

# КОНЦЕПЦИЯ ВАРИАТИВНОГО ПРИВОДА НЕСУЩЕГО ВИНТА ВИНТОКРЫЛОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

А.М. Плущевский<sup>1</sup>

<sup>1</sup> АО «НЦВ Миль и Камов», Томилино

Доклад содержит изложение концепции бесступенчатой вариативной системы привода несущего винта для перспективных винтокрылых летательных аппаратов.

## VARIABLE MAIN ROTOR DRIVE SYSTEM CONCEPT FOR A ROTARY-WING AIRCRAFT

A.M. Plushchevskiy<sup>1</sup>

<sup>1</sup> JSC 'Mil&Kamov', Russia

The report contains an outline of the continuously variable rotor drive system concept for prospective rotary-wing aircraft.

### 1 Введение

Создание винтокрылых летательных аппаратов (ВКЛА), оснащённых бесступенчатой вариативной системой привода (CVT) несущего винта, является одним из наиболее актуальных направлений мирового авиастроения [1,2]. Причиной интереса разработчиков к данному направлению является перспектива существенного уменьшения удельного расхода топлива винтокрылых машин за счёт оптимизации работы несущего винта в широком диапазоне изменяющихся условий полёта [3]. Основной трудностью на пути создания CVT для ВКЛА является неизбежное превышение массы CVT по отношению к трансмиссии с фиксированным передаточным числом (FRT). Тем не менее, результаты моделирования показывают, что существует область задач и параметров ВКЛА, в которой полезный эффект от применения CVT превышает негативный эффект от увеличения массы [4]. К настоящему времени в области разработки перспективных ВКЛА сформировалась тенденция - комбинированный (гибридный) электромеханический привод (E-CVT) несущего винта, что отражено в публикациях [5,6,7,8,9] и патентах [10,11].

В настоящем докладе приведена концепция E-CVT для перспективных ВКЛА, опубликованная АО «НЦВ Миль и Камов» в 2024 году [11], демонстрируется логика формирования данной концепции и её преимущества.

### 2. Материалы и методы

Для поиска оптимальных технических решений был разработан Метод рационального приращения функциональности (МРПФ) проектируемого объекта. Данный метод заключается в том, что оценка новых альтернативных технических решений, производится путём их ранжирования в соответствии с рейтингом,

который рассчитывается по четырём критериям: приращения функциональности, обеспечения безопасности, минимизации ресурсоёмкости, обеспечения технической реализуемости [12].

В соответствии с МРПФ 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.

*Приращение функциональности* проектируемого объекта оценивается как количество создаваемых дополнительных (по сравнению с «базовой конструкцией») возможностей для улучшения функциональных и эксплуатационных свойств, экономических параметров, появляющихся вследствие реализации нового технического решения. Каждая новая функциональная возможность повышает рейтинг.

*Обеспечение безопасности* проектируемого объекта оценивается как влияние нового технического решения на соответствие проектируемого объекта применимым нормативным требованиям в части безопасности и охраны окружающей среды. Каждый новый (по сравнению с «базовой конструкцией») привнесённый фактор опасности понижает рейтинг.

*Минимизация ресурсоёмкости* проектируемого объекта оценивается путём подсчёта элементов или агрегатов, добавленных новым техническим решением в «базовую конструкцию». Каждая новая «точка преобразования энергии или мощности» (элемент конструкции и/или агрегат) снижает рейтинг, так как неизбежно приводит к увеличению массы, снижению КПД, увеличению трудоёмкости технического обслуживания проектируемого объекта.

