изделия

Ю.В. Кюрджиев

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Problems of Modeling Working Processes in Pneumohydraulic Systems and Units at Various Stages of the Product Life Cycle

Yu.V. Kyurdzhiev

Bauman Moscow State Technical University

Приведен результат анализа задач сопровождения бортовых пневмогидравлических систем и агрегатов с точки зрения требований полноты и оперативности запрошенной информации. Показано, что современное состояние средств моделирования рабочих процессов этих систем не в полной мере удовлетворяет задачам сопровождения на всех этапах жизненного цикла изделия. Предложены подход к моделированию пневмогидравлических систем и агрегатов, а также способы уменьшения времени от момента постановки задачи, требующей разработки новой математической модели, до получения адекватных результатов моделирования. Работоспособность предлагаемого подхода продемонстрирована на примере регулятора давления, работающего в динамическом режиме. Показаны возможности и способы реализации средств моделирования на основе предложенного подхода.

Ключевые слова: моделирование, пневматические и пневмогидравлические системы, жизненный цикл изделия

The article presents the result of the analysis of the problems of maintenance of on-board pneumatic systems and units in terms of the requirements for completeness and efficiency of the requested information. It is shown that the current state of the workflow modeling tools of these systems do not fully meet the maintenance requirements at all stages of the product life cycle. An approach to modeling pneumohydraulic systems and units is proposed, as well as ways to reduce the time from the moment of setting a problem requiring the development of a new mathematical model to obtaining adequate simulation results. The efficiency of the proposed approach is demonstrated by the example of a pressure regulator operating in a dynamic mode. The possibilities and ways of implementing modeling tools based on the proposed approach are shown.

Keywords: simulation of working processes, pneumatic system, pneumatic unit, product life cycle

Анализ состояния и перспектив развития отечественной пилотируемой космонавтики указывает на дальнейшее наращивание и внедрение перспективных пилотируемых космических комплексов: завершение развертывания российского сегмента Международной космической станции (МКС) вводом в ее состав новых модулей (многоцелевого лабораторного, узлового, научно-энергетического) и создание модернизированной серии транспортно-грузового корабля «Прогресс МС».

В качестве стратегической перспективы развития отечественной пилотируемой космонавтики сформулированы предложения по национальной программе исследования и освоения Луны [1].

Современные бортовые системы ракетно-космической техники могут содержать десятки и даже сотни агрегатов пневматических и пневмогидравлических систем (ПГС). На борту сложных долговременных пилотируемых комплексов (например, российского сегмента МКС) непрерывно в течение десятков лет эксплуатируются агрегаты, входящие в состав различных ПГС. К ним относятся системы ориентации, стабилизации и управления, системы обеспечения теплового режима и газового состава, системы хранения и подачи газа, средства водообеспечения, объединенные двигательные установки и др.

Насыщенность ПГС агрегатами автоматики, значительная протяженность трубопроводов, достигающая в одном изделии нескольких километров, с большим количеством соединений увеличивает вероятность возникновения неисправностей и отказов [2].

Функционирование агрегатов бортовых систем в условиях ограниченности ресурсов накладывает на них такие специфические требования, как ограничения массогабаритных параметров, высочайший уровень надежности, минимальная потребляемая мощность, жесткие требования к ресурсу, долговременный срок эксплуатации, невозможность замены агрегата, повышенные требования к стабильности характеристик (в том числе после длительного хранения в складских и полевых условиях), широкий диапазон условий эксплуатации (температуры окружающей среды при колебаниях внешнего давления и наличии перегрузок), зачастую перекрывающий заложенный при проектировании.

Решение задач разработки и сопровождения современных пневмогидравлических систем и

агрегатов (ПГСИА) в составе пилотируемых и беспилотных бортовых систем осложнено рядом проблем, некоторые из которых перечислены далее.

Значительное количество ПГСИА разрабатывалось в последней четверти XX века — в эпоху бурного развития и становления ракетно-космической техники. Эти изделия доказали надежность, их эксплуатация и производство продолжают. В результате разрыва производственно-технологических цепочек и необходимости переноса производства на территорию РФ часто в качестве исходной информации имеется только конструкторская документация и результаты наземных и лётно-космических испытаний (ЛКИ).

Проблемы создания новых, воспроизведения разработанных ранее и эксплуатации действующих бортовых ПГСИА усугублены тем, что комплексы функционируют в единичных экземплярах, потребность в производстве агрегатов для них редко достигает тысяч единиц в год, что повышает затраты на разработку и эксплуатацию этих систем.

На этапе разработки ПГСИА их параметры эксплуатации определены техническим заданием. В процессе ЛКИ параметры эксплуатации и характеристики ПГСИА уточняются и часто расходятся с заложенными в техническом задании.

Особенности эксплуатации и сопровождения бортовых (в том числе пилотируемых) ПГСИА требуют надежного прогноза. При этом критическим фактором получения прогноза для задач оперативного управления является дефицит времени.

Рассмотрим задачи разработки и эксплуатации бортовых ПГСИА с учетом требований оперативности решений. Пример иерархии задач сопровождения разработки и эксплуатации бортовых ПГСИА с учетом требований оперативности решений и полноты информации, необходимой для принятия решений, приведен на рис. 1.

Минимальное располагаемое время на принятие решений обусловлено задачами оперативного контура сопровождения. Соотношения располагаемого времени на принятие решений продемонстрированы на примере парирования нештатной ситуации (НС) на борту космического аппарата.

Под НС понимается переход в процессе эксплуатации бортовой системы космического аппарата в состояние или конфигурацию, приво-



Рис. 1. Пример иерархии задач сопровождения разработки и эксплуатации бортовых ПГСИА с учетом требований оперативности решений и полноты информации, необходимой для принятия решений

дующую к существенному изменению плана работ с объектом управления. НС, для которой выполнен анализ влияния на ход полета и предусмотрена программа действий по ликвидации или компенсации последствий, называют расчетными, а НС, причиной которой является не рассмотренный заранее отказ, — нерасчетной. Нештатную ситуацию, приводящую к необходимости спасения экипажа, принимают за аномальную ситуацию (АС). Циклограмма действий в рамках оперативного контура управления при возникновении АС приведена на рис. 2.

В случае расчетной НС или АС время обнаружения и идентификации T_2 определяется полнотой и оперативностью телеметрической информации в рамках решения задач анализа текущего состояния системы и идентификации НС (см. рис. 1). Процесс принятия решений допускает автоматизацию.

Для нерасчетной НС или АС оценка интервала располагаемого времени на остановку развития и нормализацию АС $\tau_{\text{реш}}$ требует оперативного анализа, включая разные гипотезы о причинах, вызвавших НС, прогноз развития НС для различных вариантов управляющих воздействий [3]. Необходима оперативная проверка этих гипотез. Парирование ситуации включает в себя ряд задач оперативного конту-

ра управления. Главным требованием для решения этих задач является надежный прогноз в условиях дефицита времени.

Анализ иерархии задач информационного сопровождения разработки и эксплуатации бортовых ПГСИА (см. рис. 1) и циклограммы действий при возникновении АС (см. рис. 2) показывает, что на различных этапах жизненного цикла изделия (ЖЦИ) ПГСИА требования к их информационному сопровождению существенно меняются как по полноте информации, так и по оперативности.

В отличие от концепции CALS, определяемой как совокупность принципов и технологий информационной поддержки ЖЦИ на всех ее стадиях и предполагающей основной целью минимизацию затрат в ходе ЖЦИ, повышение его качества и конкурентоспособности [4], важнейшей задачей сопровождения ПГСИА является обеспечение достоверного прогноза состояния системы в условиях ограниченной исходной информации и дефицита времени.

Надежный прогноз можно получить на основе экспериментальной отработки изделия или путем моделирования. Натурные испытания с экипажем на борту ограничены, поэтому в подавляющем большинстве случаев проводят наземные испытания ПГСИА с имитацией реальных условий эксплуатации.

