**СХЕМОТЕХНИЧЕСКОЕ И ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВАКУУМНОЙ КОММУТАЦИОННОЙ АППАРАТУРЫ**

ВВЕДЕНИЕ

Необходимость всесторонней интенсификации экономики неразрывно связана с ускорением научно-технического прогресса, важнейшими направлениями которого являются создание и освоение принципиально новой техники и технологии, автоматизация и механизация производства. Выполнение этих задач требует, в частности, развития вакуумной техники, оказывающей определяющее влияние на создание и производство изделий электроники и все более широко используемой в других отраслях промышленности.

Разработка новых вакуумных технологий предъявляет к вакуумному оборудованию повышенные требования, разнообразный и меняющийся диапазон значений которых обуславливает необходимость модернизации и разработки новых конструкций его элементной базы, в частности, вакуумной коммутационной аппаратуры (ВКА): клапанов, затворов, натекателей, служащих для периодического сообщения и герметичного перекрытия вакуумных коммуникаций и управления вакуумным режимом. Конструкцией и правильной эксплуатацией ВКА, являющейся неотъемлемой частью вакуумных систем (ВС), в значительной степени определяется надежность работы вакуумного технологического оборудования. (ВТО). Вместе с тем традиционное проектирование, основанное на интуитивно-эмпирическом подходе, исходя из уровня знаний конструктора, не удовлетворяет в полной мере ужесточившимся требованиям к созданию ВКА (например, необходимости минимального воздействия потоков газовыделения и загрязнений на технологическую среду оборудования производства изделий электронной техники, работе при температурах 600 - 800 К, повышению показателей надежности в десятки раз и т.д.), что особенно заметно на примере цельнометаллической ВКА, показатели качества которой, начиная с начала 70-х годов по существу не улучшаются. В связи с этим существующие конструкции громоздки, имеют небольшой ресурс и наработку на отказ. Ситуация осложняется отсутвием единого научно обоснованного подхода к проектированию ВКА, что приводит к неоправданному ее многообразию, низкому качеству конструкций и, как следствие, к отказам и простоям дорогостоящего оборудования при эксплуатации. Кроме того, проявляется тенденция к значительному уменьшению сроков проектирования ВКА, которая наряду с указанными факторами вызывает необходимость автоматизации процесса проектирования.

Одним из выходов из сложившейся ситуации является разработка и применение новых развивающихся методик проектирования, позволяющих генерировать множество различных технических решений и проводить целенаправленный их поиск и выбор, исходя из технического задания (ТЗ), имеющего жесткие и иногда полярные требования.

Изложенное определило цель настоящей работы, которой является создание научно обоснованной методологии схемотехнического и функционального проектирования ВКА, направленной на решение проблем проектирования ВКА, с конкретной реализацией в виде новых конструкций ВКА и программно-информационных средств, предназначенных для анализа, синтеза и моделирования работы ВКА.

Принципиально функциональное и схемотехническое проектирование ВКА, заключающееся в синтезе и анализе ВКА на этапе технического предложения и содержащее оценку свойств ВКА на основе исследования процессов ее функционирования, генерацию и выбор принципиальных технических решений, определяющих структуру ВКА с учетом специфики ее функционирования в составе конкретной ВС, можно представить в виде последовательности: цель проектирования - функция - устройство (элементная структура), которая обуславливает необходимость формального описания структур, функций, свойств, объектов для определения проектных целей в виде изменения структур ВКА и определения связей свойств ВКА для построения этих структур.

Более детально модель процесса проектирования ВКА на начальных стадиях можно представить в виде алгоритма, укрупненная блок-схема которого приведена на рис. 1.

Согласно представленной блок-схемы, ТЗ на разработку ВКА определяется требованиями к ВС, являющейся для ВКА объектом более высокого уровня, а начальным этапом создания ВКА является поиск аналогов. Это объясняется нецелесообразностью разработки новой конструкции ВКА при наличии среди существующих вариантов ВКА конструкции, полностью удовлетворяющей предъявленным требованиям.

В случае отсутствия аналогов необходимо проанализировать ТЗ для выявления заведомо завышенных требований с целью их смягчения. Если данная процедура не приводит к нахождению аналога, то переходят к поиску прототипа - конструкции ВКА, наиболее полно соответствующей требованиям ТЗ. Сравнение параметров выбранной конструкции ВКА с требуемыми (ТЗ) позволяет сформировать потребительские цели проектирования ВКА в виде необходимости изменения соответствующих значений параметров ВКА или ее структурных составляющих.

Цели и критерии позволяют конструктору осуществлять направленный поиск и синтез технических решений ВКА. Исходя из целей, определяют необходимые функции и функциональные модули, их реализующие. Вводя соответствующие отношения среди найденных функциональных модулей, получают возможные структуры ВКА, из которых с помощью критериев выбирают структуру, наиболее отвечающую предъявленным требованиям ТЗ (происходит достижение проектной цели).