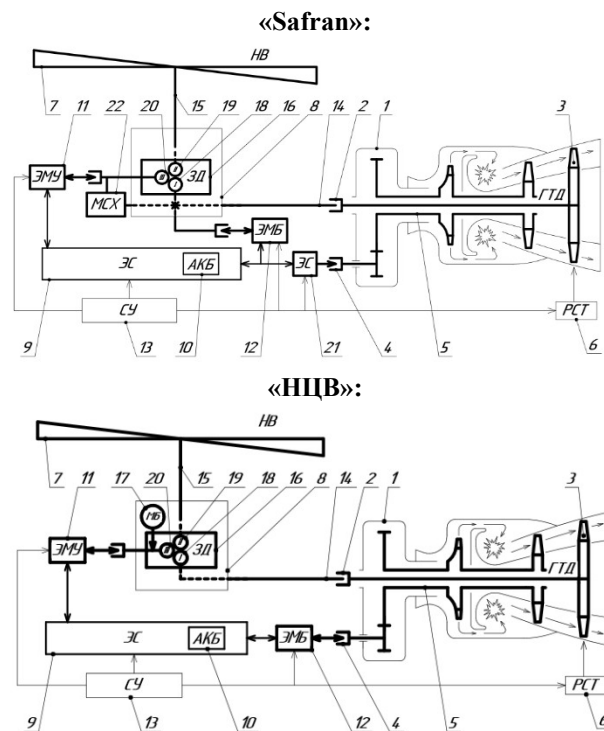
*Обеспечение технической реализуемости* оценивается как зрелость технологий, производства,

интеграции в соответствии с ГОСТ Р58048-2017. Если рассматриваемые технические решения имеют равный уровень зрелости, то каждое из них получает по данному критерию равный условный балл.

### 3. Результаты

В процессе формирования концепции [11] рассматривались и оценивались разные варианты вариативных трансмиссий. Ступенчатые трансмиссии были исключены из рассмотрения по причине невозможности гарантии безопасности при их применении в ВКЛА. Также были отвергнуты механические CVT, так как являясь фрикционными механизмами, они обладают недостаточными энерговооружённостью и КПД для применения в конструкции ВКЛА. В первом приближении для формирования концепции были выбраны комбинированные (гибридные) гидромеханическая (H-CVT) или электромеханическая (E-CVT) передачи двухпоточные с дифференциалом на выходе [13]. Анализ МПРФ показал незначительное преимущество E-CVT перед H-CVT [12], что совпало с основной тенденцией в мировом вертолётостроении [5,6,7,8,9,10].

При развитии намеченного подхода было выработано обладающее новизной техническое решение, которое было зафиксировано в патенте АО «НЦВ Миль и Камов» [11]. В качестве прототипа был принят патент [10] предприятия «Safran Helicopter Engines» (Франция). Сравнительные структурные схемы конструкций ВКЛА с E-CVT по патентам [10] (далее «Safran») и [11] (далее «НЦВ») изображены на рисунке 1. Обе конструкции предполагают наличие зубчатого дифференциала. Первое звено зубчатого дифференциала кинематически соединено с выходным валом двигателя, второе звено зубчатого дифференциала кинематически соединено с несущим винтом (НВ) ВКЛА, а третье звено зубчатого дифференциала соединено с обратимой электромашиной, которая необходима для управления передаточным числом E-CVT и называется «управляющая». Обе конструкции содержат в своём составе вторую обратимую электромашину, которая необходима для балансировки электросистемы и называется «балансирующая». Существенным конструктивным отличием между конструкциями является то, что «балансирующая» электромашина кинематически соединена не с валом E-CVT, а с приводом компрессора газотурбинного турбовального двигателя (ГТД).



**Рис. 1.** Структурные схемы вертолётных трансмиссий «Safran» и «НЦВ». 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 - балансирующая (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.

Сравнительный анализ МПРФ для патентов «Safran» и «НЦВ» демонстрирует рейтинг -1 и 3,5 соответственно [12].

### 4. Обсуждение

За счёт чего оказалось возможным «взрывное» приращение рейтинга МПРФ с -1 для конструкции «Safran» до 3,5 для конструкции «НЦВ»?

Концепция «НЦВ» конструкции E-CVT для перспективного ВКЛА [11] имеет преимущество над концепцией «Safran» и аналогичными [5,6,7,8,9] за счёт того, что обеспечивает максимальное приращение

функциональности ВКЛА при минимальной ресурсоёмкости. Это достигается за счёт включения в процесс оптимизации конструкции не только компонентов отдельно взятой системы привода НВ, но и компонентов смежных систем ВКЛА, таких как ГТД и электросистема. В результате обратимые электромашины совмещают в себе функции элементов E-CVT, источников энергии для электросистемы ВКЛА и элементов силовой установки [12].

