

Научная статья  
УДК 623.746.-519  
DOI: 10.34759/vst-2022-3-94-110

## КОНЦЕПЦИЯ МНОГОДИСЦИПЛИНАРНОГО ФОРМИРОВАНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЛИКА СИЛОВЫХ УСТАНОВОК БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Юрий Владимирович Зиненков<sup>1</sup>, Александр Валерьевич Луковников<sup>2</sup> ✉

<sup>1</sup>Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,  
Воронеж, Россия

<sup>2</sup>Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова (ЦИАМ им. П.И. Баранова),  
Москва, Россия

<sup>1</sup>yura2105@mail.ru

<sup>2</sup>Lukovnikof@mail.ru ✉

**Аннотация.** Рассмотрено формирование единого методологического подхода к созданию беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) военного назначения с гибридными силовыми установками (СУ) и СУ на базе двигателей традиционных типов и схем (газотурбинные, поршневые, электрические). Раскрыто основное содержание проблемных вопросов, возникающих на этапе внешнего проектирования (концептуальные и обликосые исследования) БПЛА военного назначения и его СУ, затрагивающих фундаментальные и прикладные основы конструирования и производства, которые следует учитывать на предварительных этапах проектирования авиационной техники (АТ). Представлены: разработанная авторами методология формирования предварительного технического облика СУ БПЛА военного назначения, методика обоснования оптимальных параметров двигателя и планера, классификация БПЛА и их СУ. Продемонстрирована разработанная комплексная математическая модель (КММ) БПЛА, позволяющая проводить расчетно-теоретические исследования системы «БПЛА–СУ» программными средствами на ЭВМ.

**Ключевые слова:** авиационный поршневой двигатель, беспилотный летательный аппарат, гибридная силовая установка, оценка эффективности, классификация БПЛА, математическая модель, аэродинамическая компоновка, интерференция, электрохимический генератор, воздушный винт, специальные характеристики, программа полета, целевая разработка, критерии самолетного уровня, комплексный подход, технико-экономическая оценка

**Для цитирования:** Зиненков Ю.В., Луковников А.В. Концепция многодисциплинарного формирования предварительного технического облика силовых установок беспилотных летательных аппаратов военного назначения // Вестник Московского авиационного института. 2022. Т. 29. № 3. С. 94-110. DOI: 10.34759/vst-2022-3-94-110

## Original article

**THE CONCEPT OF PLURIDISCIPLINARY FORMING OF PRECURSORY  
TECHNICAL APPEARANCE OF POWER PLANTS OF MILITARY PURPOSE  
UNMANNED AERIAL VEHICLES**Yurii V. Zinenkov<sup>1</sup>, Aleksandr V. Lukovnikov<sup>2</sup> ✉<sup>1</sup>Air force academy named after professor N.E. Zhukovskii and Y.A. Gagarin,  
Voronezh, Russia<sup>2</sup>Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov,  
Moscow, Russia<sup>1</sup>yura2105@mail.ru<sup>2</sup>Lukovnikof@mail.ru ✉**Abstract**

The development and creation of unmanned aerial vehicles is the most dynamically developing trend of the aviation industry worldwide. This is being facilitated by the continuous practice of their application in solving a wide range of diverse tasks. In this diversity, the military purposes unmanned aerial vehicles occupy a special place, since demonstration of their capabilities by law enforcement agencies while solving combat tasks in modern local conflicts in the most obvious way reveals the advantages of their application.

Against this background, a steady trend of the unmanned aerial vehicles development is being observed in our country with a forecast for decades to come. To reduce terms and costs for the unmanned aerial vehicles development the authors propose to realize the targeted development of prospective unmanned flying vehicles by the principle “Task – solution option – facilities – terms – cost”. The issue of the power plants developing still remains herewith the most complex one, which is being associated with the lack of the state-of-the-art substantiated methods and techniques combined with the criteria, on which basis the assessment of the power plant efficiency with various types of aviation engines characteristic for application on the unmanned aerial vehicles.

The article presents a unified methodological approach to the development of the military purposes unmanned aerial vehicles with hybrid power plants and power plants based on the engines of conventional types and schemes, such as gas turbine, piston and electric. Special attention herewith is paid to the disclosure of problematic issues of scientific and research nature, and production straightforwardly when creating aircraft engines for the power plants of unmanned aerial vehicles. These issues relate to the stage of external design of military purposes unmanned aerial vehicles and their power plants, and affect the fundamental and applied foundations of design and production, which should be accounted for while preliminary design.

The article describes the following issues developed by the authors:

- The methodology for the precursory technical appearance forming of power plants for the military purposes unmanned aerial vehicles;
- The technique for substantiating optimal parameters of both engine and airframe;
- Classification of military purposes unmanned aerial vehicles;
- A complex mathematical model of an unmanned aerial vehicle for computational and theoretical studies of the “Unmanned aerial vehicle – power plant” system using computer software.

For further development of the complex mathematical model, the authors plan to finalize the mathematical model of the power plant based on both turbo-screw and piston engines, as well as hybrid options of power plants, including an electric generator in addition to the “thermal” engines, an electric motor and a separate propulsor.

The practical value of this work, which consists in the fact that its results may be employed in both scientific and design organizations, preoccupied with developments of prospective unmanned aerial vehicles and their power plants, as well as ordering organizations and industry while substantiating requirements to the new samples of aviation engineering, is worth mentioning.

**Keywords:** aviation piston engine, Unmanned Aerial Vehicle (UAV), hybrid power plant, efficiency assessment, UAV classification, mathematical model, aerodynamic layout, interference, electrochemical generator, propeller, special characteristics, flight program, target development, aircraft level criteria, integrated approach, technical and economic assessment

**For citation:** Zinenkov Yu.V., Lukovnikov A.V. The Concept of Pluridisciplinary Forming of Precursory Technical Appearance of Power Plants of Military Purpose Unmanned Aerial Vehicles. *Aerospace MAI Journal*, 2022, vol. 29, no. 3, pp. 94-110. DOI: 10.34759/vst-2022-3-94-110

## Введение

Разработка и создание беспилотных летательных аппаратов является наиболее динамично развивающимся направлением авиационной отрасли во всем мире, чему способствует непрерывная практика применения БПЛА при решении широкого спектра разнообразных задач, демонстрирующая высокую эффективность этих ЛА в сравнении с другими техническими средствами [1]. В этом многообразии задач БПЛА военного назначения занимают особое место, т.к. демонстрация их возможностей силовыми ведомствами при решении боевых задач в современных локальных конфликтах наиболее очевидно показывает преимущества их использования [2, 3]. На основании этого силовые структуры многих государств заинтересованы в принятии на вооружение современных боевых авиационных комплексов с БПЛА различного назначения. Такая потребность порождает большой спрос, поэтому многие организации во всем мире, и в нашей стране в частности, непрерывно ведут разработки, направленные на создание и повышение эффективности БПЛА как в технической части, так и в способах применения.

За последние десятилетия разработано множество проектов БПЛА военного назначения производителями разных стран, лидерами среди которых являются США, Израиль, Турция и Китай. Россия пока не имеет явных успехов в этом сегменте, но работы по созданию комплексов с БПЛА собственного производства постоянно наращивает и в перспективе может оказаться среди ведущих производителей такой техники [4].