Отсутствие среди известных удовлетворительной функциональной структуры или появление новых функций для достижения потребительской цели проектирования ВКА приводит к необходимости синтеза физического принципа действия ВКА, являющегося этапом ее функционального проектирования, появлению новых функциональных модулей и повторению этапов схемотехнического проектирования ВКА для синтеза ее оптимальной элементной структуры.

Анализ приведенного алгоритма проектирования показал, что, помимо отмеченного отсутствия системного описания ВКА, удобного для постановки задач схемотехнического и функционального проектирования, достижение поставленной цели осложнено также отсутствием исследований процесса функционирования ВКА с позиций схемотехнического проектирования; формального описания структур ВКА и процесса их синтеза; формализованных научно обоснованных методов принятия решений при конструировании ВКА, что позволило сформулировать следующие основные задачи, подлежащие решению: - проведение системного анализа ВКА; - разработка системной модели процесса проектирования ВКА; - разработка методики и математических моделей процесса проектирования ВКА на уровне формирования ее структурных схем; - построение и исследование модели функционирования ВКА; - разработка формализованных методов выбора и критериев оптимальности при структурном синтезе ВКА; - разработка комплекса программных средств автоматизации начальных этапов проектирования ВКА; - разработка новых конструкций ВКА на основе использования созданного методического и информационно-программного обеспечений.

На защиту выносятся:

1. Системные модели ВКА и процесса ее функционального и схемотехнического проектирования.

2. Методика и математические модели функционально-схемотехнического проектирования ВКА.

3. Математические модели ВКА на этапах функционального и схемотехнического проектирования.

4. Методика и математическая модель оценки конструкций ВКА и ее структурных составляющих.

5. Результаты исследования математической модели функционирования ВКА и критерии оптимальности конструкций ВКА.

6. Новый класс ВКА переменной структуры и конструкции ВКА.

I. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ РАБОТ ПО СОЗДАНИЮ ВАКУУМНОЙ

КОММУТАЦИОННОЙ АППАРАТУРЫ

I.I. Анализ связей ВКА с оборудованием электронной

техники. Основные требования, предъявляемые к

ВКА.

Вакуум как рабочая среда технологических процессов и научных исследований находит возрастающее применение в различных отраслях промышленности. При этом основным потребителем элементов, средств и систем вакуумной техники является электронная техника, предъявляющая наиболее жесткие, зачастую противоречивые и трудно реализуемые требования к создаваемым ВС.

Используемое в электронной технике вакуумное технологическое и научное оборудование, интервалы рабочих давлений основных типов которого приведены на рис. I.I., по величине рабочего давления можно условно разделить на три группы: 1) установки с рабочим давлением до 5 10 Па; 2) установки с рабочим давлением до 1 10 Па; 3) оборудование с рабочим вакуумом выше 1 10 Па.

Как правило, получение вакуума в оборудовании первой группы достигается применением паромасляных диффузионных насосов с ловушками, позволяющими исключить наличие углеводородных соединений в рабочей среде; герметизация разъемных соединений осуществляется резиновыми прокладками [I - 5]. Подобные установки относятся к непрогреваемым системам, длительность откачки которых определяется, в основном, десорбцией паров воды [6 - 8]. Дополнительными требованиями к установкам данного типа могут служить необходимость получения определенного спектра остаточных газов [9, 10], исключение привносимой дефектности на изделие электронной техники [11 15], высокая (до 1600 К) температура в рабочей камере и повышенные требования к надежности работы из-за значительного экономического ущерба в случае отказа [16 - 18].

Оборудование второй группы [19 - 24] обеспечивает получение более низких парциальных давлений остаточных газов. В данной группе оборудования, в основном, используют безмасляные (турбомолекулярные, магнито- и электро-разрядные насосы) и комбинированные средства откачки [25 - 27]. В качестве уплотнений разъемных соединений применяются металлические прокладки и прокладки, изготовленные из термостойкой резины [28, 29]. Как правило, установки второй группы прогреваются до 400 - 650 К (оборудование для откачки электровакуумных приборов частично до 950 К), имеют достаточно большое время достижения рабочего давления (от 5 до 20 часов) [19, 30 - 33] и более жесткие требования к привносимой на изделие дефектности [34].

К третьей группе оборудования принадлежат уникальные системыускорители заряженных частиц [35 - 38], камеры для космических исследований и ряд технологических установок и научных приборов [39, 40]. Их отличие от вакуумных систем второй группы состоит в необходимости предварительной обработки и очистки материалов для вакуумных систем, длительном времени прогрева и откачки, использовании только металлических уплотнителей в разъемных соединениях. При этом время существования высокого вакуума в рабочем объеме может длиться месяцами и годами [29, 41 - 43].

Общим требованием ко всем группам вакуумного оборудования является автоматизация технологических процессов и научного эксперимента [44 - 46].