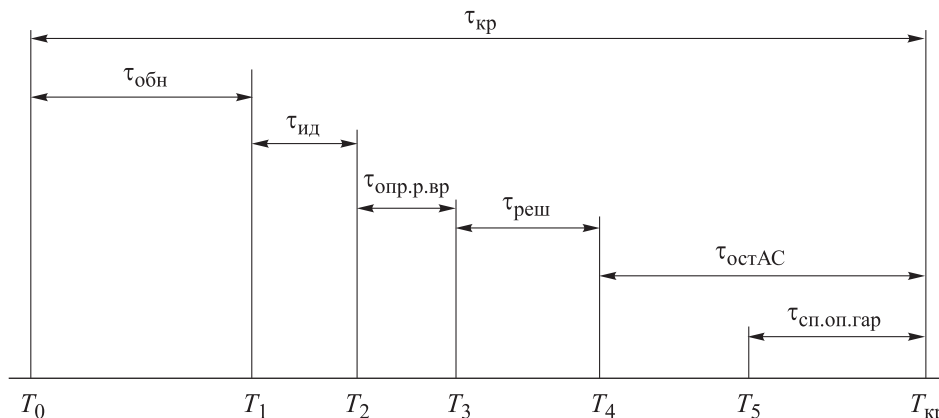


Рис. 2. Циклограмма действий при возникновении АС:

T_0 — время возникновения АС; T_1 — время обнаружения АС; $\tau_{обн}$ — интервал времени существования НС до ее обнаружения; $\tau_{ид}$ — интервал времени идентификации АС, $\tau_{ид} = T_2 - T_1$; $\tau_{опр.р.вр}$ — продолжительность определения интервала располагаемого на принятие решения времени, $\tau_{опр.р.вр} = T_3 - T_2$; $\tau_{реш}$ — интервал располагаемого времени на остановку развития и нормализацию АС, $\tau_{реш} = T_4 - T_3$; $\tau_{кр}$ и $T_{кр}$ — интервал развития и время достижения критической фазы развития АС; $\tau_{остАС}$ — располагаемое время на остановку развития и нормализацию АС, $\tau_{остАС} = T_{кр} - T_4$; $\tau_{сп.оп.гар}$ — гарантированная длительность операции по спасению экипажа, $\tau_{сп.оп.гар} = T_{кр} - T_5$

Стендовые испытания предполагают наличие экспериментальных стендов. Такие стенды, как правило, узко специализированы, дороги в эксплуатации, трудно поддаются модернизации и требуют значительных затрат времени на подготовку и проведение комплекса испытаний. В полной мере их нельзя задействовать в оперативном контуре управления для решения срочных задач.

Метод численного моделирования лишен перечисленных недостатков. Для ряда ситуаций, требующих оперативного вмешательства в программу полета, результат численного моделирования может выступать единственным источником достоверного прогноза. Однако использование численного моделирования ограничено отсутствием виртуальных стендов и адекватных цифровых моделей эксплуатируемых ПГСИА.

Для информационного сопровождения бортовых ПГСИА на разных этапах ЖЦИ для неодинаковых задач часто актуализируются неизвестные на этапах разработки требования к моделям (по критерию адекватности, параметрам, точности, детализации, полноте, скорости расчета и т. д.), а также уровни абстрагирования математических моделей (ММ), разбиения системы на составляющие подсистемы.

Для полноценного информационного сопровождения бортовых ПГСИА на различных этапах ЖЦИ требуется широкий спектр отрабатанных действующих моделей каждого агрегата и системы в целом.

В отечественной и зарубежной литературе имеется значительное количество работ, посвященных вопросам разработки математических моделей ПГС. При этом такие работы носят разрозненный характер, отражая лишь частные вопросы разработки моделей конкретных технических устройств [5–7].

В настоящее время задачи сопровождения ПГСИА не обеспечены надежным прогнозом, соответствующим современным требованиям по критериям оперативности и полноты информации. Рассмотрим возможные пути обеспечения информационного сопровождения ПГСИА в течение ЖЦИ.

В парадигме четвертой промышленной революции (Индустрии 4.0) неотъемлемым требованием для высокотехнологичных предприятий является цифровая трансформация производства. Ключевую роль в этом процессе занимает использование цифрового проектирования и моделирования, применяемого на этапе проектирования, включая НИР, ОКР, производство и сопровождение вплоть до утилизации.

Разработка и сопровождение бортовых ПГСИА в парадигме Индустрии 4.0 позволяет полностью обеспечить информационное сопровождение бортовых ПГСИА в ЖЦИ. Однако существующие системы эксплуатируются вне этой парадигмы. Это можно объяснить следующими основными причинами:

- при разработке бортовых ПГСИА не использовалось сквозное цифровое проектирование и моделирование;

- нет общей концепции разработки и реализации ММ бортовых ПГСИА;

- отсутствуют системы взаимосвязанных адекватных ММ ПГСИА и их составляющих; каждая из существующих ММ разработана под узкие задачи, их адаптация к новым задачам и сопряжение друг с другом затруднены и часто невозможны;

- сложность разработки новых и адаптации существующих ММ на основе конструкторской документации; документация не предназначалась для разработки ММ;

- уникальность требований и критериев адекватности ММ для различных неизвестных наперед задач сопровождения (по точности, типам входных и выходных параметров, требованиям моделирования в нерасчетных диапазонах входных параметров ММ); неопределенность критериев выбора соответствующей модели;

- дефицит времени на разработку новой модели в рамках оперативного контура сопровождения изделия.

Отсюда следует, что в рамках существующих подходов и условий эксплуатации бортовых ПГСИА невозможно создать широкий спектр

отработанных, взаимосвязанных, действующих моделей каждого агрегата бортовой ПГС и системы в целом.

Необходим инструмент, позволяющий создавать такие модели с наперед заданными параметрами, удовлетворяющие критериям адекватности для появляющихся задач разработки и информационного сопровождения ПГСИА в процессе ЛКИ. Для создания подобного инструмента необходимо разработать:

- обобщенный (унифицированный) подход к моделированию, создав среду моделирования динамических рабочих процессов ПГСИА в составе пневмосистем при создании новых и эксплуатации существующих ПГСИА;

- обобщенную ММ рабочих процессов ПГСИА в составе пневмосистемы;

- метод унификации структур моделирования рабочих процессов ПГСИА;

- открытую (наращиваемую) систему взаимосвязанных адекватных ММ ПГСИА и их составляющих;

- концепцию взаимодействия виртуальной и физической моделей ПГСИА.

