

**Вариативная система привода несущего винта для перспективного винтокрылого
летательного аппарата: выбор оптимальной концепции**

**Variable rotor drive system for a prospective rotary-wing aircraft:
choosing the optimal concept**



Плущевский (Plushchevskiy) Алексей Михайлович

Главный конструктор по редукторам и трансмиссии, АО «НЦВ Миль и Камов»,

+7(916)591-65-67, ajpm@mail.ru

Аннотация

Статья посвящена анализу концепции перспективного винтокрылого летательного аппарата «НЦВ Миль и Камов», оснащённого бесступенчатой вариативной системой привода несущего винта. Анализ выполнен предложенным автором методом рационального приращения функциональности (МРПФ). В результате продемонстрирована оптимальность концепции на текущем уровне техники.

Abstract

The article examines the concept of a prospective rotary-wing aircraft with electromechanical continuously variable rotor drive developed by JSC 'Mil&Kamov'. For that, the author's Rational Increment of Functionality Method (RIFM) is applied. The results prove the optimality of the concept at the current state of the art.

Ключевые слова: вертолёт, вариативная бесступенчатая трансмиссия, перспективный винтокрылый летательный аппарат

Keywords: helicopter, continuously variable transmission, prospective rotary-wing aircraft

Введение

Конкурентная борьба, ужесточение экологических ограничений и опыт военных операций стимулируют мировых разработчиков вертолётной техники к поиску пути улучшения эксплуатационных характеристик вновь разрабатываемых образцов техники. Одно из актуальных направлений перспективных разработок – создание винтокрылых летательных аппаратов (ВКЛА) нового поколения, оснащённых бесступенчатой вариативной системой привода (трансмиссией) несущего винта (CVT). Техническая идеология данного направления изложена в публикациях [1], [2], [3]. Перспектива создания ВКЛА, оснащённых CVT, обозначена в статье к.т.н. Калинина Д. В. [4] в числе прочих направлений совершенствования трансмиссий современных вертолётных. В упомянутых научных работах обозначены основные трудности на пути создания ВКЛА с CVT. В первую очередь это неизбежное превышение массы CVT по отношению к трансмиссии с фиксированным передаточным числом (FRT). Тем не менее существует область задач и параметров ВКЛА, в которой полезный эффект от применения CVT превышает негативный эффект от увеличения массы [5], [6], [7]. Исследования в указанном направлении ведутся в США, ЕС, КНР. В России исследования, направленные на создание ВКЛА, оснащённых CVT, велись начиная с 2010 года в ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова» [8], [9], в АО «Камов» [10], [11] и АО «МВЗ им. М.Л. Миля» [12]. В настоящее время исследования продолжаются в АО «НЦВ Миль и Камов», в результате чего разработана и запатентована концепция ВКЛА с электромеханической CVT [13].

Цель данной статьи - анализ оптимальности концепции [13] предлагаемым нами методом рационального приращения функциональности.

Материалы и Методы

В процессе формирования концепции [13] рассматривались и оценивались разные варианты вариативных трансмиссий. Ступенчатые трансмиссии были исключены из рассмотрения по причине невозможности гарантии безопасности при их применении в ВКЛА, так как при переключении передач неизбежен разрыв кинематической связи между несущим винтом и двигателем, что является потенциальной угрозой безопасности полёта, а обеспечение

надёжного плавного переключения передач является сложной технической задачей, реализация которой нивелирует разницу в ресурсоёмкости между ступенчатой и бесступенчатой передачами. Кроме того, CVT, по сравнению со ступенчатой вариативной трансмиссией, потенциально способна обеспечить ВКЛА повышенную адаптивность к условиям полёта. Также были отвергнуты механические CVT, так как являясь фрикционными механизмами, они обладают недостаточной энерговооружённостью и КПД для применения в конструкции ВКЛА. В первом приближении для формирования концепции были выбраны комбинированные (гибридные) гидромеханические или электромеханические передачи, при этом среди гидромеханических предпочтение было отдано гидрообъёмно-механическим по причине более высокого КПД.