*Приращение функциональности.* Кинематическое соединение «балансировочной» электромашины с валом компрессора ГТД позволяет не только балансировать электросистему, что необходимо для нормального функционирования E-CVT, но и реализовать дополнительные полезные функции: улучшение приемистости вала компрессора ГТД при переходных режимах с сохранением запасов по помпажу (пример реализации - патент [14]), рекуперацию энергии при замедлении вала компрессора ГТД при переходных режимах (пример реализации: [14]), технологию 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 - патент [15]).

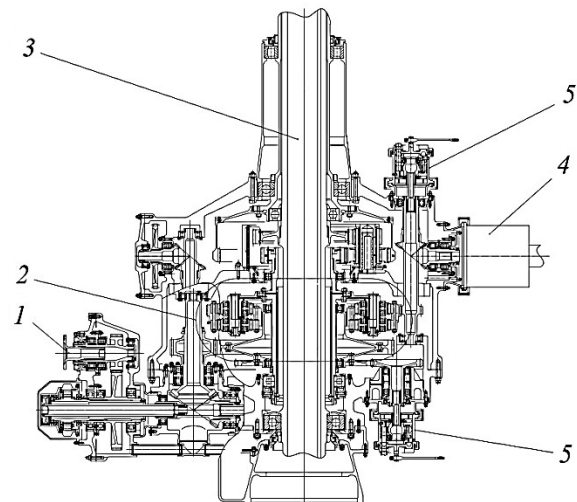
*Минимизация ресурсоёмкости.* Обратимые электрические машины используются в концепции «НЦВ» не только в качестве агрегатов для управления передаточным числом E-CVT, но и в качестве источника энергии для питания электросистемы ВКЛА. Таким образом из состава ВКЛА исключается специальная система электрогенерации для питания бортовых потребителей и специальная система электрозапуска.

*Обеспечение безопасности.* По критерию обеспечения безопасности концепция «НЦВ» так же имеет преимущество. В конструкции «Safran» в качестве механизма блокировки третьего звена зубчатого дифференциала при отказе «управляющей» электромашины используется муфта свободного хода (МСХ), кинематически соединяющая первое и второе звенья зубчатого дифференциала [10]. Такое решение в случае рассматриваемого отказа делает возможным резкое возрастание динамической составляющей крутящего момента в элементах привода НВ, что может привести к его повреждению [11]. Величина этой динамической составляющей крутящего момента пропорциональна квадрату диапазона регулирования. В отличие от «Safran» конструкция «НЦВ» включает в себя энергонезависимый блокировочный механизм,

который при отказе «управляющей» электромашины автоматически или под управлением пилота ограничивает вращение и плавно прекращает вращение третьего звена зубчатого дифференциала [11]. Такой механизм может быть реализован в виде управляемой гидростатической передачи. Кроме того, управляемая гидростатическая передача может компенсировать недостатки электрической передачи при малых диапазонах регулирования E-CVT, т.е. малой частоте вращения управляющей электромашины и может выполнять роль главного регулятора частоты вращения, в то время, когда «управляющая» и «балансировочная» электромашины обеспечивают циркуляцию и рекуперацию необходимого дополнительного энергетического потока. Это техническое решение зафиксировано в заявке [16].

*Обеспечение технической реализуемости.* По данному критерию на текущий момент концепции «НЦВ» и «Safran» равнозначны, не вызывают сомнений в реализуемости, но имеют уровень готовности технологии (УГТ) по ГОСТ Р 58048 -2017 менее 5.

Вариант возможной конструктивной реализации механического контура (главный редуктор) E-CVT для перспективного ВКЛА соосной схемы показан на рисунке 2.



**Рис. 2.** Конструктивная реализации механического контура (главный редуктор) E-CVT для ВКЛА соосной схемы. 1 – входной вал, 2 – зубчатый дифференциал, 3 – валы несущих винтов, 4 – управляющая обратимая электромашина, 5 – гидроагрегаты управляемой гидростатической передачи.

## 5 Заключение

Разработанная и запатентованная АО «НЦВ Миль и Камов» концепция ВКЛА, оснащённого E-CVT [11],

на текущем уровне техники, как показано в [12], является оптимальной.

Оценка оптимальности концепции [11] выполнена методом МРПФ [12]. Данный подход позволяет избежать значительных затрат на проведение исследований и конструирование «тупиковых» концепций перспективных ВКЛА.

В перспективе необходимы: конструкторская проработка предлагаемой концепции, функциональное цифровое и натурное моделирование в виде наземных и лётных демонстраторов для повышения зрелости технологий, производства, интеграции для достижения УГТ не менее 5.

#### Список использованных источников

- [1] Amri H., Feil R., Hajek M., Weigand M. Possibilities and difficulties for rotorcraft using variable transmission drive trains // CEAS Aeronautical Journal. – 2016. – Т. 7. – С. 333-344.
- [2] Калинин Д.В. Перспективные направления совершенствования трансмиссий винтокрылых летательных аппаратов // Авиационные двигатели 2023. №4 (21). С. 39-50.
- [3] DiOttavio J., Friedmann D. Operational benefits of an optimal, widely variable speed rotor // American Helicopter Society 66th Annual Forum Proceedings. – 2010. – С. 11-13.
- [4] Garre W., Amri H., Pflumm T., Paschinger P., Mileti M., Hajek M., Weigand M. Helicopter configurations and drive train concepts for optimal variable rotor-speed utilization. – Munich: Deutsche Gesellschaft für Luft-und Raumfahrt-Lilienthal-Oberth eV, 2017.
- [5] Ashok S. V., Wade B., Schrage D. P. Variable speed transmission using planetary gear system for high speed rotorcraft application // American Helicopter Society 66th Annual Forum, Phoenix. – 2010.
- [6] Amri H., Donner F., Braumann L., Huber F., Weigand M. Comparison of Variator Technologies for Variable Rotor Speed Drivetrains for Rotorcraft. – 2020.
- [7] Scheu T., Poks A., Donner F., Weigand M. Dynamic Simulation of a Rotorcraft Main Transmission with Continuous Variable Ratio // VFS' 79th Annual Forum & Technology Display, – 2023.
- [8] Guo S., Hu M., Chen S., Lei Y. Study on Power-Split Hybrid Electric Propulsion Systems for Lightweight Helicopters // Journal of Aerospace Engineering. – 2023. – Т. 36. – №. 5.
- [9] Hans DeSmidt, Zhisheng Ai. Dynamics of a Variable Speed Hybrid-Electric Helicopter Propulsion System // VFS 80th Annual Forum & Technology Display, - 2024.
- [10] Патент № US9982758B2 США, МПК F16H 3/72 (2006.01), B64C 27/14 (2006.01). Transmission assembly for an aircraft and a helicopter : заявл. 20.03.2015 : опубл. 29.05.2018 / Beddok S., Bazet J. M. ; заявитель SAFRAN HELICOPTER ENGINES (FR). – 11 с. : ил.
- [11] Патент № 2822499 Российская Федерация, В64С27/12 (2023.08), В64D35/02 (2023.08). Винтокрылый летательный аппарат с электромеханической бесступенчатой вариативной трансмиссией и способ балансировки мощности электросистемы летательного аппарата : № 2023117655 : заявл. 05.07.2023 : опубл. 08.07.24 / Вагин А.Ю., Ефремов А.А., Пальченко Н.В., Плущевский А.М., Фомина О.Н.; заявитель АО «НЦВ Миль и Камов» (RU) – 15 с. : ил.
- [12] Плущевский А.М. Вариативная система привода несущего винта для перспективного винтокрылого летательного аппарата: выбор оптимальной концепции // PREPRINTS.RU : сайт. 2025. - URL: <https://doi.org/10.24108/preprints-3113449>
- [13] Планетарные передачи : справочник / под редакцией В. Н. Кудрявцева, Ю. Н. Кирдяшева. — Ленинград : Машиностроение, 1977. — 475 с.
- [14] Пат. № RU2462607C2, МПК, F02C 7/268 (2006.01), F01D 15/10 (2006.01), F02C 3/10 (2006.01), F02C 3/113 (2006.01), F02C 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.
- [15] Пат. № RU2663786C2, МПК, F02C 6/20 (2006.01), F02C 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.
- [16] Заявка: 2024138436 Россия, МПК В64С 27/12 (2006.01), В64D 35/02 (2006.01). Винтокрылый летательный аппарат с бесступенчатой вариативной трансмиссией и способ управления передаточным числом: заявл. 19.12.2024 / Калинин Я.В., Пальченко Н.В., Плущевский А.М.; Заявитель: Фонд перспективных исследований (RU).