В свою очередь, требования к вакуумному оборудованию формируют требования к его элементной базе, в том числе к ВКА, которая, являясь неотъемлемой частью ВС вакуумного оборудования (например, только в одно- и двухкамерных установках число коммутационных устройств колеблется от 5 до 10, достигая 15 [20, 47]), во многом определяет его выходные характеристики. Так, производительность оборудования первой и второй групп определяется не только его конструкцией (однопозиционные установки периодического действия, установки полунепрерывного действия со шлюзовыми камерами, установки и линии непрерывного действия и др.), но и сокращением времени достижения рабочего давления, зависящим, в частности, от проводимости ВКА [48, 49].

Следует отметить и наметившуюся в последнее время в производстве изделий электронной техники тенденцию к понижению рабочего давления до 10 - 10 Па вследствие существенного влияния давления и парциального состава газовой смеси на параметры и свойства изделий [1, 19, 40], т.е. к использованию высоко- и сверхвысоковакуумного оборудования, требующего прогрева до 700 - 800 К и, следовательно, применения цельнометаллической ВКА, позволяющей сократить время достижения сверхвысокого вакуума в 2,5 раза и упростить обслуживание установок [25, 41]. С учетом отмеченного во введении критического состояния проектирования цельнометаллической ВКА целесообразно выделить для детального рассмотрения области ее применения, которые показаны на рис. I.2.

При этом, несмотря на достаточно четкую границу между группами оборудования с одинаковыми вакуумными характеристиками и условиями эксплуатации, определяющими основные свойства ВКА, к ней предъявляется множество разнообразных дополнительных требований, зависящих от конкретного случая использования, что ведет к увеличению номенклатуры ВКА, затрудняя проведение унификации и стандартизации вакуумного оборудования и повышая трудоемкость его проектирования и изготовления.

Анализ длительности технологических циклов и ресурса работы оборудования, проведенный по работам [19, 20, 24, 47, 48], позволяет судить о требуемом ресурсе и цикличности работы ВКА и показывает, что число циклов работы клапанов и затворов лежит в пределах 500 - 8000, а в ряде установок, имеющих длительность технологического процесса порядка десятков секунд (например, электронно-лучевых установок микросварки), их ресурс должен быть значительно большим - 20000 - 50000. Кроме того, особенностью ВКА является кратковременный циклический режим работы с большими промежутками между включениями: отношение времени работы к времени выстоя очень различно и в среднем находится в пределах 1 : (100 - 10000). Суммарное время нахождения механизмов ВКА в динамическом состоянии до замены уплотнительной пары составляет для ВКА с металлическим уплотнителем в среднем примерно 2 - 4 часа, для ВКА с резиновым уплотнением - 20 - 50 часов.

Снижение рабочего вакуума накладывает дополнительные ограничения на разработку ВКА, связанные с необходимостью уменьшения влияния элементов вакуумной полости ВКА на параметры технологического процесса и учета привносимой дефектности [50, 51]. При этом ряд ответственных сверхвысоковакуумных систем, взамен большого ресурса работы ВКА выдвигает на первый план требования к быстродействию и высокой надежности ее работы [37, 39].

Таким образом, анализ назначения ВКА в свете задач, решаемых современным вакуумным оборудованием, позволил сформировать следующие основные требования, предъявляемые к ВКА.

ВКА должна: иметь заданную проводимость в открытом положении; обеспечивать требуемое быстродействие; гарантировать величину натекания в закрытом положении ВКА не выше допустимой (например, соизмеримой с уровнем газопроницаемости конструкционных материалов и материала уплотнителя); допускать эксплуатацию в диапазоне температур от 77 до 800 К; минимально воздействовать на качественный и количественный состав остаточной среды в вакуумной системе; иметь достаточные ресурс работы и наработку на отказ; предусматривать возможность автоматического управления и контроля за работой; обладать минимальными габаритами и весом; обеспечивать простой монтаж и демонтаж устройства; иметь высокие технолого-экономические показатели.

I.2. Функционально-структурный анализ ВКА.

Несмотря на все возрастающую потребность в ВКА, имеющаяся по ней литература весьма скудна, разрознена и носит большей частью описательный характер. В затрагивающих данную область работах практически отсутствуют методики проектирования ВКА, недостаточны рекомендации и данные по ее расчету и конструированию [20, 29, 5154], вследствие чего разработка конкретных устройств ВКА в большинстве случаев основывается на опыте конструктора. При этом отсутствие единого научно обоснованного подхода к проектированию ВКА затрудняет создание конструкции, имеющей наилучшие характеристики по всем показателям качества, поэтому существующие вакуумные клапаны и затворы удовлетворительно соответствуют лишь 3 - 4 показателям качества, что приводит к неоправданному многообразию их конструкций.

Достоинства и недостатки существующих конструкций ВКА рассмотрим на основе анализа информации, содержащейся в литературных источниках и каталогах отечественных предприятий-разработчиков и заводов-изготовителей и передовых в области вакуумного машиностроения иностранных фирм [20, 29, 51 - 67].

На рис. 1.3, 1.4 приведены примеры конструктивных схем ВКА, дающие представление о ее многообразии, на рис. 1.5 показаны основные принципиальные схемы ВКА, а на рис. 1.6 - типовые схемы ее уплотнительных пар.