В рамках реализации обобщенного подхода к моделированию рабочих процессов ПГСИА

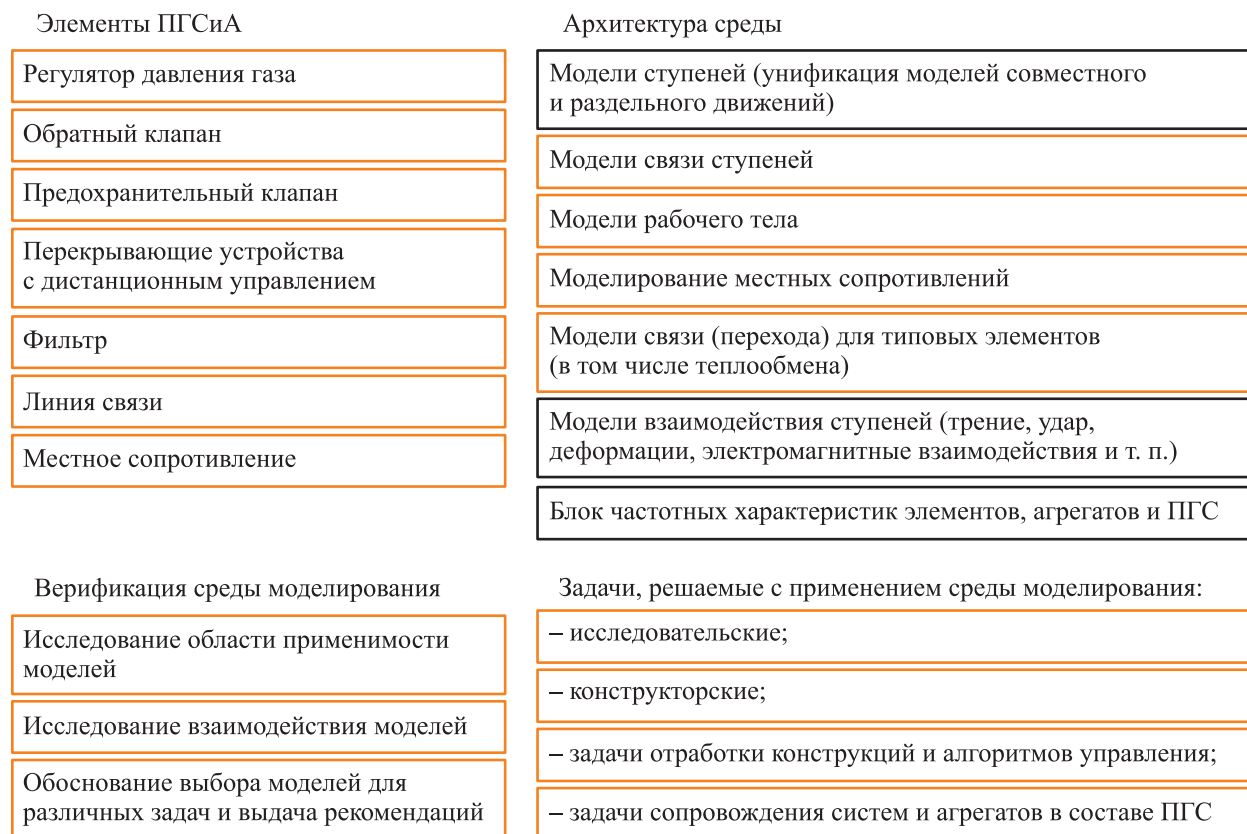


Рис. 3. Пример ЦП пневмогидравлической сети

предлагается разработать и использовать цифровой паспорт (ЦП) ПГСИА с целью решения следующих задач:

- минимизации времени разработки (генерации) новых ММ с заданными параметрами;
- аккумулирования опыта использования ММ ПГСИА на всех этапах ЖЦИ, т. е. обеспечить системе возможность обучения;
- минимизации времени экспертизы (экспертного заключения об адекватности модели текущей задаче информационного сопровождения ПГСИА).

ЦП — это формализованная база знаний об информационном сопровождении изделия, в том числе история использования среды моделирования. В минимальной реализации ЦП ПГСИА содержит информацию четырех категорий. Во-первых, расчетные схемы агрегатов и глобальную расчетную схему пневмогидравлической сети. Во-вторых, сведения о разработанных ранее моделях, их характеристики и свойства. В-третьих, задачи, решаемые с помощью разработанных ранее моделей и критерии их адекватности для этих задач. В-четвертых, сведения о реализации этих моделей в среде моделирования и расчета, задействованные модули среды, особенности их применения и настроек. Возможная структура ЦП пневмогидравлической сети приведена на рис. 3.

При использовании ЦП в рамках предлагаемого подхода процесс разработки или генерации новых ММ включает в себя ряд последовательных этапов, в том числе:

- анализ (декомпозицию как составную, более узкую часть анализа);

• синтез — преобразование системы, модели, реализующей поставленную цель из заданных или определяемых подмоделей (структурно связанных и устойчивых);

• макетирование — апробацию, исследование структурной связности, сложности и устойчивости с помощью макетов или подмоделей упрощенного вида, у которых функциональная часть упрощена (хотя вход и выход подмоделей сохранены);

• экспертизу, экспертное оценивание — операцию или процедуру использования опыта, знаний, интуиции, интеллекта экспертов для исследования или моделирования плохо структурируемых и формализуемых подсистем исследуемой системы.

Анализ. Для решения задач разработки ММ на первом этапе предлагается унифицированный подход к моделированию сложных ПГСИА, в рамках которого ПГС рассматривают как совокупность типовых элементов: проточных полостей, ступеней — твердых тел, перемещающихся как одно целое, и силовых элементов: пружины, элемента трения, поршня, сальфона и т. д.

Взаимодействие типовых элементов осуществляется путем совершения работы, тепло- и массообмена и описывается уравнениями кинематических связей и граничными условиями (рис. 4). При моделировании силовых элементов учитываются газовые силы (в том числе газодинамические), силы упругости и трения. Силы иной природы, например, электромагнитной, учитываются в ступенях как внешние.

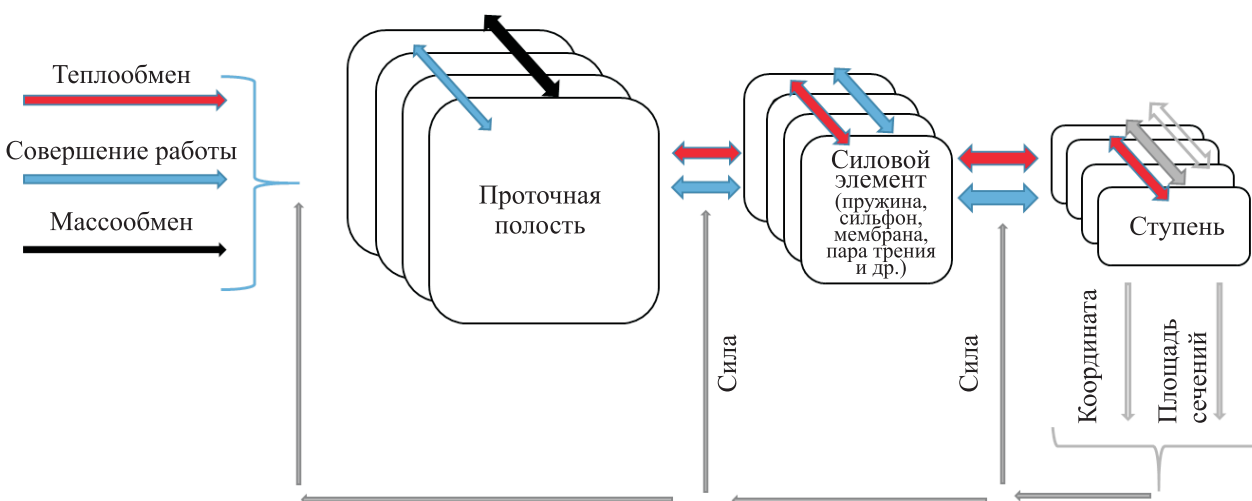


Рис. 4. Представление ПГС как совокупности типовых элементов, взаимодействующих путем силового энерго- и массообмена

Однако в рамках предлагаемого подхода может быть создан силовой элемент типа электромагнитной силы. Зависимости, в которых учтены различные условия и особенности процессов, широко представлены в справочной литературе.

Синтез. Предлагаемый подход позволяет моделировать простейшие элементы конструкций пневмоагрегатов и на их базе строить сложные ПГСИА. Эти модели следует разрабатывать с учетом требований согласованности входных/выходных параметров и граничных условий.

В качестве примера рассмотрим несколько таких простейших элементов конструкций. Модель упругого элемента (пружины и пары трения) как комбинация типовых элементов приведена на рис. 5. Пружина (в контуре) — совокупность силового элемента и ступени. Пружина кинематически связана с парой внешних ступеней, что дает возможность рассчитать силы упругости и представить их как граничные условия для уравнений динамики каждой из моделей внешних ступеней.

Сама пружина обладает массой и, следовательно, имеет свойства ступени, что позволяет учесть массу пружины в общей модели динамики составных элементов агрегата. Наличие ступеней допускает возможность теплообмена и его включение в граничные условия для уравнений теплового баланса.

Трение. Для модели трения уравнения динамики не решают, используют ступень с «нулевой» массой. Соответственно, уравнения теплового баланса учитывают работу трения, ко-

торая задана в качестве граничных условий для уравнений динамики и теплового баланса внешних ступеней.

Модель взаимодействия полости и элемента конструкции — поршня, мембраны, упругой стенки — как комбинация типовых элементов приведена на рис. 6. Поршень представляет собой силовой элемент и ступень. Связи с внешними полостями и ступенями позволяют сформировать граничные условия для уравнений динамики ступени (поршня) с учетом газовых сил.