Общий принцип конструирования бесступенчатых гибридных передач заключается в том, что в кинематическую цепь встраивается зубчатый дифференциал, входное звено которого соединено с источником механической энергии (двигателем), выходное звено – с потребителем механической энергии (в нашем случае - с несущим винтом), а третье звено – с гидро- или электроприводом. Гидравлический привод состоит из двух соединённых между собой трубопроводами регулируемых гидрообъёмных машин: первая из которых механически соединена с третьим звеном зубчатого дифференциала, а вторая – с входным или выходным звеном трансмиссии. Электрический привод состоит из двух обратимых электрических машин, электрически соединённых между собой: первая из которых соединена с третьим звеном зубчатого дифференциала, а вторая – с входным или выходным звеном трансмиссии. Машину гидро- или электропривода, механически соединённую с третьим звеном зубчатого дифференциала, будем называть управляющей (МУ), так как частота и направление вращения вала этой машины определяют передаточное отношение трансмиссии между входным и выходным валами. Машину гидро- или электропривода, механически соединённую с входным или выходным звеном трансмиссии, будем называть балансирующей (МБ). Для уменьшения мощности, и, как следствие, массы гидро- или электропривода выбран вариант механического

соединения МБ с входным звеном трансмиссии [14, с. 485]. В передаче, сконструированной таким образом, передача мощности разделяется на два потока: первый из них передаётся через механические звенья с постоянным передаточным числом, а второй – через гидро- или электроприводы, обладающие вариативностью. В простейшем случае такая гибридная передача является двухпоточной. Структурная схема механизма представлена на рисунке 1.

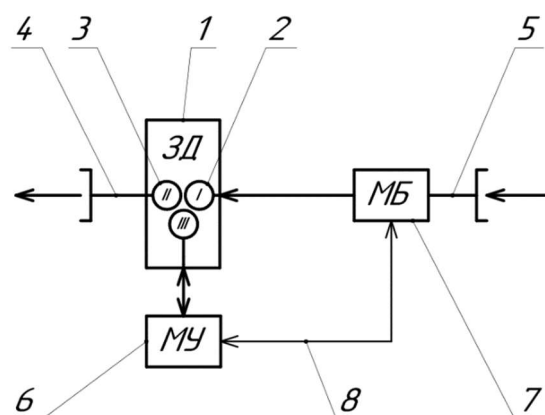


Рисунок 1 – Структурная схема бесступенчатой гибридной двухпоточной передачи с электрической или гидрообъёмной передачей с внешним разветвлением и трехзвенным дифференциалом на выходе. 1 – зубчатый дифференциал, 2 – входное (первое) звено зубчатого дифференциала, 3 – выходное (второе) звено зубчатого дифференциала, 4 – выходной вал, 5 – входной вал, 6 – машина управляющая, 7 – машина балансирующая, 8 – электрическая или гидравлическая связь

В настоящей статье продемонстрированы причины, по которым концепция [13] основана именно на электромеханической CVT, что выполнено методом, изложенным ниже.

Метод рационального приращения функциональности (МРПФ) проектируемого объекта, заключается в том, что оценка новых альтернативных технических решений, производится по четырём критериям: приращения функциональности, обеспечения безопасности, минимизации ресурсоёмкости, обеспечения технической реализуемости.

Для качественной сравнительной оценки новых технических решений, которые предполагается реализовать в проектируемом объекте, формируют «базовую конструкцию» объекта, функциональность которого предполагается расширить за счёт внедрения нового технического решения. В «базовую конструкцию» включают только те элементы, которые

имеют отношение к реализации рассматриваемых функций объекта и могут быть сопоставлены с аналогичными элементами оцениваемых новых технических решений.

Далее производят рейтинговую оценку в баллах для каждого нового технического решения в сравнении с «базовой конструкцией» по каждому из указанных выше четырёх критериев. Ниже изложены методики начисления рейтинговых баллов, которые индивидуальны для каждого из критериев.

Приращение функциональности проектируемого объекта оценивают как количество создаваемых вследствие реализации нового технического решения дополнительных возможностей для улучшения функциональных и эксплуатационных свойств, экономических параметров. За каждую дополнительную по отношению к «базовой конструкции» потенциальную возможность улучшения функциональных и эксплуатационных свойств или экономических параметров оцениваемое техническое решение получает +1 балл.