Проанализируем существующие технические решения ВКА с позиций функционально-структурного подхода - реализации последовательности: цель - функция - устройство.

Плоский затвор (рис. 1.5 а, е), имеющий минимальное расстояние между присоединительными фланцами (цель), во избежание износа уплотнителя требует при перемещении улотнительного органа 1 для открывания или перекрывания проходного отверстия 2 создания гарантированного зазора между ним и корпусом 3, что приводит к необходимости осуществления в клапане двух не совпадающих по направлениям движений: перемещения уплотнительного органа 1 для открывания и перекрывания проходного отверстия 2 и герметизации уплотнительной пары (функция), а, следовательно, либо к появлению механизма 4 в вакуумной полости (рис. 1.5, а), либо к использованию двух исполнительных органов и соответственно двух вводов движения в вакуум 5,5 (рис. 1.5, е) (устройство). Оба решения существенно снижают надежность и ресурс работы устройства, а второе приводит и к усложнению управления затвором.

Отличительной особенностью схемы поворотного затвора, приведенной на рис. 1.5, б, является возможность совмещения в корпусе 3 проходного и углового взаиморасположения перекрываемых отверстий 2 (цель), а также совпадение направлений перемещения уплотнительного органа и усилия герметизации при уплотнении (функция). Однако поворотный затвор с непосредственным воздействием ведущего звена 6 на уплотнительный орган 1 (устройство) не получил широкого распространения вследствие необходимости создания значительных крутящих моментов при герметизации запорной пары.

Другие типы конструкций ВКА также обладают рядом недостатков. Работа крана (рис. 1.5, в) связана со скольжением уплотнительных поверхностей элементов 1 и 3 друг относительно друга, и, как следствие, подобные устройства имеют повышенное натекание и малый ресурс работы. К недостаткам конструкций, представленных на рис. 1.5 г, д, можно отнести использование механизма непосредственного действия [51], приводящего к повышенным массо-габаритным характеристикам автоматического привода.

Для приближенной обобщенной оценки качества конструкций ВКА, исходя из ее основного назначения, сформулированного во введении, предлагается использовать условный показатель, определяемый отношением проводимости ВКА к диаметру перекрываемого отверстия, изменение значения которого для некоторых серийно выпускаемых типов устройств приведено на рис. 1.7. Большее значение данного показателя определяет лучшую конструкцию.

Подобный показатель позволяет провести сравнение конструкций как в рамках одного типа устройств, так и сравнение устройств различных типов, а также оценить конструкции с нестандартными значениями диаметров перекрываемых отверстий. В частности можно отметить большую эффективность, по сравнению с угловыми конструкциями, конструкций с соосным расположением проходных отверстий (см. рис. 1.3 - 1.5), а среди последних - лучшие показатели плоских устройств (рис. 1.5, а). Обращает на себя внимание и трудность оптимизации конструктивных решений ВКА с малыми диаметрами условных проходов (Ду).

Изложенное позволяет сделать вывод о влиянии цели проектирования ВКА на ее рабочие функции и, как следствие, на структуру устройства. При этом можно выделить следующие основные структурные составляющие ВКА: привод, уплотнительная пара, корпус, ввод движения в вакуум и механизмы. С позиций решаемых задач целесообразно рассмотреть влияние указанных структурных элементов на показатели качества ВКА.

Существенно влияет на показатели качества ВКА используемый тип уплотнительной пары [51, 67].

В настоящее время в различных отраслях промышленности широко применяется ВКА с резиновым уплотнением (рис. 1.6, д, е). Однако, имея в десятки раз больший ресурс работы (20000 - 100000 циклов) и в 10 - 20 раз меньшие усилия герметизации [55] по сравнению с цельнометаллическими конструкциями, такая ВКА обладает рядом недостатков, ограничивающих область ее использования и заключающихся в невысоких температурных пределах прогрева, в значительной величине скорости газовыделения, относительно высокой газопроницаемости и влиянии на масс-спектрометрический состав вакуумной среды [7]. Лучшие марки вакуумных резин, применяемые в клапанах и затворах допускают прогрев только до 470 К, при этом величина скорости газовыделения лежит в пределах 3.10 - 7.10 л Па/см с, а величина газопроницаемости по азоту для этих марок при 1.10 Па и 300 К составляет 2.10 - 4.10 см см/см с [68, 69].

Широкое использование ВКА с эластомерными уплотнителями во многом вызвано отсутствием альтернативы, т.к. основные технические характеристики выпускаемых отечественной промышленностью устройств с металлическими уплотнителями (рис. 1.6, а - г) заметно уступают лучшим зарубежным образцам, особенно это касается прямопролетных конструкций [59], что наряду с отмеченными в п. 1.1 факторами определяет актуальность создания цельнометаллических устройств.