При необходимости могут быть решены уравнения теплового баланса поршня как элемента ступени, сформированы граничные условия для теплообмена внешних полостей и поршня.

Модель сальфона как комбинация составной модели поршня и пружины показана на рис. 7.

Обобщенная модель агрегата собирается из моделей типовых элементов и их связей как граничных условий. Уровень сложности ПГСИА ограничен только вычислительными мощностями и объемами оперативной памяти компьютеров.

Для каждого типового элемента разработана расчетная схема, на базе которой создаются ММ. Например, для расчетной схемы проточной полости, приведенной на рис. 8, ее локальную модель можно реализовать, используя уравнения состояния (УС): идеального газа, Дюпре — Абея, Ван-дер-Ваальса, Редлиха — Квонга, Дитеричи и других относительно простых уравнений, позволяющих аналитически

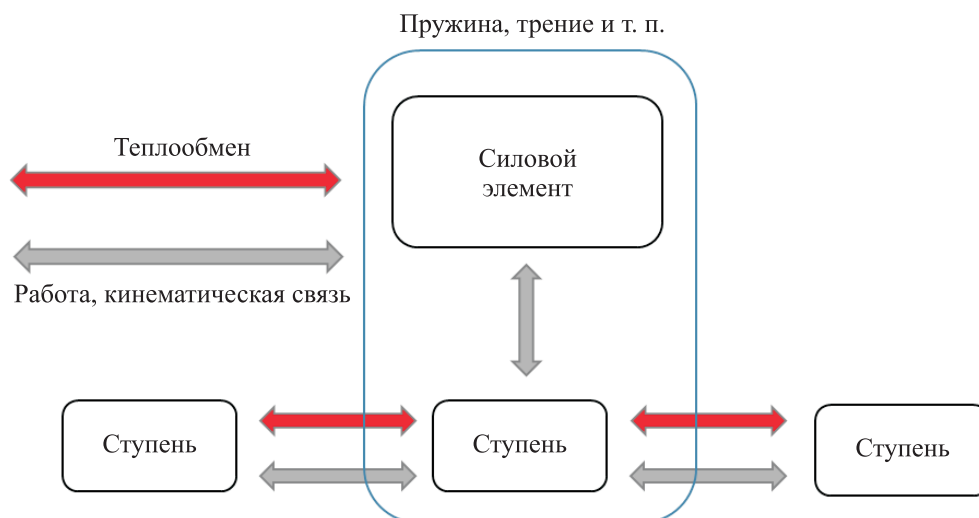


Рис. 5. Модель упругого элемента как комбинация типовых элементов

записать основные уравнения ММ в дифференциальном виде для давления, плотности и температуры T .

В работе [8] приведены системы уравнений для моделей открытых термодинамических систем, включающих в себя УС Дюпре — Абея, Ван-дер-Ваальса и Редлиха — Квонга, а также погрешности расчета основных термодинамических параметров РТ, описываемых этими уравнениями. Однако вопросы адекватности моделей, разработанных с использованием УС, для различных задач требуют отдельного анализа [9, 10].

Если для задач сопровождения необходимо выполнить расчет параметров агрегата ПГС с учетом фазовых переходов РТ или параметров, описываемых этими уравнениями с большой погрешностью, то в качестве УС можно использовать уравнение в вириальной форме. Коэффициенты вириальных зависимостей приведены в справочной и научной литературе, например, в работе [11]. Широкое распространение получили модели РТ с применением коэффициентов сжимаемости в УС [8].

Если параметры рабочих процессов в агрегате известны, а расчету подлежит вся система

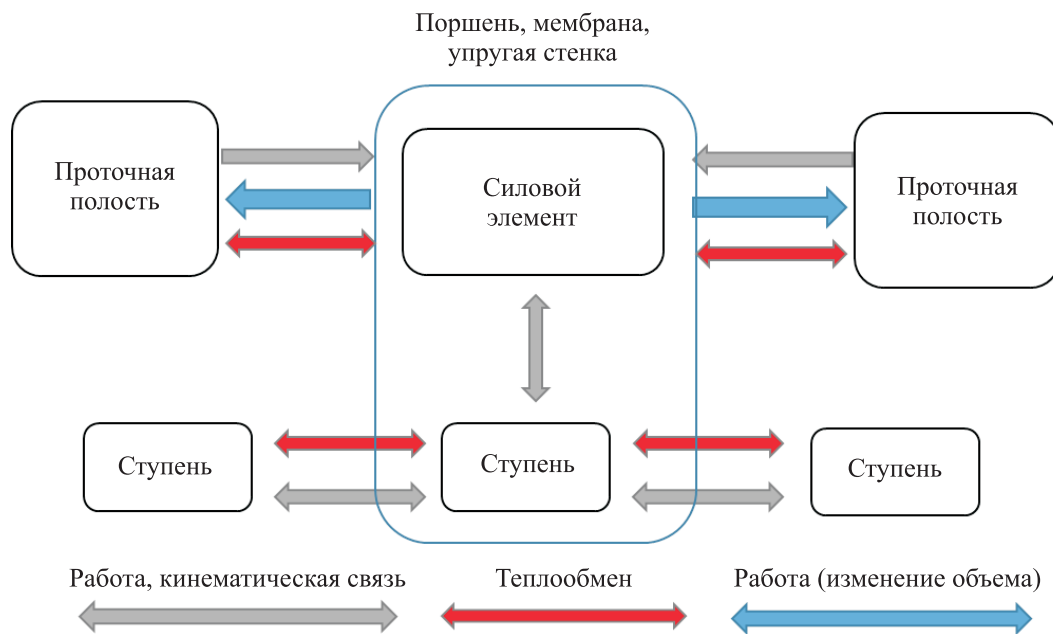


Рис. 6. Модель взаимодействия полости и элемента конструкции (поршня, мембраны, упругой стенки) как комбинация типовых элементов