Обеспечение безопасности проектируемого объекта оценивают как влияние нового технического решения на соответствие проектируемого объекта применимым нормативным требованиям в части безопасности и охраны окружающей среды. За каждый фактор, потенциально представляющий угрозу для людей и окружающей среды техническое решение получает штрафной -1 балл.

Минимизация ресурсоёмкости проектируемого объекта оценивают путём подсчёта добавленных новым техническим решением в «базовый вертолёт» элементов конструкции или агрегатов. Методика начисления баллов рейтинга по критерию минимизации ресурсоёмкости приведена в таблице 1.

Таблица 1 Оценка рейтинга проектируемого объекта в соответствии с МРПФ по критерию минимизации ресурсоёмкости

Элемент конструкции или агрегат	Полностью новый	Замещает элемент «базовой» конструкции		
		Увеличивает массу	Не увеличивает массу	Уменьшает массу
Балл рейтинга	-1	-0,5	0	+1

В данной методике в качестве ресурсов рассматриваются: материалы, энергия и трудоёмкость технического обслуживания. Предполагается, что внесение в систему дополнительных точек преобразования энергии и мощности (элементов конструкции и агрегатов) неизбежно приводит к: увеличению массы, снижению КПД, увеличению трудоёмкости технического обслуживания проектируемого объекта.

Обеспечение технической реализуемости оценивают как зрелость технологий, производства, интеграции в соответствии с ГОСТ Р58048 -2017. В настоящей статье принято, что все рассматриваемые нами технические решения имеют равный уровень зрелости, что соответствует текущей ситуации, поэтому каждое из них получает по данному критерию условный +1 балл.

В качестве «базовой конструкции» в настоящей статье принята конструкция классического (не скоростного) вертолѐта (ортодоксальной «одновинтовой» или неортодоксальной соосной компоновки) с минимум одним газотурбинным двигателем. Структурная схема такой конструкции – «базовый вертолѐт» представлена на рисунке 2.

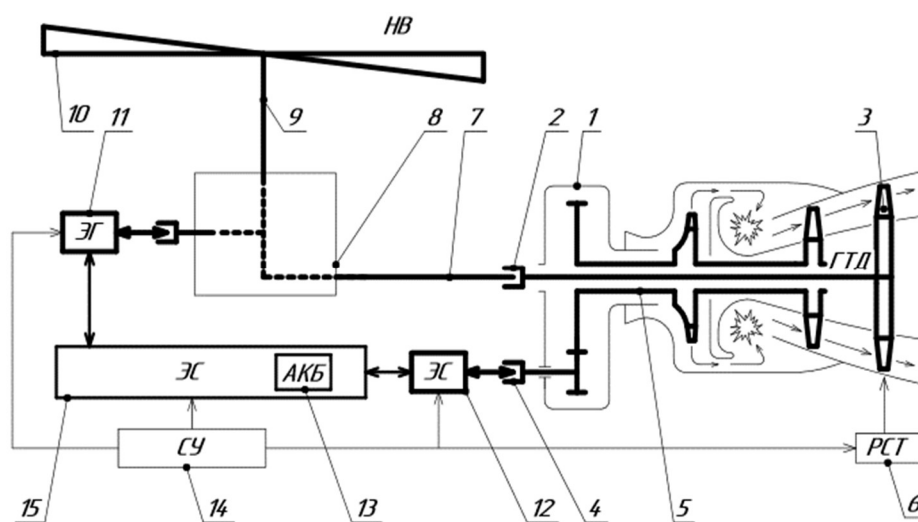


Рисунок 2 - Структурная схема «базового» вертолѐта. 1 - газотурбинный двигатель (ГТД), 2 - выходной вал ГТД, 3 - свободная турбина, 4 - привод стартѐра, 5 - вал компрессора ГТД, 6 - регулятор частоты вращения свободной турбины, 7 – входной вал трансмиссии, 8 – трансмиссия, 9 – вал несущего винта, 10 – несущий винт, 11 –

электрогенератор, 12 – электростартер, 13 – аккумуляторная батарея, 14 – система управления, 15 – электросистема.

В структуру «базового вертолѐта» включены только те элементы, которые необходимы для реализации функций системы привода несущего винта (далее - трансмиссии) и силовой установки. Для упрощения не рассматривается система компенсации реактивного момента несущего винта. «Базовый вертолѐт» (рис. 2) состоит из: газотурбинного двигателя (ГТД), оснащённого регулятором свободной турбины (РСТ), трансмиссии с фиксированным передаточным числом, в составе которой имеется главный редуктор, несущего винта (НВ), электросистемы (ЭС), включающей в себя электростартер (ЭСТ), механически соединѐнный с валом компрессора ГТД, электрогенератор (ЭГН), механически соединѐнный с трансмиссией, аккумуляторную батарею (АКБ), системы управления (СУ), при помощи которой в ручном или автоматическом режиме осуществляется управление агрегатами и системами.

Далее приведен анализ оптимальности концепции [13] предложенным методом.

Результаты

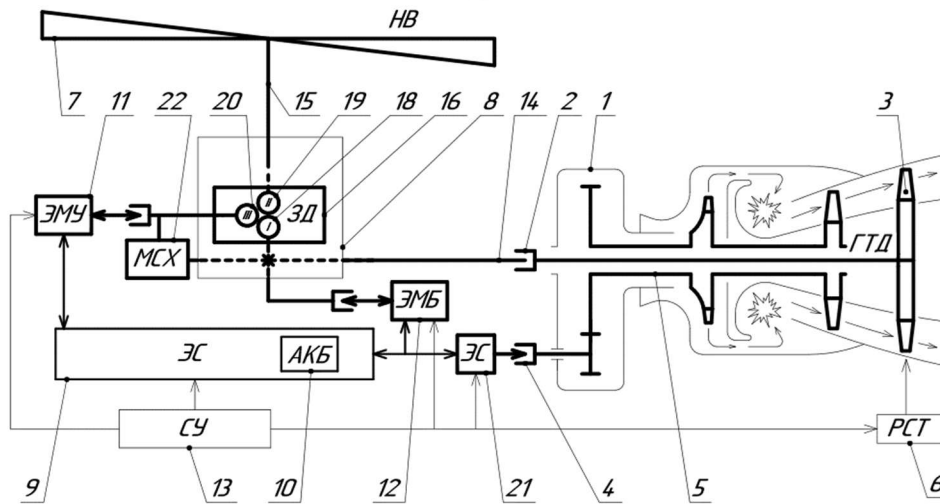
Сравнительная оценка на основе МРПФ гидромеханического и электромеханического вариантов CVT для ВКЛА представлена в Таблице 2. Результат показывает, что электромеханический вариант CVT имеет незначительное преимущество. Далее будет показано, что именно в концепции [13] электромеханический вариант CVT позволяет существенно увеличить функциональность перспективного ВКЛА при минимальном увеличении ресурсоѐмкости.

Таблица 2. Сравнительная МРПФ оценка гидромеханического и электромеханического вариантов бесступенчатой гибридной трансмиссии ВКЛА

Критерий оценки	Объект оценки	Рейтинг		Обоснование оценки
		Гидро- механическая	Электро- механическая	

Приращение функциональности	Вариативность трансмиссии	1	1	Новая функция позволяющая улучшить эксплуатационные характеристики.
	Работа двигателей в режиме ВСУ	1	1	Новая функция, позволяющая выполнять запуск и работу двигателей с остановленным несущим винтом, что позволяет вести техобслуживание при базировании вне аэродрома или осуществлять безопасную посадку пассажиров.
Обеспечение безопасности	Вся трансмиссия	-1	-1	Эксплуатация гидромеханической передачи предполагает хранение, применение и утилизацию дополнительного количества огнеопасной и токсичной жидкости. Электромеханическая трансмиссия предполагает применение высоковольтной электроэнергетической системы.
Минимизация ресурсоёмкости	Зубчатый дифференциал	-0,5	-0,5	Зубчатый дифференциал может дополнительно выполнять функцию ступени редукции и таким образом заместить элемент «базового вертолѐта». Обеспечение подвижности третьего звена и обеспечение его привода от управляющей машины могут привести к увеличению массы.
	Управляющая машина	-1	-1	Во всех вариантах управляющая машина является новым элементом по отношению к конструкции «базового вертолѐта».
	Балансировочная машина	-1	-0,5	Электропривод в составе трансмиссии может выполнять функцию источника электроэнергии для бортовой электросистемы, замещая электрогенератор «базового вертолѐта», так как одна из машин (в данном случае балансировочная) всегда работает в режиме генератора. По предварительной оценке - ожидаемая циркуляция мощности в электроприводе превышает требуемую мощность электросистемы «базового вертолѐта», поэтому масса новой конструкции увеличивается.
Обеспечение технической реализуемости	Вся трансмиссия	1	1	Зрелость технологий, производства, интеграции для рассматриваемых вариантов одинакова
Итого:		-0,5	0	

а) «Сафран»:



б) «НЦВ Миль и Камов»:

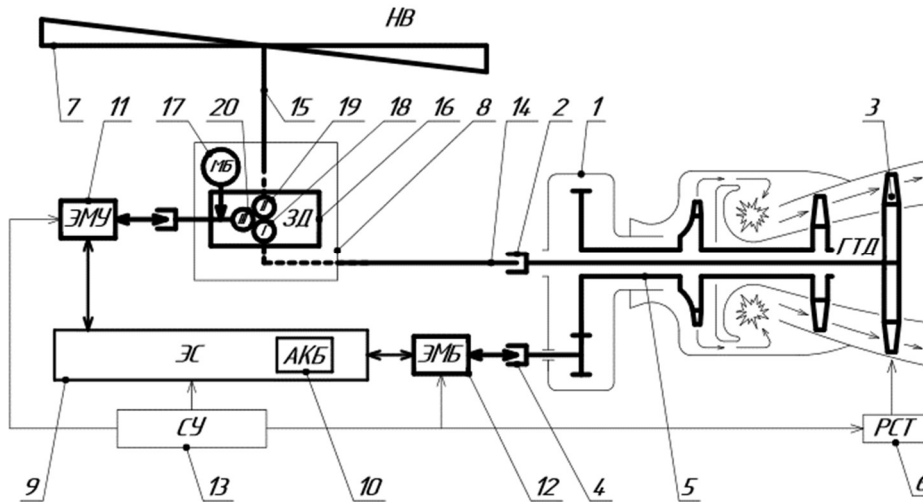


Рисунок 3 - Структурные схемы вертолётов, оснащённых CVT в соответствии с патентами «Сафран» и «НЦВ Миль и Камов». 1 - газотурбинный двигатель (ГТД), 2 - выходной вал ГТД, 3 - свободная турбина, 4 - привод стартера, 5 - вал компрессора ГТД, 6 - регулятор частоты вращения свободной турбины, 7 – несущий винт, 8 – трансмиссия, 9 – электросистема, 10 – аккумуляторная батарея, 11 – управляющая (первая) обратимая электрическая машина, 12 – балансировочная (вторая) обратимая электрическая машина, 13 – система управления, 14 – входной вал трансмиссии, 15 – выходной вал трансмиссии (вал несущего винта), 16 – зубчатый дифференциал, 17 – энергонезависимый блокировочный механизм, 18 – первое звено зубчатого дифференциала, 19 – второе звено зубчатого дифференциала, 20 – третье звено зубчатого дифференциала, 21 – электростартер, 22 – дополнительная муфта свободного хода для обеспечения безопасности.

Концепция ВКЛА, оснащённого CVT в виде бесступенчатой гибридной двухпоточной трансмиссии с электрической передачей с внешним разветвлением и трехзвенным дифференциалом на выходе, не обладает технической новизной: французское предприятие SAFRAN HELICOPTER ENGINES (далее «Сафран») запатентовало такое решение [15] в 2018

году. Далее показан результат сравнения концепции «НЦВ Миль и Камов» [13] и «Сафран» [15] на основе МРПФ. Структурные схемы вертолётов, оснащённых CVT на основе патентов «Сафран» [15] и «НЦВ Миль и Камов» [13], приведены на рис. 3 а) и б) соответственно. Принципиальное отличие концепции «НЦВ Миль и Камов», от концепции «Сафран» заключается в том, что балансировочная обратимая электрическая машина кинематически соединена не с валом трансмиссии, а с валом компрессора ГТД [13]. Результат сравнительной оценки концепций «Сафран» [15] и «НЦВ Миль и Камов» [13] представлен в таблице 3.

Таблица 3. Сравнительная МРПФ оценка концепций ВКЛА с электромеханической CVT «Сафран» и «НЦВ Миль и Камов»

Критерий оценки	Объект оценки	Рейтинг		Обоснование оценки
		«Сафран»	«НЦВ Миль и Камов»	
Приращение функциональности	Вариативность трансмиссии	1	1	Новая функция, позволяющая улучшить эксплуатационные характеристики.
	Работа двигателей в режиме ВСУ	1	1	Новая функция, дающая возможность выполнять запуск и работу двигателей с остановленным несущим винтом, что позволяет вести техобслуживание при базировании вне аэродрома или осуществлять безопасную посадку пассажиров.
	Улучшение приемистости ГТД с защитой от помпажа	0	1	Новая функция, позволяющая сократить время приемистости вала компрессора ГТД при переходных режимах с сохранением запасов по помпажу.
	Рекуперация энергии компрессора ГТД при переходных режимах	0	1	Новая функция, позволяющая осуществлять рекуперацию энергии при замедлении вала компрессора ГТД при переходных режимах
	Технология СТАРТ/СТОП для многодвигательного ВКЛА	0	1	Новая функция, позволяющая оптимизировать удельный расход топлива за счёт того, что в течение полёта осуществляется переход на полёт на одном газотурбинном двигателе, а остальные отключаются или переводятся в режим готовности к ускоренному запуску с последующей реактивацией.

Минимизация ресурсоёмкости	Зубчатый дифференциал	-0,5	-0,5	Зубчатый дифференциал может дополнительно выполнять функцию ступени редукции и таким образом заместить элемент «базовой» конструкции. Обеспечение подвижности третьего звена и обеспечение его привода от управляющей машины могут привести к увеличению массы
	Управляющая машина	-1	-0,5	Электропривод в составе трансмиссии может выполнять функцию источника электроэнергии для бортовой электросистемы. В варианте «НЦВ Миль и Камов» балансировочная машина замещает электростартер, а управляющая - электрогенератор. По нашей предварительной оценке - ожидаемая циркуляция мощности в электроприводе превышает потребную мощность электросистемы конструкции «базового вертолѐта», поэтому масса новой конструкции увеличивается.
	Балансировочная машина	-0,5	-0,5	
	Механизм блокировки третьего звена зубчатого дифференциала	-1	-1	Оба решения содержат дополнительный механизм, необходимый для обеспечения безопасности
Обеспечение безопасности	Механизм блокировки третьего звена зубчатого дифференциала	-1	0	В конструкции «Сафран» при отказе управляющей электромашины возможно резкое возрастание динамической составляющей крутящего момента, что может привести к повреждению трансмиссии.
Обеспечение технической реализуемости	ВКЛА, оснащённый CVT	1	1	Зрелость технологий, производства, интеграции для рассматриваемых вариантов одинакова
Итого:		-1	3,5	

Сравнительная оценка (таблица 3) показывает существенное преимущество концепции «НЦВ Миль и Камов», в решающей степени - за счёт приращения функциональности. Механическое соединение обратимой электрической машины с валом компрессора открывает путь к применению технологий, улучшающих эксплуатационные свойства ГТД. Такими технологиями являются: улучшение приемистости вала компрессора ГТД при переходных режимах с сохранением запасов по помпажу (пример реализации: [16, 17]), рекуперация

энергии при замедлении вала компрессора ГТД при переходных режимах (пример реализации: [16, 17]), технология СТАРТ/СТОП для многодвигательного летательного аппарата, что приводит к оптимизации удельного расхода топлива за счёт того, что в течение полёта осуществляется переход в режим полёта на одном газотурбинном двигателе, а остальные отключаются или переводятся в режим готовности к ускоренному запуску с последующей реактивацией (пример реализации: [18]).

Концепция «НЦВ Миль и Камов» [13] обеспечивает меньшую ресурсоёмкость за счет совмещения функций первой и второй обратимых электрических машин, как агрегатов трансмиссии, так и элементов общей электросистемы вертолёта. Обратимые электрические машины используются не только в качестве агрегатов для управления передаточным числом трансмиссии, но и в качестве источника энергии для питания электросистемы ВКЛА. Таким образом, возможно исключение из состава ВКЛА специальной системы электрогенерации для питания бортовых потребителей. Механическое соединение второй обратной электрической машины с валом компрессора газотурбинного двигателя позволяет использовать вторую обратимую электрическую машину в качестве стартера и исключить из состава винтокрылого летательного аппарата специальную систему электрозапуска.

По критерию обеспечения безопасности концепция «НЦВ Миль и Камов» [13] имеет преимущество.

По критерию обеспечения технической реализуемости на текущий момент концепции «НЦВ Миль и Камов» [13] и «Сафран» [15] равнозначны.

Обсуждение

Концепция «НЦВ Миль и Камов» [13] перспективного ВКЛА с электромеханической CVT имеет преимущество над другими концепциями за счёт того, что обеспечивает максимальное приращение функциональности ВКЛА при минимальной ресурсоёмкости, что достигается за счёт включения в процесс оптимизации конструкции не только компонентов отдельно взятой системы – трансмиссии, но и компонентов смежных систем ВКЛА, таких как

ГТД и электросистема. В результате совмещаются функции обратимых электромашин в качестве элементов CVT, источников энергии в электросистеме ВКЛА и элементов силовой установки.

Для реализации потенциально заложенных новых функциональных возможностей концепция [13] нуждается в дальнейшем развитии. Кроме направлений совершенствования трансмиссий винтокрылых летательных аппаратов, обозначенных в статье к.т.н. Калинина Д.В. [4], требуются дополнительные исследования.

В области аэродинамики должны быть проведены исследования с целью разработки алгоритмов вычисления оптимальной частоты вращения несущего винта в зависимости от условий полёта.

В области двигателестроения необходимы исследования в части изучения взаимодействия компрессора ГТД и обратной электромашин. Патентование технических решений в этой области демонстрирует активность ведущих мировых двигателестроителей.

В области электромеханических систем необходимы исследования в направлении оптимизации обратимых электрических машин, электромагнитной совместимости, моделирования переходных электромеханических процессов, а также - оптимизации структуры и ёмкости буферных аккумуляторных батарей.

Требуются разработка и отработка алгоритмов и систем управления предлагаемым летательным аппаратом с учётом различных вариантов применения и требований безопасности.

Безусловно, необходимы: конструкторская проработка предлагаемой концепции, функциональное цифровое и натурное моделирование в виде наземных и лётных демонстраторов для повышения зрелости технологий, производства, интеграции.

Перечисленный выше объём исследований, скорее всего, не является исчерпывающим, поэтому решающее значение на стадии замысла имеет выбор оптимальной концепции

перспективного ВКЛА, оснащённого CVT, что выполнено в настоящей статье предложенным нами методом МРПФ.

Выводы

Создание перспективного винтокрылого летательного аппарата (ВКЛА), оснащённого CVT, является актуальной задачей мирового вертолётостроения.

Разработанная и запатентованная «НЦВ Миль и Камов» концепция ВКЛА, оснащённого электромеханической CVT [13], на текущем уровне техники, как показано в настоящей статье, является оптимальной.

Оценка оптимальности концепции [13] выполнена предложенным нами методом МРПФ. Данный подход позволит в дальнейшем избежать значительных затрат на проведение исследований и конструирование «тупиковых» концепций перспективных ВКЛА.

Библиографический список

1. Mistry M., Gandhi F. Helicopter performance improvement with variable rotor radius and RPM //Journal of the American Helicopter Society. – 2014. – Т. 59. – №. 4. – С. 17-35.
2. Garre W. et al. Helicopter configurations and drive train concepts for optimal variable rotor-speed utilization. – Munich: Deutsche Gesellschaft für Luft-und Raumfahrt-Lilienthal-Oberth eV, 2017.
3. Polyzos N. D. et al. Multi-disciplinary optimization of variable rotor speed and active blade twist rotorcraft: Trade-off between noise and emissions //Aerospace Science and Technology. – 2020. – Т. 107. – С. 106356.
4. Калинин Д.В. Перспективные направления совершенствования трансмиссий винтокрылых летательных аппаратов // Авиационные двигатели 2023. №4 (21). С. 39-50.
5. Garre W., Pflumm T., Hajek M. Enhanced efficiency and flight envelope by variable main rotor speed for different helicopter configurations. – 2016,

6. Misté G. A., Benini E. Variable-speed rotor helicopters: performance comparison between continuously variable and fixed-ratio transmissions //Journal of Aircraft. – 2016. – Т. 53. – №. 5. – С. 1189-1200.
7. Miste G. A. et al. Turboshift engine performance comparison between CVT and fixed ratio transmission for a variable speed rotor helicopter //39th European Rotorcraft Forum 2013, ERF 2013. – Russian Helicopters, 2013. – С. 180-182.
8. Kalinin D. V., Kozharinov E. V. Optimal high-speed helicopter transmission designs //28th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences. – 2012. – С. 23-28.
9. Kalinin D. V. Multithreaded continuously variable transmission synthesis for next-generation helicopters //29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences. – 2014. – С. 7-12.
10. Пат. № RU179890U1, МПК, B64C 27/12 (2006.01), B64D 35/04 (2006.01), F02C 3/13 (2006.01). Силовая установка скоростного комбинированного вертолета (винтокрыла) / С.В. Михеев и др. № 2017143792; опубл. 28.05.18; приоритет 14.12.17 // Бюл. № 16.
11. Пат. № RU203680U1, МПК, B64C 27/22 (2006.01), B64C 27/12 (2006.01). Силовая установка скоростного комбинированного вертолета (винтокрыла) / С.В. Михеев и др. Российская Федерация, от имени которой выступает Министерство обороны Российской Федерации (RU). № 2020136515; опубл. 15.04.21; приоритет 06.11.20 // Бюл. № 11.
12. Пат. № RU2525353C1, МПК, B64C 27/12 (2006.01), B64D 35/00 (2006.01), F16H 37/08 (2006.01). Регулируемая трансмиссия винтокрылого летательного аппарата / Д.О. Жданов. ОАО "Московский Вертолетный Завод Им. М.Л. Миля". № 2013111572/11; опубл. 10.08.14; приоритет 15.03.13 // Бюл. № 22.
13. Пат. № RU2822499C1, МПК, B64C 27/12 (2006.01), B64D 35/02 (2006.01). Винтокрылый летательный аппарат с электромеханической бесступенчатой вариативной трансмиссией и способ балансировки мощности электросистемы летательного аппарата /

А.Ю. Вагин и др. АО "НЦВ Миль и Камов". № 2023117655; опубл. 08.07.24; приоритет 05.07.23
// Бюл. № 19.

14. Планетарные передачи : справочник / под редакцией В. Н. Кудрявцева, Ю. Н. Кирдяшева. — Ленинград : Машиностроение, 1977. — 475 с.

15. Пат. № RU2672536C2, МПК В64С 27/12 (2006.01), В60К 6/08 (2006.01), F16Н 3/72 (2006.01). Сборка трансмиссии для воздушного судна и вертолёт / С. Беддок и др. САФРАН ХЕЛИКОПТЕР ЭНДЖИНЗ (FR). № 2016141938; опубл. 15.11.18; приоритет 20.03.15
// Бюл. № 32.

16. Пат. № RU2462607C2, МПК, F02С 7/268 (2006.01), F01D 15/10 (2006.01), F02С 3/10 (2006.01), F02С 3/113 (2006.01), F02С 7/36 (2006.01). Устройство содействия для переходных фаз разгона и торможения / Э. Энер и др. ТУРБОМЕКА (FR). № 2009140975/06; опубл. 27.09.12; приоритет 04.04.08 // Бюл. № 27

17. Пат. № RU2686236C2, МПК, F02С 7/262 (2006.01). Устройство помощи во вращении газогенератора одного из двигателей воздушного судна, имеющего по меньшей мере два двигателя со свободными турбинами / В. Пумаред и др. САФРАН ХЕЛИКОПТЕР ЭНДЖИНЗ (FR). № 2016141965; опубл. 24.04.19; приоритет 26.03.15 // Бюл. № 12.

18. Пат. № RU2663786C2, МПК, F02С 6/20 (2006.01), F02С 9/44 (2006.01). Способ оптимизации удельного расхода топлива двухмоторного вертолета / П. Маркони и др. ТУРБОМЕКА (FR). № 2016113254; опубл. 09.08.18; приоритет 03.10.14 // Бюл. № 22.