Разработка цельнометаллической ВКА требует пересмотра подхода к проектированию ВКА в связи с большими удельными усилиями герметизации (до 200 н/мм, [67, 70]), и необходимостью учета дополнительных факторов, не рассматриваемых при проектировании конструкций с резиновым уплотнением (например, обеспечения высокоточного взаиморасположения деталей уплотнительной пары в момент герметизации, влияния частиц износа на работоспособность уплотнителя и др. [34, 51, 67]. Перечисленные факторы определяют технологические трудности реализации конструкторских решений и высокую стоимость цельнометаллической ВКА.

В значительной степени влияет на основные характеристики функционирования коммутационных устройств ее привод [71]. Преобладающие типы приводов, используемых в ВКА, отражены на рис. 1.3, 1.4. Кратко можно отметить, что использование ручного привода исключает возможность автоматизации управления ВКА; электропневматический привод требует наличия энергоносителя и дополнительных устройств управления; электромеханический привод громоздок и инерционен; использование электромагнитного привода требует специальных источников питания и сопровождается сильными динамическими ударами, снижающими ресурс работы уплотнителя и создающими помехи в работе оборудования.

Свои особенности, связанные с надежностью, площадью поверхности, обращенной в вакуум, видом и характеристиками передаваемого движения и т.п., имеют и вводы движения в вакуум [53, 55, 72, 73], передавая свои достоинства и недостатки ВКА.

В большой степени разнообразие ВКА и ее выходные характеристики обусловлены применением в конструкциях различных механизмов, выполняющих следующие функции: преобразование вида движения ведущего звена и вида перемещения уплотнительного органа; изменение направления движения исполнительного органа; осуществление передаточных функций [74]. В ВКА различают механизмы исполнительных органов и механизмы уплотнительных органов [51]. Исполнительный орган состоит из ведущего звена и механизма перемещения. На рис. 1.8 показаны некоторые кинематические схемы исполнительных органов, которые могут располагаться как в вакуумной полости устройства, так и вне ее [54]. Механизмы исполнительного органа ВКА бывают непосредственного действия (рис. 1.8, а, б [51]); винтовые (рис. 1.8, в [53]), кулачковые (рис. 1.8 г [54]); кулисные (рис. 1.8, д, з [58]), рычажные (рис. 1.8, е [61]), кривошипно-ползунные (рис. 1.8 ж, з [56]) и комбинированные (например, рычажноползунные, рис. 1.8, и - м [63]). Основными функциями уплотнительного органа, состоящего из механизма герметизации и уплотнительного диска, является преобразование направления и вида движения выходного звена механизма перемещения и уменьшение усилий или крутящих моментов на ведущем звене устройства. Особенностью уплотнительных механизмов является их расположение в большинстве случаев в вакуумной полости.

На рис. 1.9 представлены некоторые кинематические схемы уплотнительных органов. К ним относятся кулачковые (рис. 1.9, б, ж [54]), ползунные (рис. 1.9, в [51]); клиновые (рис. 1.9, г [75]), винтовые (рис. 1.9, д [56]) механизмы.

Анализ проведенных работ выявил отсутствие исследований свойств механизмов ВКА с учетом специфики их функционирования, что объясняет многообразие встречающихся механизмов, но затрудняет обоснованный выбор структурных схем при создании новых конструкций ВКА. При этом наиболее жесткие требования к механизмам ВКА предъявляет сверхвысоковакуумное оборудование [51, 74], т.к. необходимость сохранения определенного состава остаточной газовой среды, высокие температуры прогрева, повышенный износ и коэффициент трения в вакууме требуют минимума сопряженных пар трения и малых контактных усилий, в то же время исключая возможность применения смазки [50].

Частично устраняют конструктивные трудности, связанные с необходимостью обеспечения значительных усилий устройства, использующие для герметизации: тепловое расширение материалов [67] и перевод металлического уплотнителя в жидкую фазу [76], однако подобные устройства обладают очень большой инерционностью.

Особенности кинематики и динамики механизмов ВКА наглядно характеризует упрощенная зависимость движущих моментов (или сил

) от угла поворота (или перемещения ) уплотнительного диска, представленная на рис. 1.10 и показывающая, что ВКА имеет две четко выраженные стадии работы с несоизмеримыми по величине усилиями и перемещениями: I - стадия открывания или перекрывания проходного отверстия, где необходимо создание малых усилий на значительном перемещении уплотнительного диска, определяемом величиной диаметра проходного отверстия (для устройств плоского типа) или высотой подъема уплотнительного диска (для прочих устройств); II - стадия герметизации проходного отверстия, в которой развиваются значительные усилия на небольших перемещениях, определяемых, в основном, величиной деформации элементов уплотнительной пары. При этом, в зависимости от Ду ВКА: = (15 - 200)/1, где

- перемещение (угол поворота) уплотнительного диска при открывании или закрывании проходного отверстия; ( ) - перемещение (угол поворота) уплотнительного диска при герметизации проходного отверстия; = (1000 - 2000)/1 - для ВКА с металлическими уплотнителями; = (80 - 250)/1 - для ВКА с эластомерными уплотнителями, где - усилие герметизации уплотнительной пары,

- усилие перемещения уплотнительного диска при перекрывании проходного отверстия.