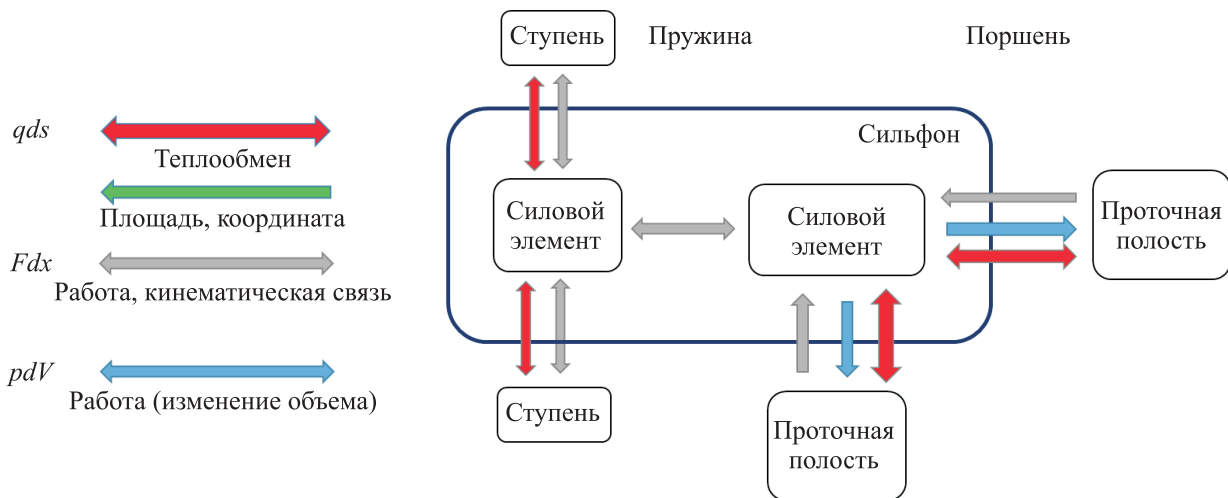


Рис. 7. Модель сильфона как комбинация составной модели поршня и пружины

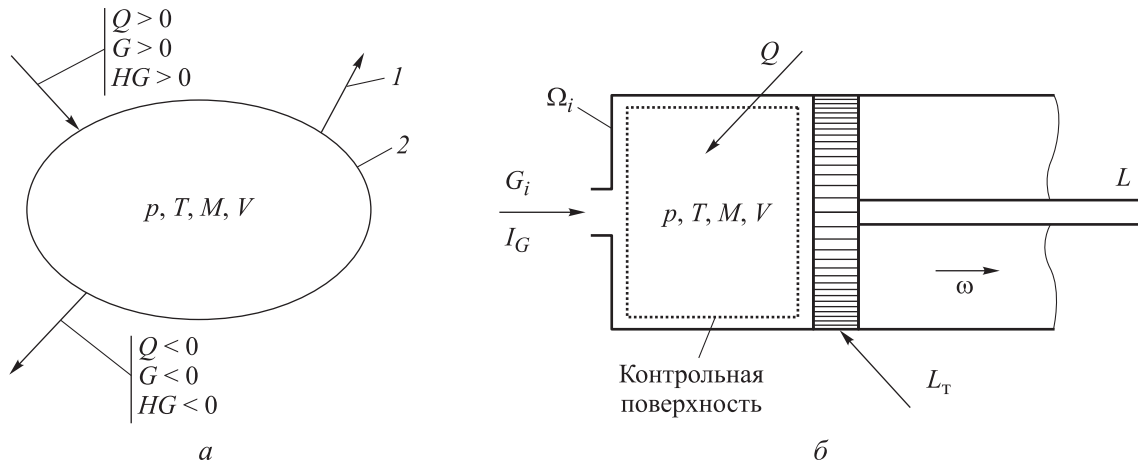


Рис. 8. Схема проточной полости как открытой термодинамической системы (а) и расчетная схема проточной полости (б):

1 — внешняя нормаль к контрольной поверхности; 2 — контрольная поверхность; Ω_i и ω — элемент i -й контрольной поверхности и его скорость; Q — теплообмен между рабочим телом (РТ) и внешней средой; G_i — массообмен между РТ и внешней средой через i -й элемент поверхности; I_G — энергообмен между РТ и окружающей средой, обусловленный массообменом; L — работа внешних сил над РТ; L_T — работа неконсервативных сил, часть которой затрачивается на изменение внутренней энергии РТ; p, T, M и V — давление, температура, масса и объем РТ в проточной полости соответственно

как целое, то для ее сборки удобно применить схематизацию рабочего процесса [12].

Основным требованием к моделям на базе различных УС, различающихся как формой записи, так и допущениями, заложенными в их основу, остается согласованность входных/выходных параметров и граничных условий. Чтобы обеспечить согласованность локальных моделей типовых элементов в глобальной модели ПГСИА, необходимо выполнить требования согласования для различных моделей.

Предлагаемый подход к моделированию сложных систем предполагает сборку глобальной расчетной схемы пневмоагрегата или ПГС из расчетных схем типовых элементов и их связей. Локальная ММ каждого типового элемента, входящего в состав глобальной расчетной схемы ПГСИА, создается (загружается из базы моделей) для соответствующего типового элемента.

Эти локальные модели, интегрированные в глобальную расчетную схему, составляют ММ всего агрегата. Возможность интегрирования локальных моделей в глобальную расчетную схему обеспечивается выполнением требований согласования входных/выходных параметров и граничных условий всех разрабатываемых ММ типовых элементов.

Так как для локальных ММ не указаны допущения, на основе которых они созданы, глобальная модель (модель всего агрегата или системы) допускает совместное использование

одинаковых типовых элементов с ММ разной степени полноты и точности. Например, при расчете сложной пневмосистемы одну часть проточных полостей рассчитывают по моделям, основанным на допущениях уравнения идеального газа, а другую — с учетом фазового перехода. Для ступеней, упругих элементов и трения ситуация аналогична.

Модели агрегатов, созданных на основе предлагаемого подхода, также можно интегрировать в общую модель пневмосистемы.

Таким образом, унифицированный подход позволяет разрабатывать адекватные ММ ПГСИА. Критерии адекватности определяются поставленной задачей информационного сопровождения ПГСИА в ЖЦИ.

Разработка глобальной расчетной схемы агрегата является необходимым этапом предлагаемого общего подхода. По результатам анализа возможных расчетных схем предлагается разрабатывать глобальные расчетные схемы типовых объектов на основе классификации агрегатов ПГС (рис. 9).

Шаблоны расчетных схем собирают из типовых элементов так же, как и элементы типа пружины, поршня и сильфона (см. рис. 5–7). Подобный подход обладает гибкостью: пользователь может самостоятельно модифицировать или создать любой шаблон. Типовые шаблоны предназначены для ускорения и автоматизации генерирования моделей ПГСИА.



Рис. 9. Классификация агрегатов пневматических систем для разработки шаблонов глобальных расчетных схем типовых агрегатов

Работоспособность унифицированного подхода продемонстрирована на примере расчета регулятора давления «после себя» (РДПС) — сложного агрегата ПГС, работающего в динамическом режиме. Предварительно на основе классификации РДПС, приведенной на рис. 10,

разработан ряд шаблонов их расчетных схем. Классификация позволяет сформировать расчетную схему, уточнить направления массовых потоков, сил, действующих на ступени и т. п.

При разработке модели РДПС использованы данные исходной конструкторской документа-

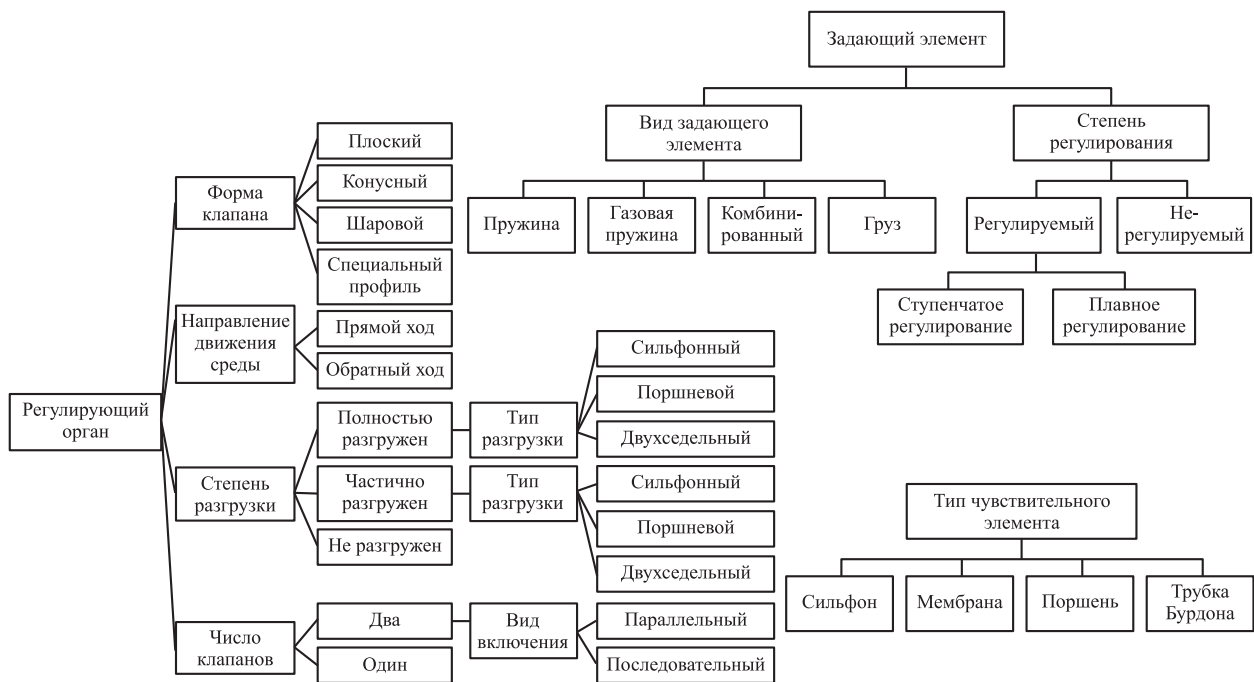


Рис. 10. Классификация РДПС для генерации шаблонов расчетных схем

ции, не предназначенной для получения ММ: геометрические размеры, жесткости задающей пружины, род РТ, диапазоны давления РТ на входе и расхода газа на выходе. За критерий адекватности принят заданный в паспорте РДПС диапазон поддерживаемого давления в объекте регулирования.