Мировая практика создания БПЛА показывает, что производители часто ведут работы над проектом в международной кооперации, интегрируя хорошо отработанные разными фирмами отдельные элементы (двигатель, системы управ-

ления, навигации, связи и т.п.) в единое изделие. Такой подход имеет целый ряд преимуществ: снижение сроков и стоимости разработки и изготовления, развитие международного сотрудничества и т.п., наряду с главным недостатком — полной зависимостью от партнеров, входящих в производственную кооперацию. Наша авиационная отрасль при создании БПЛА также апробировала этот подход на ряде изделий, который в условиях санкций показал все свои отрицательные стороны, приводящие к невозможности либо дальнейшего производства, либо эксплуатации ввиду отсутствия необходимых элементов и покупных (запасных) частей, производимых в других странах, прекративших сотрудничество в одностороннем порядке [5]. Отсюда следует вывод о том, что для обеспечения производственной стабильности при создании стратегически важной техники, какой являются БПЛА военного назначения, необходимо использовать все комплектующие элементы отечественных производителей.

Для оценки и анализа сложившейся ситуации с использованием иностранных комплектующих в табл. 1 представлены основные данные некоторых БПЛА военного назначения, разработанных в России за последние годы [6, 7]. Как видно, в состав СУ большинства представленных беспилотников входят иностранные двигатели, а так как двигатель является наиболее сложным техническим изделием, то его замена в случае необходимости на аналог представляет собой сложно реализуемую в короткие сроки задачу. В связи с этим нашей авиационной отраслью по программе импортозамещения ведутся работы по созданию отечественных аналогов, что является положительной тенденцией в развитии авиационного двигателестроения [8].

Таблица 1

## Характеристики БПЛА военного назначения, разработанных в России

Название БПЛА	ZALA-421-08	ZALA-421-16E5G	«Корсар»	«Форпост»	«Орион»	«Альтиус»
Тип АД	ЭД	АПД+ЭД	АПД	АПД	АПД	2ЧАПД
Название АД	-	-	Zanzottera 600H	Jabiru 2200	Rotax 914	RED A03
$N$ , л.с. ( $P$ , кВт)	-	-	50	85	115	24800
$m_{\text{макс}}$ , кг	2,5	30	250	450	1100	5000
$m_{\text{ПН}}$ , кг	0,3	5	40	100	200	1000
$L_{\text{кр}}$ , м	0,81	4,64	6,5	8,6	16,0	28,5
$L_{\text{ф}}$ , м	0,44	-	4,2	8,55	8,0	11,6
$V_{\text{п.кр}}$ , км/ч	90	100	120	150	200	250
$H_{\text{п}}$ , км	4	4	5	5	7,5	12
$L_{\text{п}}$ , км	170	1200	400	500	800	10000
$t_{\text{п}}$ , ч	1,5	12	10	18	30	48

Таблица 2

## Характеристики БПЛА военного назначения, разрабатываемых в России

Название БПЛА	«Молния»	«Сириус»	«Гелиос»	«Гром»	«Скат»	«Охотник»
Тип АД	ТРДД	2ЧТВД	ТВД	ТРДД	ТРДД	ТРДД
Название АД	-	-	-	-	-	Изд. 117Б
$N$ , л.с. ( $P$ , кВт)	-	-	-	-	-	125,5
$m_{\text{макс}}$ , кг	65	2000	4000	7000	10000	20000
$m_{\text{ПН}}$ , кг	7	300	800	2000	2000	2000
$L_{\text{кр}}$ , м	1,2	23,0	30,0	10,0	11,5	19,1
$L_{\text{ф}}$ , м	1,5	9,0	12,6	13,8	10,2	15,1
$V_{\text{п.кр}}$ , км/ч	800	180	450	800	800	900
$H_{\text{п}}$ , км	-	7,0	11	12	12	11
$L_{\text{п}}$ , км	-	2000	6000	800	3700	7000
$t_{\text{п}}$ , ч	-	20	30	7	5	4

На авиасалоне МАКС-2021 компания «Кронштадт» продемонстрировала ряд проектов перспективных БПЛА самолетного типа, характеристики которых представлены в табл. 2 [6, 9]. Наряду с этим РСК «МиГ» заявила о намерениях возобновить проект ударного БПЛА «Скат» [10].

Все эти события свидетельствуют об уверенной тенденции развития отечественных БПЛА с прогнозом на десятилетия вперед. При этом следует отметить, что СУ является одним из основ-

ных элементов любого летательного аппарата; срок создания ее, при отсутствии авиационного двигателя (АД), в два-три раза превышает срок создания планера со всеми системами ЛА – это утверждение справедливо и для БПЛА. Для беспилотников вопрос еще усложняется расширением как номенклатуры (электрический двигатель (ЭД), авиационный поршневой двигатель (АПД), двухконтурный турбореактивный двигатель (ТРДД), турбовинтовой двигатель (ТВД)), так и размерности (тяга/мощность) АД, в связи с тем,

что взлетные массы БПЛА различаются многократно из-за разнообразия их конструкции и функционального назначения.

Также ситуация усугубляется и тем, что АД малых мощностей в нашей стране раньше не производились, поэтому научно-технического задела (НТЗ) и соответствующих компетенций у отечественных производителей недостаточно для быстрого налаживания производства. В целом, при разработке СУ для новых образцов БПЛА возникает большое количество проблемных вопросов, что значительно усложняет принятие во многом противоречивых конструктивных решений для новых образцов АТ. Поэтому для снижения рисков создания современных БПЛА необходимо заранее прогнозировать потребную линейку (типоряд) АД и вести работы по их разработке и созданию на основе предварительных комплексных расчетно-теоретических исследований по формированию технического облика БПЛА и их СУ, обеспечивающих расширение НТЗ в данной области.

В отраслевых специализированных институтах нашей страны проводятся подобные исследования, основанные на многолетнем опыте создания пилотируемых ЛА по всем типам самолетов, вертолетов и их двигателей. При этом в каждой научно-исследовательской организации разработаны, апробированы и внедрены методологические подходы к оценке технического облика СУ БПЛА. К примеру, применяется методологический подход, в основе имеющий рассмотрение СУ как сложной системы, требования к которой определяются на трех иерархических уровнях:

— непосредственно на уровне АД (оценка возможности модернизации, стоимости опытно-конструкторских работ, технической реализуемости АД с учетом имеющихся финансовых и временных ограничений и др.);

— на уровне БПЛА (определяются эффективность БПЛА по основным летно-техническим характеристикам, которые зависят от тяги или мощности СУ, удельного расхода топлива на характерных режимах полета БПЛА, массы и габаритных характеристик СУ, ее заметности в акустическом, инфракрасном и радиолокационном диапазонах длин волн);

— на уровне функционирования парка АД в составе расчетной группы БПЛА (оценка стоимостных и эксплуатационно-технических характеристик АД, изменяющихся в течение жизненного

цикла, включая характеристики безотказности, долговечности и др.).

Такой подход относится к концептуальному, который базируется на частных методиках оценки технического облика СУ БПЛА с конкретным типом двигателя. Недостатком этой методологии является то, что в ней не учитываются технические и эксплуатационные особенности СУ с АД разных типов, включая гибридные, и это не позволяет в полной мере сделать достоверную комплексную оценку их эффективности в составе БПЛА.

Похожая проблема имеется и в методологических подходах, разработанных в ряде авиационных вузов [11, 12]. Это сложилось исторически, так как специалисты, занимающиеся СУ с газотурбинными (ГТД) или поршневыми двигателями в пилотируемой авиации практически не пересекались, каждый занимал свою нишу в авиации по типам техники. С появлением же беспилотной авиации и дальнейшим развитием науки и техники возникли и получили большое развитие СУ с ЭД и гибридные СУ. В итоге для ряда БПЛА предполагаются такие области их «существования» (диапазоны высот и скоростей полета, потребные тяги и др.), где возможно использовать СУ всех рассматриваемых в данной работе типов двигателей, что вызывает необходимость разработки методических приемов оценки систем, основанных на разных физических принципах функционирования АД и новых критериев оценки системы «БПЛА–СУ».