Следует отметить, что существующие описания конструкций ВКА (в основном параметрические) ориентированы на конкретные типы устройств и их крайне трудно или невозможно применить для разработки ВКА других типов. Усугубляет ситуацию конструирования ВКА противоречивость отдельных требований. Так установленная существенная зависимость ресурса уплотнительной пары от скорости приложения к ней усилия и перегрузок [70] и связанная с этим необходимость уменьшения движущих моментов на ведущем звене устройства и скорости перемещения уплотнительного диска, противоречит требованию высокого быстродействия.

Из вышеизложенного можно сделать вывод, что ни одна из существующих конструкций ВКА не удовлетворяет полному набору современных требований, обладая теми или иными недостатками.

1.3. Структурно-конструктивная классификация ВКА.

Проведенный анализ литературных источников достаточно полно характеризует ситуацию, сложившуюся в области проектирования ВКА: отсутствует обоснованный анализ применяемых кинематических схем ВКА, а также рекомендации и данные по их расчету и конструированию, поэтому использование той или иной схемы носит эмпирический характер. Отсутствует единый подход к определению классификационных признаков ВКА и, как результат, не разработана ее детальная классификация. Существуют различия и в трактовании терминов. Например, в [58] клапаны - устройства с Ду до 100 мм, а затворы устройства с Ду свыше 100 мм; в [54] клапан - устройство, позволяющее регулировать или полностью прекращать поток газа в вакуумной системе, затвор - клапан, позволяющий соединять и разобщать элементы ВС. При этом оба варианта определения содержат противоречия, т.к. в первом случае одинаковые конструкции различных типоразмеров должны относиться к разным группам устройств, а во втором случае деление чисто условно, вследствие адекватности реально выполняемых клапанами и затворами функций. Все это приводит к многовариантности ВКА (например, только в одной организации за 13 лет было разработано более 100 наименований ВКА на 41 Ду [77]), затрудняет унификацию ВКА и требует разработки дополнительных критериев и ограничений применительно к конкретным ее типам.

Вместе с тем, представляется логичным проводить классификацию ВКА в соответствии с модульным принципом, положенным в основу функционально-структурного анализа существующих конструкций ВКА, с сохранением предварительного деления по эксплуатационным признакам (назначению: устройства напуска, аварийные и т.п.; рабочему давлению: низковакуумные, высоковакуумные, сверхвысоковакуумные и т.д. [78]).

С позиций решения задач функционального и схемотехнического проектирования ВКА, используя результаты проведенного на основе блочно-иерархического подхода с учетом монтажных и функциональных особенностей ВКА анализа ее существующих конструкций, выделим два иерархических уровня представления ВКА: устройство в целом и функциональные модули (ФМ), его составляющие. При этом каждый ФМ ВКА решает определенную задачу, хотя монтажно они могут быть неразделимы и иметь общие элементы, через которые осуществляется передача, например, усилий или момента от одного ФМ к другому. В конструкциях ВКА можно выделить шесть различных ФМ, причем четыре из них присутствуют у всех рассмотренных устройств, т.е. являются основными, обеспечивающими выполнение базовых функций ВКА, и неосновные, способствующие выполнению функций основных ФМ. К основным ФМ ВКА относятся: привод, генерирующий энергию для перемещения уплотнительного диска и герметизации уплотнительной пары; ввод движения, предназначенный для передачи движения из атмосферы в вакуумную среду без нарушения ее свойств; уплотнительная пара, реализующая основную функцию ВКА - перекрывание и герметизацию проходного отверстия; корпус, обеспечивающий требуемое взаиморасположение ФМ ВКА и присоединение самой ВКА в ВС. Особенностью подобного структурного членения является выделение в виде самостоятельного ФМ уплотнительной пары (включающей уплотнительный диск - ведомое звено уплотнительного органа, и седло - элемент корпуса), позволяющее более детально представить процесс герметизации. Следует отметить существование определенной последовательности основных ФМ в конструкциях ВКА, что позволяет представить обобщенную структуру ВКА в виде блок-схемы (рис. 1.11).

К неосновным ФМ ВКА можно отнести механизмы - ФМ, расположенные между основными ФМ и согласующие их входные и выходные характеристики (параметры движения).

Особую сложность вызвало проведение систематизации многообразия возможных схем механизмов ВКА с целью их упорядочения. Подробно решение данной задачи рассмотрено автором в [80], где предложена классификация ВКА, проведенная по структурно-конструктивным признакам: расположению и сочетанию механизмов относительно вакуумной полости и по типу механизмов. Предлагаемая обобщенная классификация ВКА приведена на рис. 1.12 и включает ее разбиение по признакам используемых механизмов. Подобная классификация дополняет известные и позволяет быстро находить возможные варианты механизмов при их конструировании, оценить их, установить наиболее оптимальные структуры механизмов ВКА, выявить необходимые типы автоматических приводов и вакуумных вводов движения.

1.4. Аналитический обзор методов поискового конструирования.

Необходимость учета труднообозримого множества различных факторов при разработке ВКА, возможность использования формальных представлений там, где заканчивается интуитивное мышление, проведение детального анализа как можно большего числа аналогов и прототипов, стремление к повышению эффективности разработок и росту производительности труда конструктора требуют перехода к автоматизированному проектированию ВКА.

При этом отмеченная стабильность структуры существующих конструкций ВКА, составные элементы которой выбираются, как правило, из систематизированных рядов, позволяет считать применимыми для процесса схемотехнического проектирования ВКА методы поискового конструирования.

Детальный анализ математических методов поискового конструирования и методов выбора технических объектов с позиций автоматизации процесса проектирования проведен автором в [81].

Рассмотрим основные методы, используемые при автоматизации начальных этапов проектирования, известные в отечественной и зарубежной практике, применительно к конкретному классу технических объектов - ВКА.

В настоящее время известно более 30 методов поискового конструирования. Разработки более эффективных методов поиска новых технических решений (ТР) интенсивно продолжаются, при этом прослеживаются три основных направления разработок [82 - 85]: создание принципиально новых методов, создание новых методов на основе комбинации известных и увеличение эффективности известных методов.

Анализ известных методов формирования ТР показал, что наиболее эффективными, а потому широко используемыми на практике, являются: "теория решения изобретательских задач" (ТРИЗ), метод эвристических приемов, обобщенный эвристический метод, метод гирлянд ассоциаций и метафор, морфологические методы анализа и синтеза такие, как метод "матриц открытия", метод десятичных матриц поиска и другие, направленные на исследование самого объекта проектирования, а не психологических особенностей человека. Кроме того, указанные методы могут быть в значительной мере формализованы, что немаловажно с позиций поставленных задач.

В работах [86, 87] разработана методика решения конструкторско-изобретательских задач, которая получила название "теория решения изобретательских задач". ТРИЗ представляет собой систематизированный набор преимущественно эвристических правил, выполнение которых облегчает решение конструкторской задачи. В работе [88] описаны алгоритмы автоматизированного поиска новых конструктивных решений с помощью ЭВМ для задач невысокого уровня сложности и новизны, с применением метода эвристических приемов. Суть этого метода при проектировании новой конструкции можно представить, как преобразование известных прототипов с помощью определенного набора эвристических приемов, и получение множества новых конструктивных решений, отвечающих заданным условиям, среди которых ведется затем поиск оптимального варианта. Библиотека эвристических приемов преобразования прототипов для несложных механических систем содержит 16 приемов, которые подразделены на 16 групп. Из 86 составленных эвристических приемов для 65 имеются рекомендации по их формальному описанию, открывающие возможность их программирования на ЭВМ, остальные пока не удалось формально описать [82].

Метод гирлянд ассоциаций и метафор является одним из эвристических методов поискового конструирования, требующим минимальной информационной подготовки и в наибольшей мере использующим информацию, содержащуюся в мозгу конструктора [89]. Суть метода заключается в определении гирлянд синонимов и гирлянд случайных объектов с последующим составлением комбинаций из этих случайных гирлянд. Конечным результатом является выбор рационального варианта технического объекта и отбор наилучшего из рациональных, как правило, методом экспертных оценок.

Во многих методах поиска новых ТР присутствуют одинаковые или близкие этапы и процедуры, причем существует некоторый инвариантный порядок следования этапов и процедур. Это послужило основанием для создания обобщенного эвристического метода. В работе [90] на основе анализа большой группы известных методов решения технических задач выявлен полный список основных этапов творческого процесса и процедур его выполнения и построен обобщенный эвристический алгоритм поиска ТР. В структуре обобщенного алгоритма используются массивы информации, которые являются данными для процедур этапов проектирования. Порядок следования процедур и выбор процедур в процессе решения задачи определяется разработчиком. Поиск нового ТР разрабатываемого объекта ведется последовательным выполнением на каждом этапе необходимых процедур. Список процедур этапов, а также описание назначения этапов и массивов информации изложены в работах [91, 92]. Следует отметить, что разработка обобщенного эвристического метода была выполнена на эмпирическом уровне. В связи с этим необходимо проведение методологических исследований по научно обоснованному обобщению эвристических методов и установлению полного набора и иерархии этапов и процедур обработки информации при поиске новых ТР.

Для поиска новых ТР на основе взаимосвязи показателей технических объектов и эвристических приемов разработан метод десятичных матриц поиска (ДМП) [93]. Все основные показатели технических объектов разделены на 10 групп, что дало возможность построить особую десятичную систему матричных таблиц, в строках которых записаны меняющиеся характеристики технического объекта, а в столбцах - группы эвристических приемов их изменения. Каждая клетка на пересечении ряда и столбца соответствует определенному ТР, краткое описание которого может сопровождаться графическим описанием. В зависимости от содержащейся информации ДМП могут носить общетехнический, отраслевой или предметный характер. При построении ДМП должна использоваться патентно-техническая литература. Значение взаимосвязей показателей технических объектов и групп эвристических приемов, а также конкретных требований решаемой задачи предопределяет целенаправленный выбор пути ее решения.

Ф. Цвикки предложил чрезвычайно простую модель ситуации выбора, в которой оказывается конструктор при создании новых ТР, назвав ее морфологическим ящиком [94]. Техничекий объект исследуют, выделяя ряд характерных признаков Затем для признаков находят различные варианты исполнения, реализующие эти признаки. Полученные данные оформляют в виде таблицы 1.1.

Столбцы в таблице соответствуют необходимым признакам , а отдельная позиция в столбце - варианту его функциональной реализации . Свободу выбора при конструировании Ф. Цвикки трактует как возможность работать с альтернативами, т.е. выбирать одни варианты выполнения блоков и отвергать другие. Выделяя в каждом столбце таблицы альтернативу и соединяя их отрезками линий, получают многозвенную линию , которая символизирует описание признаков некоторой конструкции. Выбор предпочтительной конструкции инженер делает интуитивно, по очереди перебирая комбинации альтернатив.

Другой формой морфологического анализа и синтеза ТР является комбинирование признаков, характеризующих различные системы (организующие понятия). В этом случае, при комбинировании двух организующих понятий, рекомендуется табличная форма, в столбцах которой записаны признаки одного организаующего понятия, а в строках признаки другого организующего понятия. В каждой клетке таблицы находится рабочий принцип из комбинации двух элементов решения. При комбинировании более чем двух организующих понятий пользуются матричной формой записи [95].

Таким образом, метод морфологического анализа и синтеза [85, 96 - 99] состоит в изучении всех возможных комбинаций параметров, форм, отдельных элементов для решения поставленной задачи. Значения параметров, типы форм и элементов образуют таблицу (матрицу). Различные сочетания перечисленных характеристик рождают альтернативные идеи или рекомендуемые решения задачи. Морфологический анализ применяется для решения задач поиска рациональных структур, схем и компоновок. При возможности синтеза большого множества новых ТР в этом методе практически не решена проблема выбора наилучшего решения из числа синтезируемых.

В последнее время на основе идеи Цвикки предложена комбинаторная концепция работы с альтернативами, на основе которой разработаны новые системно-морфологические алгоритмы оптимизации и общая логическая схема принятия решений при конструировании [85]. В работе вводится понятие комбинаты, являющейся сопряженной к понятию альтернативы, отражающей все локальные, исключающие друг друга варианты взаимной подмены блоков при конструировании. Не всякая комбинация при замене одного функционального блока другим (из одной и той же альтернативной серии, описывающей данный признак ) правомерна. Фиксацию этого факта отражает комбината, т.е. совокупность всех мыслимых альтернатив формально порождает множество комбинаций, а отношение комбинаторности ограничивает это множество и показывает, что на самом деле невозможно, а что необходимо еще исследовать. Иерархическая списковая структура, в которой учтены все альтернативы и комбинаты признаков строения, составляет комбинаторный файл семейства технических систем, который представляет не что иное, как многоуровневую композицию вложенных друг в друга морфологических ящиков [96].

Таким образом, анализ методов поискового конструирования показывает, что большинство из них представляет собой комбинацию из нескольких известных методов или же являются производными какоголибо метода, но более эффективными. Наиболее простым и формализуемым методом, позволяющим генерировать большое множество вариантов ТР, является метод морфологического анализа и синтеза, но в нем не формализована процедура выбора наилучшего решения. Представляется целесообразным развитие этого метода для структурного синтеза ВКА путем добавления процедур структурной оптимизации [100].

Вместе с тем, изучение вопросов, связанных с автоматизацией проектно-конструкторской деятельности и, в частости, созданием САПР, показало подробную проработку методических основ создания САПР, типовых структур подсистем САПР, правил построения и организации различных видов обеспечений САПР (математического, программного, информационного) и других теоретических аспектов автоматизированного проектирования [101 - 105]. Большое внимание уделено и аппаратным средствам САПР [104, 106]. Однако проблемы создания конкретных прикладных САПР достаточно полно решены лишь в областях электротехники и радиоэлектроники [107 - 109]. В разработке же САПР машиностроительных объектов, к которым относится и ВКА, основной упор делается на автоматизацию отдельных процедур, автоматизированное проектирование отдельных элементов, автоматизацию технологической подготовки производства и изготовление конструкторской документации [110 - 113]. При этом отмечается сложность выработки единого универсального принципа конструирования технических объектов машиностроения, основанного во многом на трудноформализуемом творческом подходе [102, 114] и неизбежность, в связи с этим, модификации типовых структур их САПР.

Принципиальная возможность решения задачи автоматизации проектирования конкретного класса ТО делает актуальной разработку методических основ создания САПР ВКА, формализацию типовых процедур ее конструирования и построение интегральных и локальных критериев оценки конструкции на различных этапах проектирования ВКА.