Наличие чертежа позволяет установить тип РДПС в соответствии с классификацией (см. рис. 10) и сгенерировать расчетную схему (рис. 11, б). Согласно классификации, представлен РДПС обратного хода, регулирующий орган неуравновешен. Чувствительный элемент — мембрана, задатчик давления — металлическая пружина.

Согласно расчетной схеме РДПС (см. рис. 11, б), входными параметрами являются давление на входе (параметр граничных условий — полость Π_0) и расход газа из объекта регулирования G_{34} . Объект регулирования — полость Π_3 , расход газа определяется давления-

ми объекта регулирования, полостью на выходе Π_4 и диаметром дросселя 34 (на рисунке не показан). Граничные условия могут изменяться в процессе расчета.

Если расчет проводят только для РДПС, то изменения граничных условий осуществляет оператор. При расчете РДПС в составе пневматической сети граничными условиями являются внешние типовые элементы — полости и каналы. Данные этих моделей определяют параметры РТ на входе (в том числе давление) и его расход газа на выходе.

Результаты расчета в виде зависимостей параметров РДПС от времени t приведены на рис. 12. В процессе вычислений входные параметры РДПС изменялись: при $t = 0,85$ с давление на входе p_0 увеличивается скачком до 2 МПа, при $t = 0,89$ с оно скачком падает до 1 МПа, а при $t = 0,93$ с расход газа на выходе из объекта регулирования G_{34} возрастает до 0,085 кг/с.

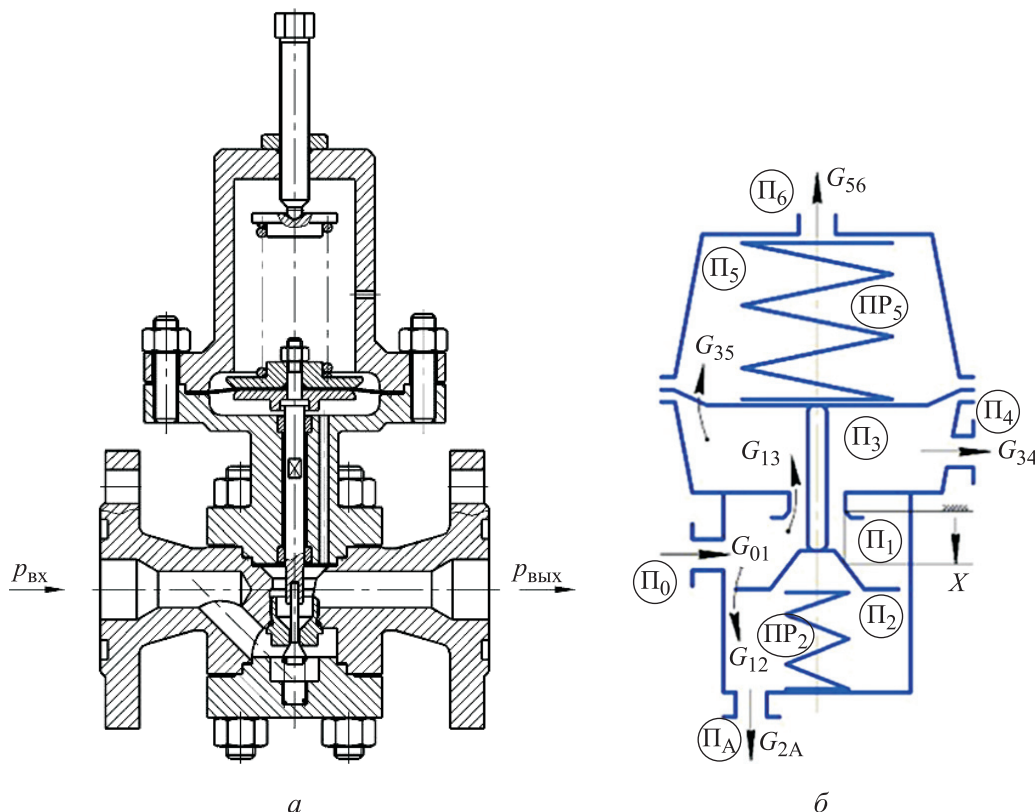


Рис. 11. Схемы, позволяющие установить тип РДПС:

a — упрощенный чертеж по данным конструкторской документации, не предназначенной для разработки модели (с известными геометрическими размерами, родом газа, диапазоном давления на входе в РДПС, диапазоном расхода газа из объекта регулирования (РДПС); $p_{вх}$, $p_{вых}$ — давление на входе и выходе соответственно;

б — сгенерированная расчетная схема РДПС (X — координата клапана; $\Pi_0 \dots \Pi_6$ — проточные полости РДПС; G_{01} и G_{34} — расход РТ на входе в объект регулирования и на выходе из него; Π_A — полость окружающей среды; G_{56} , G_{35} , G_{34} , G_{01} , G_{12} , G_{13} , G_{2A} — расходы РТ между полостями соответственно Π_5 и Π_6 , Π_3 и Π_5 , Π_3 и Π_4 , Π_0 и Π_1 , Π_1 и Π_2 , Π_1 и Π_3 , Π_2 и Π_A)

Графики демонстрируют циклограмму работы РДПС: массовый баланс в объекте регулирования соблюден, исполнительный орган отрабатывает изменения входных параметров. Результаты расчета показали, что при изменении входных параметров в пределах, указанных в конструкторской документации, давление в объекте регулирования поддерживается в диапазоне настройки.

Таким образом, предлагаемый общий подход к моделированию рабочих процессов бортовых систем и агрегатов позволяет разрабатывать адекватные взаимосвязанные ММ сложных ПГСИА с использованием информации конструкторской документации, не предназначенной для разработки моделей. При этом разработанные ММ агрегатов можно интегрировать в более общие модели пневматических и пневмогидравлических систем.

Унификация структур моделирования позволяет автоматизировать процесс генерации расчетных схем с применением широкого спектра ММ типовых элементов низшего уровня, приводя к сокращению времени разработки и расчета глобальной модели.

Предлагаемый подход включает в себя разработку и использование среды моделирования динамических рабочих процессов ПГСИА для решения задач сопровождения в процессе ЖЦИ.

Архитектура среды моделирования допускает несколько вариантов реализации. *Первый вариант* предполагает разработку адаптируемых расчетных схем с возможностью увеличения их количества в процессе эксплуатации. Настройка расчетной схемы после загрузки в память компьютера осуществляется на основе классификации ПГСИА путем исключения из нее первоначально заложенных элементов (т. е.