Современных обоснованных методов и методик в совокупности с критериями, на основании которых можно произвести оценку эффективности СУ с разными типами АД, не существует.

Исходя из вышесказанного следует констатировать, что создание единого методологического подхода к формированию предварительного технического облика СУ БПЛА с разными типами АД, включая гибридные варианты, является актуальной задачей.

### **Проблемные вопросы создания СУ БЛА военного назначения**

Создание рассматриваемого единого методологического подхода для создания БПЛА военного назначения с гибридными СУ и СУ на базе двигателей традиционных типов и схем усложнено рядом проблемных вопросов, которые требуют научного обоснования. Попробуем обозначить эти вопросы, раскрыв их основное содержание.



1. Современные БПЛА имеют широкие диапазоны значений следующих ключевых параметров:

- взлетной массы от нескольких граммов до десятков тонн;
- высоты полета от полета «у земли» ( $H \approx 0$ ) до 25 км;
- скорости полета — от режима висения до сверхзвуковых скоростей.

Столь широкие диапазоны значений основных параметров для требований в тактико-техническом задании (ТТЗ) приводят к необходимости использования разных подходов и методик к созданию новых БПЛА. Исходя из этой ситуации, необходимо строго разграничить направления разработок БПЛА через их классификацию по ряду ключевых признаков.

2. Конструкция планера БПЛА может выполняться в различных вариантах аэродинамической компоновки, в том числе достаточно нетрадиционных и экзотических, по которым могут отсутствовать аэродинамические характеристики. Известно, что при интеграции СУ и планера эффективные характеристики изменяются за счет интерференции, которая бывает как положительной (например, дополнительный косой скачок уплотнения перед воздухозаборником от конуса ЛА), так и отрицательной (создание зоны затенения воздухозаборника элементами фюзеляжа) [13]. Поэтому современные тенденции в сопряжении основных элементов планера БПЛА должны иметь научное обоснование, чтобы исключить ошибки конструкторов, принимающих принципиально новые технические решения.

3. Разнообразие типов применяемых СУ и двигателей на БПЛА. Проанализировав проекты существующих и перспективных БПЛА на предмет типов их СУ (см. табл. 1 и 2), с учетом данных из [14], получаем перечень следующих типов СУ:

- СУ с газотурбинными двигателями: турбовальные, турбовинтовые, турбореактивные (ТРД), микро-ГТД;
- СУ с авиационными поршневыми и роторно-поршневыми двигателями: бензиновые, дизельные;
- СУ с электрическими двигателями: коллекторные, бесколлекторные;
- гибридные СУ — комбинация газотурбинного или поршневого двигателя с электрическим генератором, вырабатывающим энергию для одного и более электрических двигателей для при-

вода во вращение движителя (вентилятора, воздушного винта).

Столь широкое разнообразие возможных типов СУ БПЛА, включающих двигатели прямой и непрямоугольной реакции, является одним из самых важных и наиболее сложных вопросов в разрабатываемой методологии, особенно в части оценки их характеристик и эффективности. Это обусловлено использованием разных источников (бензин, дизель, керосин, водород, аккумуляторная батарея, солнечная энергия и т.п.) и преобразователей энергии (камера сгорания, газовая турбина, электрический генератор, электрохимический генератор (топливный элемент), редуктор), требующих оценки эффективности элементов СУ, различающихся физическими принципами работы. Для выполнения такой оценки необходима разработка и обоснование новых критериев, на основании анализа которых можно принимать решение.

4. Применение воздушных винтов в качестве движителей на БПЛА. Воздушные винты повсеместно применялись на самолетах первого и второго поколений, затем пришла эпоха реактивной авиации, и исследования, направленные на развитие теории самолетных воздушных винтов, практически прекратились [15]. Поэтому научно-технический задел в данном направлении, полученный до 1960-х годов, до сих пор используется конструкторами. Сейчас вновь стало актуальным дальнейшее развитие теории самолетных воздушных винтов с использованием расчетных и экспериментальных методов.

5. БПЛА военного назначения многократного применения в процессе эксплуатации имеют различные сроки ресурса, что обусловлено особенностями их применения в военное и мирное время. В отличие от пилотируемых ЛА, которые постоянно эксплуатируются в мирное время с целью подготовки летного экипажа, БПЛА, например ударные, в мирное время могут длительное время находиться на хранении, следовательно, возникает вопрос о новых методах прогноза и назначения требуемого ресурса, закладываемого в элементы конструкции при прочностных расчетах.

6. Современные тенденции в требованиях к специальным характеристикам СУ. При проектировании боевых пилотируемых ЛА требования к специальным характеристикам во многом определяют облик некоторых элементов СУ (воздухозаборник, вентилятор, газовая турбина, ре-

активное сопло). Такие же требования многими специалистами проецируются и на БПЛА военного назначения, хотя здесь возникают некоторые вопросы, связанные с целесообразностью удовлетворения этим требованиям исходя из способов их применения по критерию «эффективность/стоимость».

Данные проблемные вопросы относятся к научно-исследовательскому этапу создания СУ БПЛА, затрагивая фундаментальные основы конструирования СУ. Далее необходимо рассмотреть проблемные вопросы производства АД, которые также следует учитывать еще на предварительных этапах проектирования.

1. Очевидно, что АД для легких БПЛА должны иметь низкую стоимость, при том, что их серийность не может быть высокой. Отсюда возникает экономическое противоречие: чем меньше серия, тем выше стоимость одной единицы, и, если само изделие имеет низкую стоимость, то производителю сложно найти экономический баланс (финансовую выгоду) в производстве такой продукции. Можно смело предположить, что серийность АД для БПЛА военного назначения в основном будет ограничена потребностью внутреннего рынка, поэтому для принятия решений надо понимать техническую реализуемость проекта исходя из производственных возможностей. По этой причине иностранные производители на большинстве БПЛА собственной разработки имеют СУ на базе двигателей иностранных фирм, уверенно торгующих на мировых рынках большими объемами, что позволяет снизить себестоимость продукции.

2. Следующая проблема — ограниченные компетенции, технологии и материалы для создания современных микро-ГТД, АПД, ЭД и их компонентов у отечественных производителей, в то время как ими в полной мере владеют большинство ведущих зарубежных производителей. Эти проблемы усугубляют сложности создания конкурентоспособных функциональных БПЛА и их систем, отвечающих современным и перспективным требованиям.

3. При разработке любого сложного технического устройства, каким является СУ БПЛА, помимо оценки технических свойств самого объекта, необходима оценка технической реализуемости проекта создания перспективного АД с учетом имеющихся финансовых и временных ограничений. Поэтому данный учет в виде технико-экономической оценки необходимо реализовывать на этапах предварительного проектирования.

Перечисленные выше проблемные вопросы затрагивают процесс разработки современных СУ БПЛА различного назначения, в том числе военного, на этапах предварительного проектирования. Их научное решение позволит снизить возможные технические риски создания СУ различных типов и внесет вклад в развитие НТЗ в области авиадвигателестроения за счет научно-методического обеспечения расчетно-теоретических исследований по согласованию параметров СУ и планера с использованием методов математического моделирования, а также обоснования методик оценки эффективности СУ БПЛА военного назначения по критериям самолетного уровня при выполнении ими боевых задач (или типовых полетных циклов).

### **Методология создания СУ БПЛА военного назначения**

Постепенно накапливаемый опыт применения БПЛА военного назначения в локальных конфликтах демонстрирует эффективность решения ими многих задач. Наряду с этим в ходе разработок военным командованием новых способов ведения боевых действий появляются и новые задачи, которые в будущем планируется решать с использованием комплексов с БПЛА [16]. Чтобы такая возможность была обеспечена с технической стороны, необходимо реализовывать целевую разработку перспективных БПЛА по принципу: «Задача — вариант решения — средства — сроки — стоимость». Работая по такому принципу, с использованием современных технологий, можно в сжатые сроки с наименьшими затратами создавать БПЛА под требуемые задачи, как существующие, так и перспективные. Методическому обеспечению такой разработки может способствовать разработанная и апробированная методология, предполагающая проведение достоверных расчетно-теоретических исследований на этапах предварительного проектирования БПЛА и их СУ.

В процессе создания любого перспективного БПЛА наиболее сложным и длительным этапом является разработка его СУ. Это обусловлено созданием нового АД, разработка которого является сложным многоуровневым процессом, определенным порядком выполнения работ по созданию перспективных АД, включающим 10 уровней готовности технологий (УГТ), из которых: 1—6 — научно-исследовательские работы, а 7—10 — опытно-конструкторские [17]. На первом УГТ проводятся научно-технические прогнозы,

обосновываются концепции развития авиации в целом и АД, в частности. На втором УГТ выполняются поисковые исследования перспективных АД их узлов и систем. Результатом третьего УГТ является сформированный на основе накопленного опыта разработки, производства и эксплуатации технический облик перспективного АД, с учетом последних достижений в области изучения перспективных схем АД, новых авиационных материалов, технологических процессов и конструктивных решений. Как раз третий УГТ и необходимо обеспечивать новой методологией формирования предварительного технического облика СУ БПЛА.

Расчет необходимых параметров перспективного АД для формирования его технического облика в ОКБ и институтах авиационной промышленности, занимающихся разработкой АД, как правило, выполняется изолированно от БПЛА, на основании требований к габаритно-массовым и тягово-экономическим характеристикам, выдаваемым Заказчиком в ТТЗ к новому образцу АТ. Если известно функциональное предназначение БПЛА, использовать изолированный подход к разработке АД на этапах предварительного проектирования не целесообразно, так как это приводит к большим рискам создания проекта из-за того, что двигатель работает в составе СУ БПЛА, их параметры и характеристики взаимосвязаны и могут варьироваться в узких диапазонах значений параметров. Поэтому, чтобы получить наиболее рациональные параметры, необходимо производить оценку эффективности АД только по критериям самолетного уровня в составе СУ БПЛА с учетом решаемых им задач, которые определяют требования к характеристикам СУ, условия эксплуатации, типовые программы полета и т.п. Это означает, что использовать нужно комплексный подход, заключающийся в многодисциплинарном анализе технико-экономических показателей и критериев эффективности самолетного уровня исследуемого БПЛА, представленного в виде сложной технической системы «БПЛА – СУ». В основе указанного подхода должна лежать совокупность расчетно-теоретических исследований, проводимых с помощью методов математического моделирования рабочего процесса авиационной СУ, аэродинамики ЛА и динамики его движения, которые удобно проводить с использованием автоматизированных программных комплексов.

В связи с этим для проведения расчетно-теоретических исследований по формированию

предварительного технического облика СУ БПЛА различного целевого назначения и оценки их эффективности предлагается использовать комплексный подход, основанный на междисциплинарном анализе множества характеристик проектных вариантов БПЛА по самолетным критериям с учетом уровня и специфики решаемых задач.

Исходя из вышесказанного, создание перспективного БПЛА на этапах предварительного проектирования целесообразно начинать с определения спектра существующих и перспективных боевых задач, что в дальнейшем позволит учитывать особенности функционирования систем СУ в условиях эксплуатации, а также формировать типовые программы полета и критерии эффективности.

Военной авиацией традиционно решается большая номенклатура задач, которые в общем можно классифицировать по разным признакам, к примеру, по видам Вооруженных сил или по типу воздействия на противника. Но из всего многообразия признаков определяющее значение для формирования технического облика БПЛА имеют задачи, классифицируемые по уровням и видам. Первые регламентируют глубину использования, а вторые – способы применения, что в совокупности определяет основные требования к БПЛА и его двигателю, следовательно, эти два уровня задач и необходимо использовать (рис. 1).

Предполагается, что исходя из условий решения некоторой целевой задачи, требующей применения БПЛА, определяются требования, которым должен отвечать разрабатываемый БПЛА и его СУ. Далее для проведения расчетно-теоретических исследований по оценке эффективности СУ в составе БПЛА необходимо формализовать БПЛА и его системы в виде сложной технической системы «БПЛА–СУ» с функциональными зависимостями между параметрами и характеристиками, которые и будут подвергаться исследованиям. После определения требований к разрабатываемой системе начинается процесс формирования предварительного технического облика СУ, который входит в предварительный технический облик БПЛА. После выполнения этого этапа производится технико-экономическая оценка, включающая в себя средства производства (с учетом состояния, компетенций и технологий предприятий, материалов и научно-технического задела), сроки изготовления (с учетом прогноза развития науки и техники) и стоимость проекта (с учетом прогноза развития рынка).





Рис. 1. Блок-схема методологии формирования оптимального технического облика СУ БПЛА военного назначения на этапах предварительного проектирования

Описанный порядок и представляет собой основу методологии формирования предварительного технического облика СУ БПЛА военного назначения, блок-схема которой продемонстрирована на рис. 1.

Для исследователя методология определяет общий подход к решению задачи, а порядок действий регламентирует методика проведения исследования. Авторами работы на основании вышеизложенной методологии разработана методика обоснования оптимальных параметров СУ БПЛА, которая является достаточно гибкой для

решения целого ряда научных задач путем ее трансформации для частных случаев [18–21]. Подробная блок-схема методики продемонстрирована на рис. 2.

Разработанная методика включает в себя пять основных этапов исследований:

- постановка задачи исследования;
- формализация сложной технической системы «БПЛА–СУ»;
- параметрические исследования системы;
- оптимизационные исследования системы;
- обоснование оптимальных параметров СУ БПЛА.



Рис. 2. Блок-схема методики обоснования оптимальных параметров СУ БПЛА

Рассмотрим эти этапы подробнее.

На первом этапе определяют предназначение исследуемого БПЛА исходя из спектра задач, которые предполагается решать. Для обеспечения статистическими данными и быстрого ориентирования исследователя в многообразии свойств БПЛА военного назначения авторами разработана их классификация по различным признакам, которая продемонстрирована на рис. 3. Данная классификация учитывает следующие основные признаки: назначение; способы управления; кратность применения; способы взлета и посадки; аэродинамическую компоновку; тип силовой установки; принцип реализации полета; взлетную массу; глубину применения; продолжительность и высоту полета.

После определения предназначения необходимо разработать требования к исследуемому БПЛА, которые регламентируют особенности

функционирования на всех этапах жизненного цикла. Заканчивается первый этап выбором и обоснованием критериев эффективности.

На следующем, втором, этапе необходимо формализовать исследуемый БПЛА в виде сложной технической системы «БПЛА-СУ». При этом используются банки параметров и характеристик существующих проектов БПЛА и их СУ в совокупности с общепринятыми теоретическими зависимостями между параметрами и характеристиками элементов. Производится увязка параметров СУ, планера, формируется программа полета, а далее происходит увязка траекторных параметров исследуемой системы при выполнении всех этапов полетного задания. В связи с тем, что между элементами, входящими в состав сложной технической системы, существуют глубокие взаимосвязи параметров и характеристик, только определенная совокупность значений этих

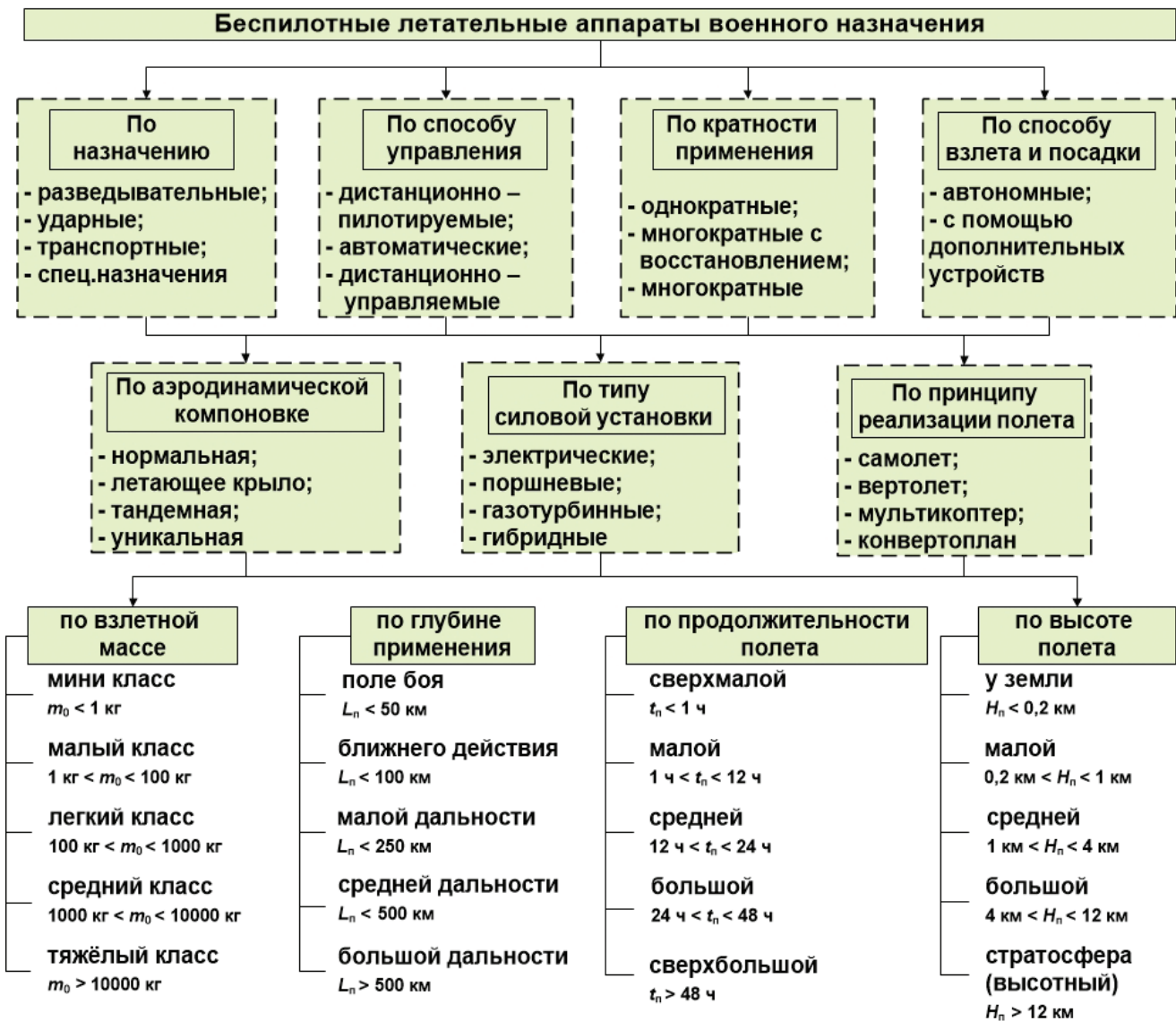


Рис. 3. Классификация БПЛА военного назначения

параметров позволяет ей физически функционировать. В результате исследователю необходимо найти узкие диапазоны значений параметров, при которых все системы будут «работать» согласованно. Этот этап является итерационным, а его продолжительность зависит от сложности формализуемой системы, степени изученности составных элементов и квалификации исследователя.

На третьем этапе проводятся параметрические исследования формализованной сложной технической системы «БПЛА-СУ», которая принимается за базовый вариант, подлежащий дальнейшему исследованию, относительно которого будут сделаны выводы о повышении эффективности в результате оптимизации.

Цели параметрических исследований:

- выяснение физической сущности «глубинных» взаимосвязей между внутренними расчетными параметрами двигателя, выбираемыми при его «завязке»;
- оценка влияния параметров рабочего процесса и программ управления двигателя на тягово-экономические и удельно-массовые характеристики СУ и летно-технические характеристики БПЛА;
- определение области существования системы «БПЛА-СУ» для корректной постановки задачи оптимизации;
- облегчение анализа большого количества технических обликов (вариантов) БПЛА, получаемых в процессе оптимизации, за счет глубокого изучения функциональных взаимосвязей меж-



ду всеми подсистемами и элементами сложной технической системы «БПЛА-СУ».

Исследование на этом этапе проводится следующим образом. Формируются серии вариантов системы «БПЛА-СУ», отличающиеся от базового значениями какого-либо одного параметра, например степенью двухконтурности или суммарной степенью повышения давления в компрессоре, взлетной тяговооруженностью, удлинением крыла и др. Значения параметра изменяются с постоянным шагом в некотором диапазоне, при этом все остальные расчетные параметры сохраняются неизменными. Достоверность формируемых обликов БПЛА и СУ качественно оценивается по наблюдаемой тенденции изменения основных характеристик системы при изменении параметров базового варианта.

Наибольшее значение параметрические исследования имеют для малоизученных элементов СУ и их совместной работы, так как это формирует новые теоретические знания о закономерностях процессов, протекающих в них.

После параметрических исследований следует четвертый этап – этап оптимизации. В наиболее общем смысле оптимизация какой-либо системы представляет собой совокупность фундаментальных математических результатов и численных методов, ориентированных на нахождение и идентификацию наилучших ее вариантов из множества возможных решений, позволяющих избежать полного перебора всех альтернативных вариантов [22, 23]. В соответствии с этим результатом данного этапа является формирование ряда вариантов системы «БПЛА-СУ», характеризующихся наилучшим сочетанием значений оптимизируемых параметров по выбранным критериям для разных схем двигателей СУ БПЛА, включая схемы на базе элементов серийных двигателей (как с масштабированием газогенератора, так и без него).

Если количество варьируемых параметров больше двух, то оптимизацию целесообразно проводить с помощью программного комплекса автоматизированной оптимизации, что и рекомендовано для исследователя в данной методике.

Формирование базового варианта системы и ее параметрические и оптимизационные исследования являются расчетно-теоретическими этапами, подразумевающими производство большого количества вычислительных операций, которые удобно осуществлять с использованием программных средств, реализующих заложенные в

них научно обоснованные алгоритмы. На рис. 4 показана блок-схема разработанной авторами комплексной математической модели (КММ), основанной на большом опыте проведения обликотиповых исследований СУ для летательных аппаратов различного целевого назначения и учитывающей особенности БПЛА и их размерности.

Помимо блоков ввода исходных данных и формирования результатов, КММ БПЛА состоит из двух основных расчетных блоков: математической модели (ММ) СУ и ММ БПЛА. В настоящий момент ММ БПЛА полностью обеспечивает проведение необходимых расчетов согласно описанной методике; она неоднократно верифицирована, валидирована и апробирована при решении подобных задач [24–26]. ММ СУ, в свою очередь, обеспечивает расчеты пока только для СУ на базе ГТД прямой реакции всех схем. Для возможности проведения расчетов новых типов СУ, в том числе гибридных, ММ СУ авторами дорабатывается.

На рис. 5 продемонстрирована схема преобразования бортовой энергии БПЛА в тягу различными типами СУ. Данная схема охватывает все многообразие типов СУ, которые планируется заложить в ММ СУ, а именно СУ на базе турбовинтового и поршневого двигателей и гибридных вариантов СУ, включающих, помимо «тепловых» двигателей, электрогенератор, электромотор и отдельный движитель.

## Выводы

1. Проведен научно-технический анализ проблемных вопросов разработки перспективных СУ БПЛА военного назначения на этапах предварительного проектирования.
2. Разработана структура методологии формирования оптимального технического облика СУ БПЛА военного назначения на этапах предварительного проектирования.
3. Разработана методика обоснования оптимальных параметров СУ БПЛА военного назначения.
4. Разработана классификация БПЛА военного назначения.
5. Разработана комплексная математическая модель системы «БПЛА-СУ» с использованием ГТД прямой реакции.
6. В дальнейшем планируется:
  - разработать ММ СУ с турбовинтовым и поршневыми двигателями и включить ее в КММ системы «БПЛА-СУ»;

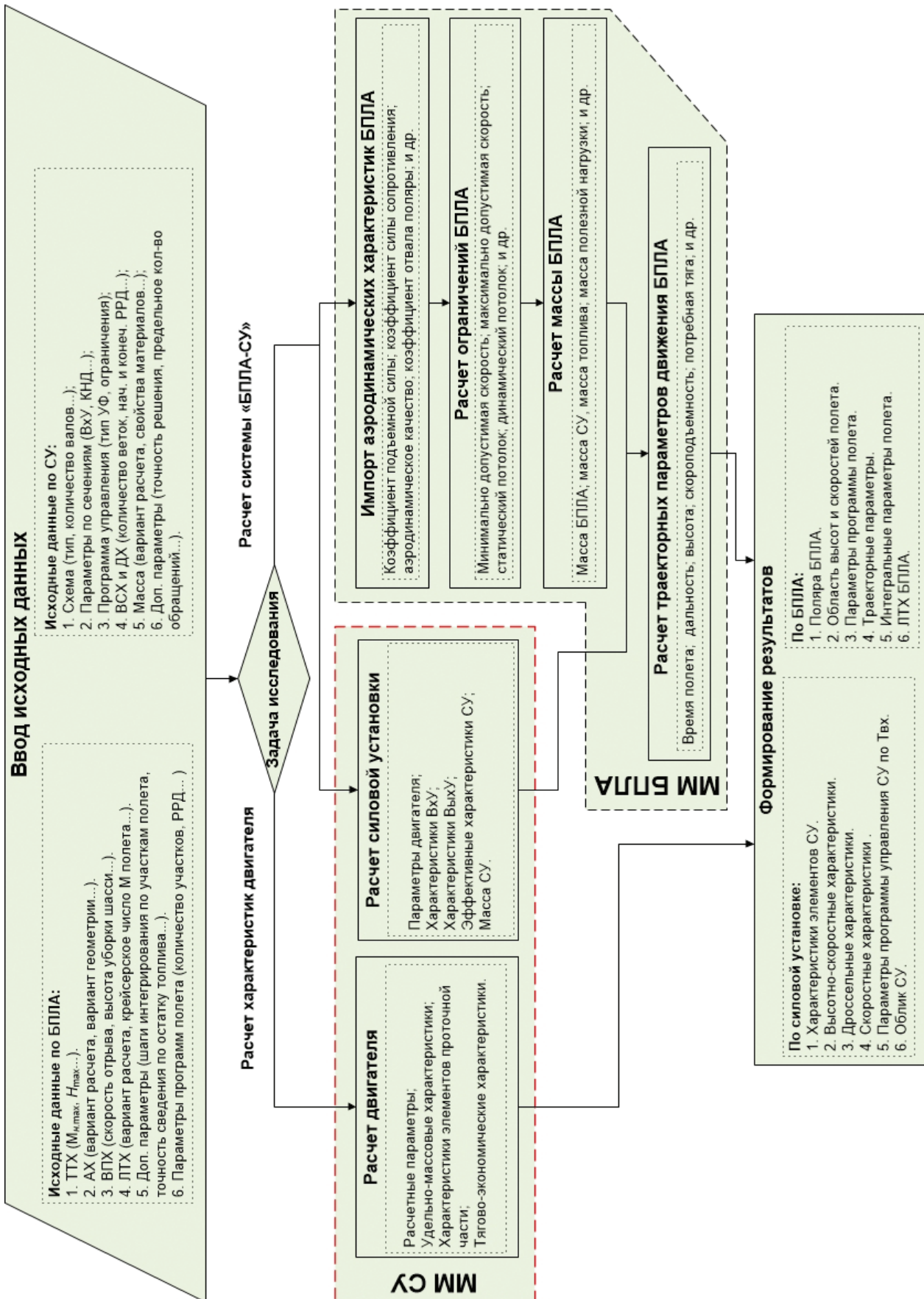


Рис. 4. Блок-схема комплексной математической модели БПЛА



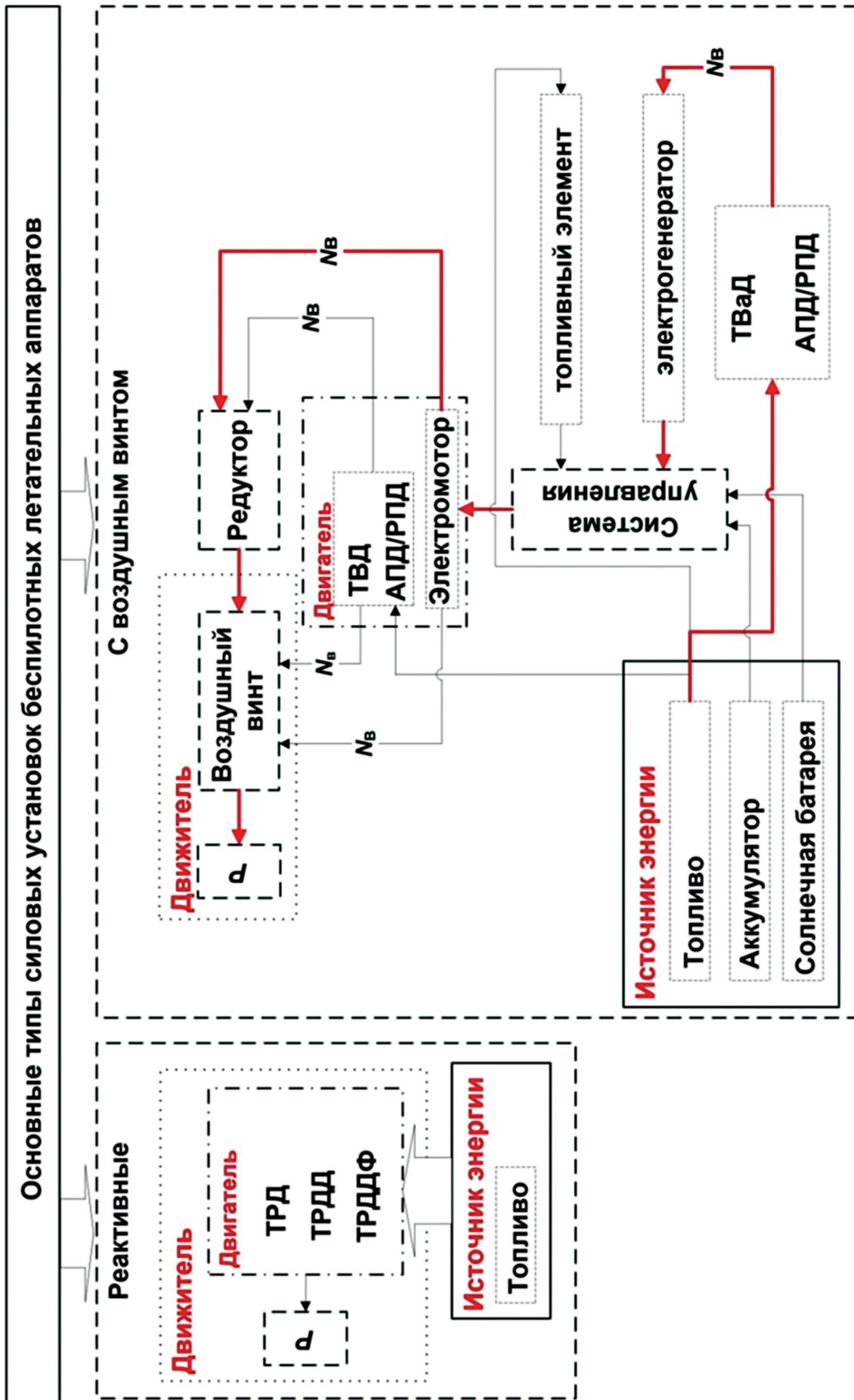


Рис. 5. Схема преобразования бортовой энергии БПЛА в тягу СУ

— провести оценку эффективности СУ перспективного средневысотного БПЛА большой продолжительности полета с поршневыми и турбовинтовыми двигателями.

#### Список источников

1. Каримов А.Х. Цели и задачи, решаемые беспилотными авиационными комплексами нового поколения // Труды МАИ. 2011. № 47. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=26767>
2. Albeaino G., Gheisari M., Franz B.W. A systematic review of unmanned aerial vehicle application areas and technologies in the aec domain // Journal of Information Technology in Construction. 2019. Vol. 24, pp. 381-405.
3. Спаткай Л. Беспилотники в боевых действиях в Нагорном Карабахе. — М.: Ridero, 2021. — 80 с.
4. Просвирина Н.В. Анализ и перспективы развития беспилотных летательных аппаратов // Московский экономический журнал. 2021. № 10. DOI: 10.24412/2413-046X-2021-10619
5. Воскресенский А. Непростое будущее российских ударных БПЛА // Военное обозрение. 2021. URL: <https://topwar.ru/190182-neprostoie-buduschee-rossijskih-udarnyh-bpla-o-prichinah-stagnacii-otraslizavisimosti-ot-importnyh-komplektujuschih-i-konceptualnom-tupike-nashih-dronov.html>
6. Бойко А. Каталог военных беспилотников. URL: <https://robotrends.ru/robopeedia/katalog-voennyh-bespilotnikov>
7. Российские беспилотники: новейшие модели для вооружённых сил. 2019. URL: [https://zen.yandex.ru/media/military\\_machines/rossiiskie-bespilotniki-noveishie-modeli-dlia-vooruzennyh-sil-5dc1dc37f73d9d00af1ce2ab](https://zen.yandex.ru/media/military_machines/rossiiskie-bespilotniki-noveishie-modeli-dlia-vooruzennyh-sil-5dc1dc37f73d9d00af1ce2ab)
8. Завасин А., Комарова Е. «Решение масштабных задач»: как Россия планирует замещать зарубежные авиационные двигатели. 2020. URL: <https://russian.rt.com/russia/article/774862-samara-dvigateli-bpla-samolyoty>
9. Ерохин Е. Новые беспилотники «Кронштадта» // Взлет. 2020. № 9-10 (189-190). С. 6-13.
10. Паньшин А. Илья Тарасенко: нас просят исправить модернизированные на Украине МиГи // РИА Новости. URL: <https://ria.ru/20190617/1555598840.html>
11. Каримов А.Х. Особенности проектирования беспилотных авиационных систем нового поколения // Труды МАИ. 2011. № 47. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=26769>
12. Ахметов Ю.М., Ахмедзянов Д.А., Михайлова А.Б., Михайлов А.Е. Особенности функционального проектирования газотурбинных двигателей для беспилотных летательных аппаратов // Вестник УГАТУ. 2013. Т. 17. № 3(56). С. 78-86.
13. Нечаев Ю.Н., Федоров Р.М., Котовский В.Н., Полев А.С. Теория авиационных двигателей. — М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 2006. Ч. 2. — 448 с.
14. Черкасов А.Н., Легконогих Д.С., Зиненков Ю.В., Панов С.Ю. Двигатели для отечественных беспилотников: прошлое, настоящее и будущее // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2018. Т. 17. № 3. С. 127-137. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-3-127-137
15. Остроухов С.П. Аэродинамика воздушных винтов и винтокольцевых движителей. — М.: Физмалит, 2014. — 328 с.
16. Перспективы развития и применения комплексов с беспилотными летательными аппаратами: Сборник докладов и статей по материалам II научно-практической конференции. — Коломна: 924 ГЦ БпА МО РФ, 2017. — 337 с.
17. ГОСТ Р № 58048-2017 Трансфер технологий. Методические указания по оценке уровня зрелости технологий. — М.: Стандартинформ, 2018. — 41 с.
18. Зиненков Ю.В., Луковников А.В., Слинко М.Б. Методика формирования технического облика и оценки эффективности силовой установки высотного беспилотного летательного аппарата // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2016. № 2-3. С. 66-80.
19. Склярова А.П., Горбунов А.А., Зиненков Ю.В., Агульник А.Б., Вовк М.Ю. Поиск оптимальной силовой установки для повышения эффективности маневренного самолёта // Вестник Московского авиационного института. 2020. Т. 27. № 4. С. 181-191. DOI: 10.34759/vst-2020-4-181-191
20. Агавердыев С.В., Зиненков Ю.В., Луковников А.В. Выбор оптимальных параметров силовой установки ударного беспилотного летательного аппарата // Вестник Московского авиационного института. 2020. Т. 27. № 4. С. 105-116. DOI: 10.34759/vst-2020-4-105-116
21. Богомолов М.А., Грасько Т.В., Зиненков Ю.В., Луковников А.В. Поиск оптимальных параметров двигателя для ближнемагистрального пассажирского самолета // Вестник Московского авиационного института. 2022. Т. 29. № 1. С. 118-130. DOI: 10.34759/vst-2022-1-118-130
22. Egorov I.N., Kretinin G.V., Leshchenko I.A., Kuptzov S.V. The main features of IOSO technology usage for multi-objective design optimization // 10th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference (30 August — 01 September 2004; Albany, New York), pp. 3437-3447. DOI: 10.2514/6.2004-4610
23. Mirzoyan A., Isyanov A., Fokin D., D'Ippolito R., Lombardi R. Multiparametric Optimization of Propulsion System for Advanced Civil Aircraft in Distributed Environment of Collaborative MDO System developed in AGILE project // 31st Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences — ICAS'2018 (09–14 September 2018; Belo Horizonte, Brasil). URL: [http://www.icas.org/ICAS\\_ARCHIVE/ICAS2018/data/papers/ICAS2018\\_0654\\_paper.pdf](http://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2018/data/papers/ICAS2018_0654_paper.pdf)

24. Зиненков Ю.В., Луковников А.В., Черкасов А.Н. Оценка эффективности силовой установки высотного беспилотного летательного аппарата // Вестник Московского авиационного института. 2015. Т. 22. № 3. С. 91-102.
25. Зиненков Ю.В., Луковников А.В. Формирование технического облика силовой установки беспилотного летательного аппарата с использованием серийного газогенератора // Климовские чтения – 2020: перспективные направления развития авиадвигателестроения: сборник статей научно-технической конференции. СПб.: Скифия-принт, 2020. С. 28-37.
26. Зиненков Ю.В., Орлов И.И. Формирование предварительного технического облика силовой установки ударного беспилотного экраноплана // Вестник УГАТУ. 2020. Т. 24. № 2(88). С. 69-78.

## References

1. Karimov A.Kh. *Trudy MAI*, 2011, no. 47. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=26767>
2. Albeaino G., Gheisari M., Franz B.W. A systematic review of unmanned aerial vehicle application areas and technologies in the AEC domain. *Journal of Information Technology in Construction*, 2019, vol. 24, pp. 381-405.
3. Spatkai L. *Bespilotniki v boevykh deistviyakh v Nagornom Karabakhe* (Drones in combat operations in Nagorno-Karabakh), Moscow, Ridero, 2021, 80 p.
4. Prosvirina N.V. *Moskovskii ekonomicheskii zhurnal*, 2021, no. 10. DOI: 10.24412/2413-046X-2021-10619
5. Voskresenskii A. *Voennoe obozrenie*, 2021. URL: <https://topwar.ru/190182-neprostoe-buduschee-rossijskih-udarnyh-bpla-o-prichinah-stagnacii-otrasli-zavisimosti-ot-importnyh-komplektujuschih-i-konceptualnom-tupike-nashih-dronov.html>
6. Boiko A. *Katalog voennykh bespilotnikov* (Catalog of military drones). URL: <https://robotrends.ru/robopeia/katalog-voennykh-bespilotnikov>
7. *Rossiiskie bespilotniki: noveishie modeli dlya vooruzhennykh sil* (Russian drones: the latest models for the armed forces). 2019. URL: [https://zen.yandex.ru/media/military\\_machines/rossiiskie-bespilotniki-noveishie-modeli-dlia-vooruzhennykh-sil-5dc1dc37f73d9d00af1ce2ab](https://zen.yandex.ru/media/military_machines/rossiiskie-bespilotniki-noveishie-modeli-dlia-vooruzhennykh-sil-5dc1dc37f73d9d00af1ce2ab)
8. Zakvasin A., Komarova E. “Reshenie masshtabnykh zadach”: kak Rossiya planiruet zameshchat zarubezhnye aviatsionnye dvigateli, 2020. URL: <https://russian.rt.com/russia/article/774862-samara-dvigateli-bpla-samolyoty>
9. Erokhin E. *Vzlet*, 2020, no. 9-10(189-190), pp. 6-13.
10. Паньшин А. *RIA Novosti*. URL: <https://ria.ru/20190617/1555598840.html>
11. Karimov A.Kh. *Trudy MAI*, 2011, no. 47. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=26769>
12. Akhmetov Yu.M., Akhmedzyanov D.A., Mikhailova A.B., Mikhailov A.E. *Vestnik UGATU*, 2013, vol. 17, no. 3(56), pp. 78-86.
13. Nechaev Yu.N., Fedorov R.M., Kotovskii V.N., Polev A.S. *Teoriya aviatsionnykh dvigatelei* (Theory of aircraft engines), Moscow, VVIA im. N.E. Zhukovskogo, 2006. Part 2, 448 p.
14. Cherkasov A.N., Legkonogikh D.S., Zinenkov Yu.V., Panov S.Yu. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie*, 2018, vol. 17, no. 3, pp. 127-137. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-3-127-137
15. Ostroukhov S.P. *Aerodinamika vozdukhnykh vintov i vintokol'tsevykh dvizhitelei* (Aerodynamics of propellers and screw-ring propulsors), Moscow, Fizmatlit, 2014, 328 p.
16. *Materialy II nauchno-prakticheskoi konferentsii “Perspektivy razvitiya i primeneniya kompleksov s bespilotnymi letatel'nymi apparatami”*, Kolomna, 924 GTs ВРА МО РФ, 2017, 337 p.
17. *Transfer tekhnologii. Metodicheskie ukazaniya po otsenke urovnya zrelosti tekhnologii. GOST R № 58048-2017* (Technology transfer. Instructional guidelines on technology maturity assessment, State Standard GOST R № 58048-2017), Moscow, Standartinform, 2018, 41 p.
18. Zinenkov Yu.V., Lukovnikov A.V., Slinko M.B. *Polet. Obshcherossiiskii nauchno-tekhnicheskii zhurnal*, 2016, no. 2-3, pp. 66-80.
19. Sklyarova A.P., Gorbunov A.A., Zinenkov Yu.V., Agul'nik A.B., Vovk M.Yu. Search for optimal power plant to improve maneuverable aircraft efficiency. *Aerospace MAI Journal*, 2020, vol. 27, no. 4, pp. 181-191. DOI: 10.34759/vst-2020-4-181-191
20. Agaverdyev S.V., Zinenkov Y.V., Lukovnikov A.V. Optimal parameters selection of the strike unmanned aerial vehicle power plant. *Aerospace MAI Journal*, 2020, vol. 27, no. 4, pp. 105-116. DOI: 10.34759/vst-2020-4-105-116
21. Bogomolov M.A., Gras'ko T.V., Zinenkov Y.V., Lukovnikov A.V. Optimal engine parameters searching for the short-haul passenger aircraft. *Aerospace MAI Journal*, 2022, vol. 29, no. 1, pp. 118-130. DOI: 10.34759/vst-2022-1-118-130
22. Egorov I.N., Kretinin G.V., Leshchenko I.A., Kuptzov S.V. The main features of IOSO technology usage for multi-objective design optimization. *10th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference (30 August - 01 September 2004; Albany, New York)*, pp. 3437-3447. DOI: 10.2514/6.2004-4610
23. Mirzoyan A., Isyanov A., Fokin D., D'Ippolito R., Lombardi R. Multiparametric Optimization of Propulsion System for Advanced Civil Aircraft in Distributed Environment of Collaborative MDO System developed in AGILE project. *31st Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences*

- ICAS'2018 (09–14 September 2018; Belo Horizonte, Brasil). URL: [http://www.icas.org/ICAS\\_ARCHIVE/ICAS2018/data/papers/ICAS2018\\_0654\\_paper.pdf](http://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2018/data/papers/ICAS2018_0654_paper.pdf)
24. Zinenkov Yu.V., Lukovnikov A.V., Cherkasov A.N. Estimation of the effectiveness of a power plant for a high-altitude unmanned aerial vehicle. *Aerospace MAI Journal*, 2015, vol. 22, no. 3, pp. 91-102.
25. Zinenkov Yu.V., Lukovnikov A.V. *Materialy nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Klimovskie chteniya – 2020: perspektivnye napravleniya razvitiya aviadvigatelestroeniya"*, St. Petersburg, Skifiya-print, 2020, pp. 28-37.
26. Zinenkov Yu.V., Orlov I.I. *Vestnik UGATU*, 2020, vol. 24, no. 2(88), pp. 69-78.

Статья поступила в редакцию 13.07.2022; одобрена после рецензирования 19.07.2022; принята к публикации 28.07.2022.

The article was submitted on 13.07.2022; approved after reviewing on 19.07.2022; accepted for publication on 28.07.2022.