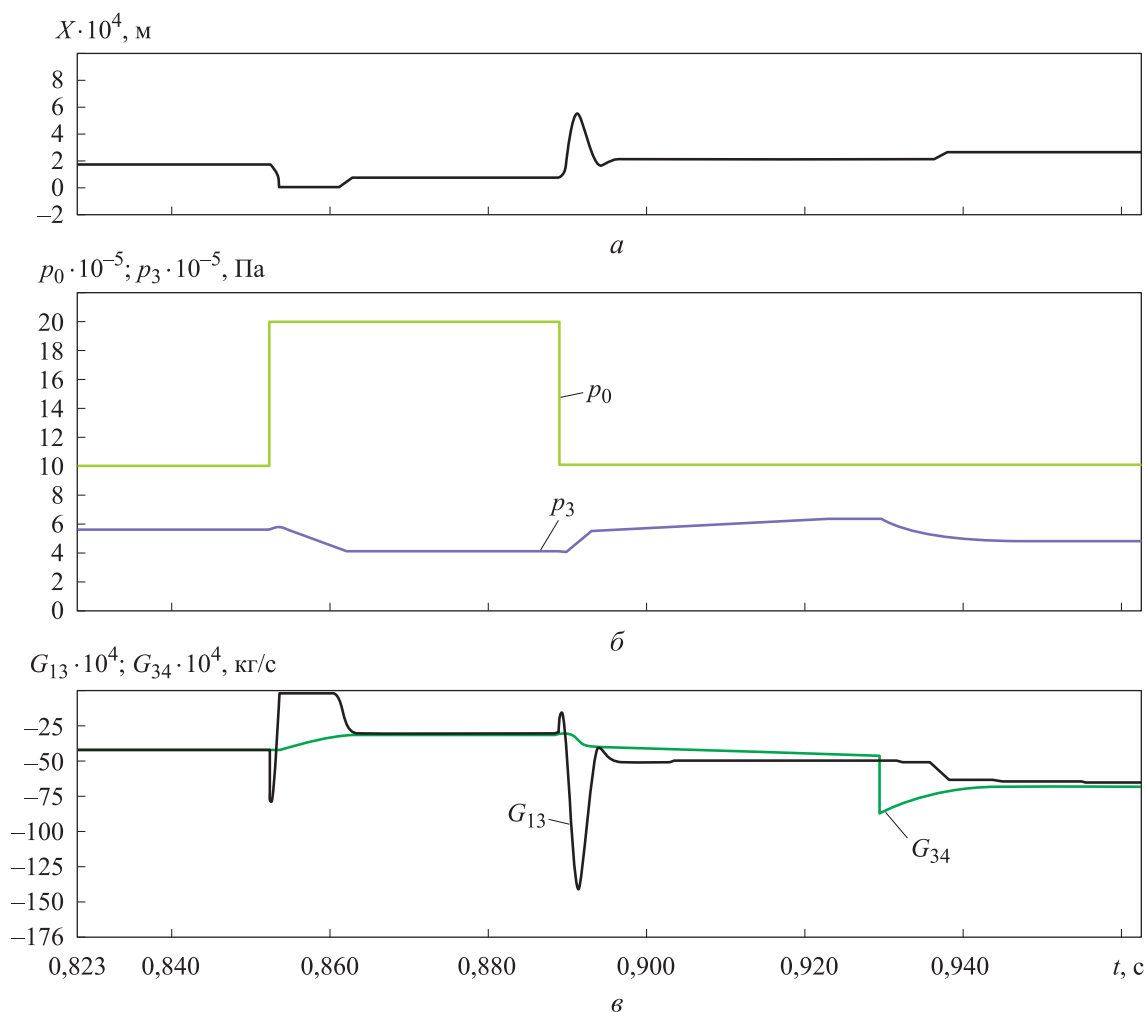


Рис. 12. Зависимости параметров РДПС от времени t :
 а — координаты клапана X ; б — давлений РТ на входе p_0 и в объекте регулирования p_3 ;
 в — расходов газа на входе в объект регулирования G_{13} и на выходе из него G_{34}

деактивацией связей и типовых элементов в расчетной схеме) или изменения знака взаимодействия связи (например, при расчете упругих элементов, что обеспечивает весь спектр вариантов установки пружин).

Предполагается открытая архитектура программного комплекса. Такой алгоритм назван динамически формируемой расчетной схемой. При этом допускается интегрировать полученные расчетные схемы и ММ на их основе в общую глобальную модель ПГСИА. Пример реализации такой архитектуры приведен в работе [13].

Второй вариант предполагает реализацию на базе подходов объектно-ориентированного программирования. Расчетная схема генерируется в памяти компьютера на основе классификации ПГСИА. Объем схемы в памяти компьютера определяется расчетной схемой, которая не требует дальнейшей настройки. Предполагается открытая архитектура программного комплекса. Допускается интегрирование ММ в общую глобальную модель. Пример реализации такой архитектуры [14] и сравнительный анализ эффективности программного комплекса приведены в работе [15].

К достоинствам объектно-ориентированного подхода относятся возможность распараллеливания работ по созданию ММ, переносимость и гибкость архитектуры, слабая зависимость от программных платформ, повторное использование программных компонентов, естественность описания моделей и связей. Недостатком такого подхода является более продолжительное (в 2...3 раза большее), чем у процедурного подхода, время расчета. Однако это не сказывается на суммарной продолжительности реализации расчетов [15].

По сравнению с процедурным объектно-ориентированный подход представляется более

перспективным для задач разработки системы взаимосвязанных ММ.

В рамках реализации концепции взаимодействия виртуальной модели и физического ПГСИА возможны два варианта. Первый применим, если программно-аппаратный комплекс расчета математической модели ПГСИА, сбора данных и подачи команд может быть реализован как система реального времени. В этом случае возможна эмуляция физической модели ПГСИА и выдача сигналов, имитирующих показания датчиков, установленных на физической модели ПГСИА.

Во втором варианте допускается использовать программный комплекс как источник набора данных для алгоритмов глубокого обучения нейронных сетей или встраиваемых систем [16]. В настоящее время подобные системы получают все более широкое распространение [17].

Выводы

1. Анализ задач сопровождения бортовых ПГСИА с точки зрения требований полноты и оперативности запрошенной информации показал, что современное состояние средств моделирования рабочих процессов этих систем не в полной мере удовлетворяет задачам сопровождения на всех этапах жизненного цикла изделия.

2. Подтверждена работоспособность предлагаемого подхода к моделированию ПГСИА и способов уменьшения времени от момента постановки задачи, требующей разработки новой ММ, до получения адекватных результатов моделирования.

3. Показаны возможности, ограничения применимости и способы реализации средств моделирования на основе предложенного подхода.

Литература

- [1] Микрин Е.А. Научно-технические проблемы реализации проекта «Пилотируемые космические системы и комплексы». *Космическая техника и технология*, 2019, № 3, с. 5–19.
- [2] Беляев Н.М., Уваров Е.И., Степанчук Ю.М. *Пневмогидравлические системы. Расчет и проектирование*. Москва, Высшая школа, 1988. 271 с.
- [3] Павлов А.Н., Слинько А.А., Воротягин В.Н. Методика оценивания структурно-функциональной живучести бортовых систем малых космических аппаратов в условиях возникновения нерасчетных полетных ситуаций. *Информация и космос*, 2019, № 2, с. 139–147.
- [4] Судов Е.В. *Интегрированная информационная поддержка жизненного цикла машиностроительной продукции*. Москва, МВМ, 2003. 264 с.

- [5] Чернышев А.В., Пугачук А.С., Ворожеева О.А. Исследование течения рабочей среды в проточной полости элементов пневмогидравлических систем. *Омский научный вестник. Серия Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение*, 2019, т. 3, № 4, с. 36–42, doi: <http://dx.doi.org/10.25206/2588-0373-2019-3-4-36-42>
- [6] Пластинин П.И., Юша В.Л., Бусаров С.С. Анализ нестационарных температурных полей в стенках цилиндра компрессорной ступени. *Омский научный вестник*, 2006, № 5, с. 96–101.
- [7] Чернышев А.В., Коленко Н.Н., Мулюкин О.П. и др. Обеспечение эксплуатационной надежности трубопроводной арматуры транспортной техники с клапанно-седельной парой «конус — острая кромка» на этапе проектирования. *Вестник СамГУПС*, 2016, № 4, с. 21–29.
- [8] Арзуманов Ю.Л., ред. *Математические модели систем пневмоавтоматики*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 296 с.
- [9] Чернышев А.В., Кюрджиев Ю.В., Атамасов Н.В., Лебедев А.В. Обоснование выбора модели рабочего тела при расчете динамических параметров пневмогидравлических систем. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2018, № 9, с. 57–63, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2018-9-57-63>
- [10] Чернышев А.В., Атамасов Н.В. Рекомендации по моделированию процессов истечения в пневматических системах с учетом свойств реального газа на основе безразмерных критериев. *Компрессорная техника и пневматика*, 2017, № 3, с. 19–23.
- [11] Schmidt R., Wagner W. A new form of the equation of state for pure substances and its application to oxygen. *Fluid Phase Equilib.*, 1985, vol. 19, no. 3, pp. 175–200, doi: [https://doi.org/10.1016/0378-3812\(85\)87016-3](https://doi.org/10.1016/0378-3812(85)87016-3)
- [12] Пластинин П.И. *Поршневые компрессоры*. Т. 1. *Теория и расчет*. Москва, Колосс, 2006. 456 с.
- [13] Кюрджиев Ю.В., Чернышев А.В., Белова О.В. Моделирование агрегатов запорно-регулирующей арматуры на основе динамического формирования расчетной схемы. *Гидравлика*, 2017, № 4. URL: <http://hydrojournal.ru/images/JOURNAL/NUMBER4/Kv.pdf>
- [14] Опарин Д.М. *Разработка автоматизированной системы построения информационных моделей процессов управления пневмосистем на базе объектно-ориентированного подхода*. Дис. ... канд. тех. наук. Владимир, Владимир. гос. ун-т, 2002. 252 с.
- [15] Кюрджиев Ю.В., Чернышев А.В. Объектно-ориентированный подход в моделировании агрегатов пневматических систем. *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2014, № 11. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_22749637_87127816.pdf
- [16] Зеленев М.С. *Разработка метода расчета и алгоритма управления позиционным пневмоагрегатом*. Дис. ... канд. тех. наук. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. 122 с.
- [17] Чернышев А.В., Атамасов Н.В., Зеленев М.С. Применение концепции киберфизических систем в проектировании газового оборудования нового поколения. *Компрессорная техника и пневматика*, 2018, № 2, с. 19–22.

References

- [1] Mikrin E.A. Nauchno-tehnicheskie problemy realizatsii proekta “Pilotiruemye kosmicheskie sistemy i komplekсы”. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2019, no. 3, pp. 5–19 (in Russ.).
- [2] Belyaev N.M., Uvarov E.I., Stepanchuk Yu.M. *Pnevmogidravlicheskie sistemy. Raschet i proektirovanie* [Pneumohydraulic systems. Calculation and design]. Moscow, Vysshaya shkola publ., 1988. 271 p.
- [3] Pavlov A.N., Slin’ko A.A., Vorotyagin V.N. Technique of evaluation of structural and functional survivability of on-board systems of small spacecraft under conditions of the off-design flight situations occurred. *Informatsiya i kosmos*, 2019, no. 2, pp. 139–147 (in Russ.).

- [4] Sudov E.V. *Integrirrovannaya informatsionnaya podderzhka zhiznennogo tsikla mashinostroitel'noy produktsii* [Integrated information support of machine building products life cycle]. Moscow, MVM publ., 2003. 264 p.
- [5] Chernyshev A.V., Pugachuk A.S., Vorozheeva O.A. The analysis of working medium flow through flow cavity elements of pneumatic-hydraulic systems. *Omsk Scientific Bulletin. Series "Aviation-Rocket and Power Engineering"*, 2019, vol. 3, no. 4, pp. 36–42 (in Russ.), doi: <http://dx.doi.org/10.25206/2588-0373-2019-3-4-36-42>
- [6] Plastinin P.I., Yusha V.L., Busarov S.S. Analysis of changing temperature fields in walls of compressor's stage cylinder. *Omsk Scientific Bulletin*, 2006, no. 5, pp. 96–101 (in Russ.).
- [7] Chernyshev A.V., Kolenko N.N., Mulyukin O.P., et al. Maintainability engineering of pipeline fittings for transport technique with valve-saddle pair "cone-sharp edge" at design stage. *Vestnik SamGUPS*, 2016, no. 4, pp. 21–29 (in Russ.).
- [8] *Matematicheskie modeli sistem pnevmoavtomatiki* [Mathematical models of pneumoautomatic systems]. Ed. Arzumanov Yu.L. Moscow, Bauman Press, 2009. 296 p.
- [9] Chernyshev A.V., Kyurdzhiev Yu.V., Atamasov N.V., et al. Justification of the working medium model selection for calculation of dynamic parameters of pneumohydraulic systems. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2018, no. 9, pp. 57–63 (in Russ.), doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2018-9-57-63>
- [10] Chernyshev A.V., Atamasov N.V. Selection of mathematical models for discharge process in pneumatic systems with the assumption of the real gas using dimensionless criteria. *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika*, 2017, no. 3, pp. 19–23 (in Russ.).
- [11] Schmidt R., Wagner W. A new form of the equation of state for pure substances and its application to oxygen. *Fluid Phase Equilib.*, 1985, vol. 19, no. 3, pp. 175–200 (in Russ.), doi: [https://doi.org/10.1016/0378-3812\(85\)87016-3](https://doi.org/10.1016/0378-3812(85)87016-3)
- [12] Plastinin P.I. *Porshnevyye kompressory. T. 1. Teoriya i raschet* [Pneumatic pumps. Vol. 1. Theory and calculation]. Moscow, Koloss Publ., 2006. 456 p.
- [13] Kyurdzhiev Yu.V., Chernyshev A.V., Belova O.V. Modeling of blocking regulating equipment based on dynamic forming of analytical model. *Gidravlika*, 2017, no. 4 (in Russ.). Available at: <http://hydrojournal.ru/images/JOURNAL/NUMBER4/Kv.pdf>
- [14] Oparin D.M. *Razrabotka avtomatizirovannoy sistemy postroeniya informatsionnykh modeley protsessov upravleniya pnevmosistem na baze ob"ektno-orientirovannogo podkhoda*. Kand. Diss. [Developing automated system for building information models of control processes in pneumosystems based on object-oriented approach. Cand. Diss.]. Vladimir, Vladimir gos. un-t publ., 2002. 252 p.
- [15] Kyurdzhiev Yu.V., Chernyshev A.V. Object-oriented approach in modelling pneumatic systems devices. *Science and Education of the Bauman MSTU*, 2014, no. 11 (in Russ.). Available at: https://elibrary.ru/download/elibrary_22749637_87127816.pdf
- [16] Zelenov M.S. *Razrabotka metoda rascheta i algoritma upravleniya pozitsionnym pnevmoagregatom*. Kand. Diss. [Developing calculation method and control algorithm for positioning device. Cand. Diss.]. Moscow, Bauman MSTU publ., 2020. 122 p.
- [17] Chernyshev A.V., Atamasov N.V., Zelenov M.S. Cyberphysical systems conception application for modern gas equipment development. *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika*, 2018, no. 2, pp. 19–22 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 06.03.2021

Информация об авторе

КЮРДЖИЕВ Юрий Владимирович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Вакуумная и компрессорная техника». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: uribmstu@yandex.ru).

Information about the author

KYURDZHIEV Yuriy Vladimirovich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Vacuum and Compressor Equipment. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: uribmstu@yandex.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Кюрджиев Ю.В. Проблемы моделирования рабочих процессов пневмогидравлических систем и агрегатов на различных этапах жизненного цикла изделия. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 5, с. 60–75, doi: 10.18698/0536-1044-2021-5-60-75

Please cite this article in English as:

Kyurdzhiev Yu.V. Problems of Modeling Working Processes in Pneumohydraulic Systems and Units at Various Stages of the Product Life Cycle. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2021, no. 5, pp. 60–75, doi: 10.18698/0536-1044-2021-5-60-75



Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям учебное пособие

«Хладагенты и циклы парокомпрессионных холодильных машин»

**Авторы: А.А. Жердев, А.С. Кротов, А.В. Шакуров,
Е.М. Стриженов**

Предназначено для формирования у студентов системных знаний по основополагающим для принятия решений вопросам при проведении анализа и проектировании парокомпрессионных холодильных машин. Содержит подробное описание современных холодильных агентов и принципов их выбора. Описаны типовые одноступенчатые циклы и особенности их анализа. Представлены наиболее используемые многоступенчатые циклы холодильных машин и принципы сравнения их энергетической эффективности.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям подготовки 16.03.03, 16.04.03 «Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения», 16.05.01 «Специальные системы жизнеобеспечения», изучающих курсы «Теоретические основы холодильной техники» и «Холодильная техника».

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru