



Научная статья / Original Article

УДК 629.7.064.5

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=188110>

EDN: <https://www.elibrary.ru/TZBNMR>

ФОРМИРОВАНИЕ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ ОБОСНОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО ТИПОРЯДА КОМПОНЕНТОВ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

А.П. Ярмола¹, В.С. Калитка², Н.Д. Васильков²✉

¹Управление перспективных межвидовых исследований и специальных проектов

Минобороны России, г. Москва, Россия

²Федеральное Государственное Бюджетное Учреждение «Национальный

исследовательский центр «Институт имени Н.Е. Жуковского»,

г. Жуковский, Московская область, Россия

✉ vasilkovnd@nrczh.ru

Цитирование: Ярмола А.П., Калитка В.С., Васильков Н.Д. Формирование расчетной модели обоснования оптимального типоряда компонентов систем электроснабжения перспективных летательных аппаратов // Труды МАИ: электрон. журнал. № 147. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=188110>

Аннотация. Статья посвящена проблеме унификации компонентов систем электроснабжения и электродвижения перспективных летательных аппаратов, включая «более электрические самолеты», а также летательные аппараты с гибридными и электрическими силовыми установками. Цель работы – формирование расчетной модели обоснования оптимального типоряда компонентов систем электроснабжения на основе анализа потенциала унификации ключевых элементов. В исследовании проведена оценка возможности их унификации для различных классов летательных аппаратов. Установлено, что наибольший потенциал сосредоточен в областях коммутационных устройств и силовых преобразователей, в то время как

унификация электрических машин и аккумуляторных батарей существенно ограничена специфическими требованиями к их характеристикам. Предлагаемый подход позволяет определить приоритетные направления для разработки платформенных решений, направленных на снижение затрат и повышение эксплуатационной эффективности.

Ключевые слова: система электроснабжения; унификация; электродвижение; летательный аппарат; гибридная силовая установка.

DEVELOPMENT OF A COMPUTATIONAL MODEL FOR SUBSTANTIATING THE OPTIMAL TYPE SERIES OF ELECTRICAL POWER SYSTEM COMPONENTS FOR ADVANCED AIRCRAFT

A.P. Yarmola¹, V.S. Kalitka², N.D. Vasilkov²✉

¹Directorate of Advanced Interspecies Research and Special Projects
of the Russian Ministry of Defence, Moscow Russia

²National Research Center «N.E. Zhukovsky Institute»,
Zhukovsky, Moscow Region, Russia

✉ vasilkovnd@nrczh.ru

Citation: Yarmola A.P., Kalitka V.S., Vasilkov N.D. Development of a computational model for substantiating the optimal type series of electrical power system components for advanced aircraft // Trudy MAI. 2026. No. 147. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=188110>

Abstract. The article addresses the problem of achieving component commonality in electrical power and electric propulsion systems for advanced aircraft, including "More Electric Aircraft" and those with hybrid or fully electric powertrains. The study aims to develop a computational model for substantiating the optimal type series of electrical power system components based on an analysis of the potential for commonality among key elements. The feasibility of commonality is assessed across various classes of aircraft. The results indicate that the greatest potential lies in switching devices and power converters, while the commonality of electrical machines and battery packs is significantly limited by specific performance requirements. The proposed approach

enables the identification of priority areas for developing platform solutions aimed at reducing costs and improving operational efficiency.

Keywords: electrical power system; commonality; electric propulsion; aircraft; hybrid powertrain.

Введение

Современное развитие авиационной техники сопровождается увеличением сложности систем электроснабжения (СЭС) и электродвижения, что ведет к росту номенклатуры применяемых компонентов, затрудняет их совместимость и вызывает существенные издержки при производстве, эксплуатации и ремонте летательных аппаратов (ЛА). В условиях активного внедрения электрических систем привода, гибридных энергетических установок и элементов распределенной энергетики проблема унификации компонентов приобретает особую значимость.

Сегодня каждая серия или тип ЛА зачастую проектируется с использованием уникальных решений в части электрооборудования, что приводит к ограниченной серийности множества мелкосерийных изделий. Такая избыточная дифференциация снижает потенциал масштабирования производства, осложняет логистику запасных частей и техническое обслуживание, особенно в удалённых регионах с ограниченной инфраструктурой. В то же время мировой опыт авиастроения показывает, что переход к унифицированным и модульным системам позволяет добиться значительного улучшения эксплуатационных показателей – включая надёжность, ремонтпригодность и экономическую эффективность [1-3].

Унификация компонентов СЭС и электродвижения обеспечивают не только снижение совокупных затрат, но и формируют основу для создания платформенных решений, применяемых в различных классах воздушных судов – от лёгких беспилотных аппаратов до региональных пассажирских самолётов. Повышение серийности ограниченной номенклатуры изделий способствует росту технологической стабильности производства и качества продукции за счет отработки массовых технологических процессов, более строгого контроля

характеристик и накопления статистики отказов. При этом сокращение номенклатуры позволяет оптимизировать производственные и складские циклы, упрощает сертификацию оборудования и повышает его доступность для операторов.

Особое значение унификация приобретает для эксплуатации в удалённых и труднодоступных районах, где отсутствие широкого ассортимента запасных частей часто делает невозможным оперативный ремонт и восстановление ЛА. В этих условиях единая компонентная база представляет собой не только фактор экономической эффективности, но и элемент обеспечения транспортной доступности, технологического суверенитета и безопасности.

Несмотря на очевидные преимущества унификации, до настоящего времени отсутствует системный подход к разработке единой структуры компонентной базы для СЭС и электродвижения в авиации. Исследования, проводимые в последние годы, касаются в основном унификации механических и конструктивных элементов (узлов планера, крепёжных элементов, топливных систем), тогда как энергетические и электротехнические подсистемы пока остаются в значительной степени индивидуализированными.

Настоящая работа направлена на формирование расчетной модели для оценки выгод от унификации компонентов указанных систем применительно как к ЛА специального назначения, так и к гражданским воздушным судам. Предлагаемый подход учитывает требования к надёжности, безопасности, энергетической эффективности и ремонтпригодности, а также возможности внедрения модульного принципа построения систем.

Основные схемы систем электроснабжения и электродвижения перспективных летательных аппаратов

Расширение применения электрических компонентов на борту связано с несколькими основными трендами. Первый – переход к гибридным и электрическим силовым установкам (ГСУ и ЭСУ) для снижения расхода топлива, расширения возможностей базирования, снижения экологических воздействий, а также заметности ЛА. Второй подход – переход к «более электрическому самолету», у которого СУ работает без электрической компоненты, но многие

самолетные системы электрифицированы, за счет чего повышается надежность систем, а также появляется возможность отказаться от отбора воздуха от компрессора газотурбинного двигателя (ГТД), что позволяет снизить расход топлива. В перспективе можно добиться полного исключения применения гидравлических и пневматических систем, что позволит существенно сократить эксплуатационные затраты. Еще одним направлением является применение новых и специальных полезных нагрузок, которые требуют обеспечения электропитания, иногда существенно превышающее возможности современных бортов.

На рисунке 1 представлена обобщенная схема СЭС перспективного ЛА. На схеме обобщены компоненты «более электрического самолета», самолета с дополнительной энергетикой на борту для питания новых нагрузок, а также компоненты самолета с ЭСУ и ГСУ. Кроме того, для лаконичности не приведены потребители (кроме электродвигателей и новых потребителей, питающихся напрямую от высоковольтной шины), параллельные каналы электроснабжения для целей резервирования, защитная аппаратура, а сделан акцент именно на элементах СЭС. Контурные технологии, обозначенные пунктирной линией на схеме, не обязательно носят взаимоисключающий характер. Так, например, технологии более электрического самолета в части преобразования электроэнергии с СЭС высокого напряжения на стандартные значения 27/115/230 В, наверняка будут применяться в самолетах с ЭСУ и ГСУ. На рис. 1 приняты следующие обозначения: СЭС ВН – система электроснабжения высокого напряжения, ТВад – турбовальный двигатель, ГЕН – генератор, ЭД – электродвигатель, АКБ – аккумуляторная батарея, М/Г – мотор-генератор, ГТД – газотурбинный двигатель, ТРДД – турбореактивный двухконтурный двигатель, СТГ – стартер-генератор, ЭСКВ – электрическая система кондиционирования воздуха, ПОС – противообледенительная система.

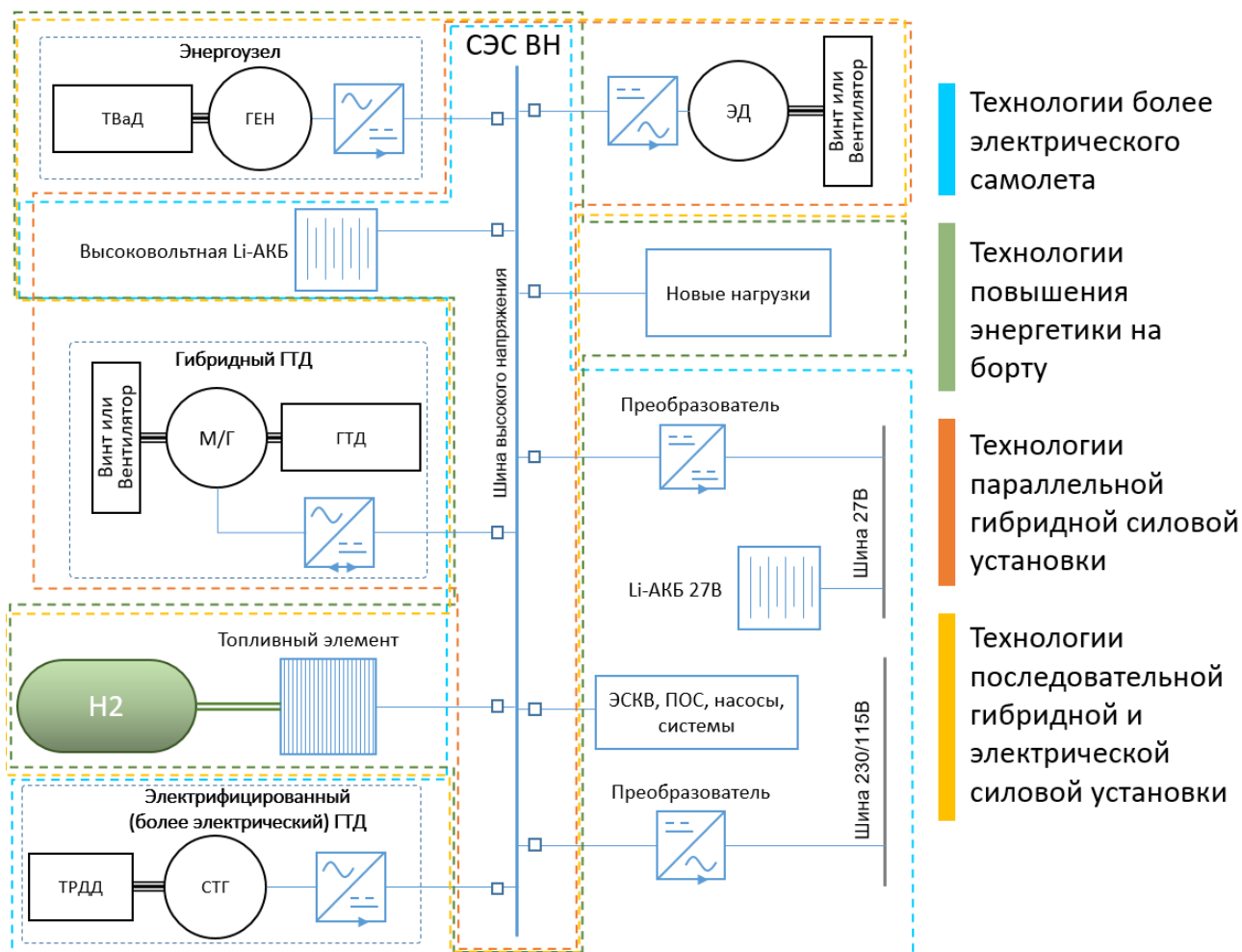


Рисунок 1 - Карта технологий перспективного летательного аппарата.

Анализ схемы позволяет определить, что центральная часть (СЭС высокого напряжения, включающая кабельную сеть и коммутаторы с системами защиты тока) является общей для всех технологических контуров. Также в большинстве решений встречаются литиевые аккумуляторные батареи и преобразователи напряжения. Унификация этих компонентов, вероятно, может дать максимальный эффект, ввиду их широкой распространенности. На схеме также имеется ряд преобразователей: выпрямители для генераторов, обратимый преобразователь мотор-генератора, инвертер для электродвигателя, которые, вероятно, тоже имеют потенциал унификации.

В контур технологий «более электрического самолета», помимо общих с другими контурами элементов, входят более электрический ГТД, который представляет собой двухконтурный двигатель без отборов воздуха и с мощной электрической машиной – стартер-генератором, который позволяет осуществить запуск двигателя и вырабатывать мощность для питания самолетных систем, а

также упомянутые выше преобразователи с высокого напряжения на стандартные бортовые шины 27/115/230 В и мощные потребители, питающиеся напрямую от шины высокого напряжения.

В контур технологий повышения энергетики на борту входят источники электроэнергии: энергоузел на основе турбовального двигателя, работающего на генератор (возможна реализация и на основе поршневого двигателя) и энергоузел на основе водородных топливных элементов (ТЭ). В качестве потребителей – новые нагрузки, требующие повышенной мощности электропитания.

В контур технологий ЭСУ и ГСУ входят те же источники питания что и в предыдущий, но основным потребителем в нем является электродвигатель привода винта/вентилятора.

В контуре технологий параллельной ГСУ в качестве источника электроэнергии выступает гибридный ГТД, представляющий собой турбовинтовой двигатель, у которого на винт параллельно работают ГТД и электрический двигатель. Электрический двигатель при этом может работать также в режиме генератора, снабжая электроэнергией дополнительные электродвигатели, которые, например, обеспечивают укороченный или вертикальный взлет/посадку.

Оценка потенциала унификации компонентов систем электроснабжения, электродвижения и исполнительных электроприводов ЛА

Как показано выше, электрифицированные системы ЛА включают широкий набор электротехнических компонентов, различающихся по функциональному назначению, уровню мощности и принципу действия. В настоящем исследовании рассматриваются основные элементы, определяющие архитектуру и структуру систем в целом (мелкие потребители, такие как источники света, индикаторы и вспомогательная арматура, не рассматриваются).

Электрические машины, сопряженные с тепловыми двигателями, такие как генераторы, стартер-генераторы и мотор-генераторы проектируются под использование с конкретным тепловым двигателем и не подлежат унификации между собой, только как часть энергоузла, гибридного или электрифицированного двигателя. Соответственно, вопрос их унификации

целесообразно рассматривать вместе с вопросом унификации ГТД, что находится за рамками настоящего исследования. Преобразовательная техника, работающая в паре с этими машинами по тем же причинам слабо унифицируема.

Аккумуляторные блоки формируются на базе типовых ячеек (литий-ионных, литий-железо-фосфатных и др.), но степень унификации здесь ограничивается стандартом элемента, поскольку различные типы ЛА имеют разные требования по энергоёмкости, мощности, температурному диапазону, отказоустойчивости и массе. Эти требования определяют химию ячейки, форм-фактор и наличие специальных конструкционных решений. Тем не менее, унификация на уровне модульных сборок (например, 27 В/2 кВт·ч или 270 В/10 кВт·ч) возможна, особенно в рамках одного класса аппаратов (например, гражданские самолеты или беспилотные ЛА). Таким образом потенциал унификации аккумуляторных батарей можно оценить, как «средний» (оценочно 40-60% номенклатуры может быть унифицировано в пределах каждой категории ЛА).

Водородные ТЭ являются перспективным источником энергии на борту для авиационной техники, применяемой в регионах с высокой ценой на традиционное топливо, но где есть локальная генерация электроэнергии, например, труднодоступных арктических регионах. Водородные ТЭ на сегодняшний день серийно применяются только в колесной технике, и для авиации являются новой технологией, что позволяет заложить унификацию на этапе разработки. Есть два технологических семейства – системы на основе ТЭ с воздушным охлаждением, которые проще в конструкции, менее мощные и могут применяться в основном для небольших беспилотных ЛА, и системы на основе ТЭ с жидкостным охлаждением, которые могут применяться на более тяжелых ЛА. Сами ТЭ и стеки на их основе имеют высокий потенциал унификации, поскольку за счет их сборки достигается необходимое питающее напряжение, а за счет параллельной сборки необходимая мощность. Поскольку напряжение сети является стандартизованным, стек ТЭ может быть унифицированным модулем. Сама же система электрохимического генератора (ЭХГ) собирается исходя из конкретной потребной мощности источника электроэнергии и определяется потребностями

конкретного ЛА. Таким образом, для стеков ТЭ потенциал унификации высокий (более 80% номенклатуры может быть унифицировано), а для ЭХГ как энергоузлов потенциал низкий или ниже среднего (20-40% номенклатуры может быть унифицировано).

Преобразователи как источники вторичного электропитания, DC/DC и DC/AC преобразователи характеризуются входным и выходным напряжением и мощностью. С учетом того, что бортовые напряжения имеют достаточно узкий ряд напряжений 27 В/270 В постоянного тока, 115 В/230 В переменного тока и перспективная шина постоянного тока высокого напряжения (ПТ ВН) 800 В, а преобразование требуется прежде всего от шины ПТ ВН на другие номиналы, возможно разработать унифицированное решение при введении модульной структуры ступеней мощности. Мощностные ряды могут иметь разный шаг, например, 1, 5, 25, 100 кВт и далее, или 1, 2,5, 6, 15, 40, 100 кВт и далее. В первом случае, когда мощности увеличиваются кратно 4-5 промежуточные мощности потребуют большего количества параллельно работающих преобразователей, что может отрицательно сказаться на надёжности и массе решения, но в то же время типоряд содержит почти вдвое меньше устройств по сравнению со вторым рядом, где кратность роста мощности составляет $\sim 2,5$, что обеспечит большую серийность, и, соответственно оптимизацию каждого отдельного модуля по стоимости, массе и надёжности. Однако унификация затрудняется различиями в топологиях (преобразователи на основе полевых или биполярных транзисторов) и требованиями к электромагнитной совместимости, что может снизить потенциал унификации. Таким образом потенциал унификации можно оценить, как «выше среднего» (50-80% номенклатуры может быть сведено к платформенным решениям).

Системы распределения энергии, включающие в себя коммутационные и защитные устройства (контакторы, полупроводниковые ключевые блоки, секционирующие модули шин), а также кабельные и соединительные системы, являются одним из наиболее перспективных объектов унификации. Их параметры определяются в первую очередь номинальным напряжением и током, стандартами на качество напряжения регламентируются все требования к

переходным процессам, а требования по стойкости к внешним воздействиям регулируются авиационными правилами. Современные электрические системы авиации, в зависимости от класса ЛА, используют напряжения 28/270 В постоянного тока или 115/230 В постоянного тока, а для гибридных и полностью электрических схем – 540-800 В постоянного тока. Ограниченная серия типоразмеров (3-4 диапазона напряжений) и несколько градаций номинальных токов (10, 50, 250, 1000 А) покрывают большинство практических применений. Возможность параллельного использования коммутационных модулей для увеличения пропускного тока делает данную категорию почти полностью унифицируемой. Кроме того, единые интерфейсы управления и телеметрии позволяют использовать одинаковые схемные решения для различных классов ЛА. Таким образом, потенциал унификации – «высокий» (80-90% номенклатуры может быть сведено к 6-8 типоразмерам).

Электрические машины тягового и комбинированного назначения обладают наименьшим потенциалом унификации. Помимо мощности и номинального напряжения, они различаются, диапазоном частот вращения, необходимым крутящим моментом, режимом охлаждения и требуемыми динамическими характеристиками. К примеру, моторы для винтовых установок требуют стабильной работы на низких частотах и широкого диапазона постоянной мощности, а вентиляторные тяговые установки – более высокой частоты вращения ротора, и все они в отличие от исполнительных приводов требуют возможности передачи тягового усилия через подшипниковый узел. Возможности унификации здесь ограничиваются стандартизацией интерфейсов (механического сопряжения, электропитания, телеметрии) и введением типоразмерных рядов по мощности, пропорциональным мощностям типоряда преобразователей. Таким образом, потенциал унификации – «низкий» (не более 20-30% номенклатуры может быть сведено к единому конструктивному ряду).

Преобразователи для электрических машин имеют большой потенциал унификации, т.к. требования к ним прежде всего определяются питающим напряжением, мощностью, частотой коммутации обмоток и типом двигателя. Кроме того, для преобразователя возможна настройка с помощью программного

обеспечения. Поскольку подавляющее большинство электрических машин трехфазные, частоты переключения обмоток находятся также в диапазоне 50-1000Гц, существенно более узком, чем, например, частоты вращения валов двигателей (т.к. чем выше частота вращения вала, тем, обычно, в двигателе меньше пар полюсов и мультипликатор частоты). Поэтому если при проектировании преобразователей будет учтена возможность из параллельного соединения, будет проведена оптимизация на работу во всем диапазоне частот, также работа от напряжения высоковольтной цепи постоянного тока, возможно также создание типоряда преобразователей с 2,5÷5 кратным шагом по мощности (аналогично с преобразователями вторичного напряжения), которые обеспечат потребность большинства электродвигателей. Однако следует учесть, что к преобразователям могут предъявляться разные требования по стойкости к внешним воздействиям, может не совпасть кратность мощности преобразователей стандартного ряда с кратностью числа независимых групп обмоток двигателя (например, двигатель имеет две трехфазных обмотки, а для его мощности оптимальным является три преобразователя из стандартного мощностного ряда – придется либо добавлять четвертый преобразователь, и все они будут работать в режиме пониженной мощности, либо проектировать специальный преобразователь под задачу отказавшись от унификации). Таким образом потенциал унификации преобразователей можно оценить как «выше среднего» (около 60% номенклатуры имеет потенциал унификации).

Исполнительные электрические машины приводов и самолетный систем, включая систему кондиционирования воздуха, а также иные потребители электрической энергии могут быть унифицированы в пределах одной размерности ЛА, однако оценить на данном этапе работ это проблематично, т.к. конкретные требования к системам определяет проектировщик ЛА на этапе опытно-конструкторских работ, и потенциал унификации будет понятен по мере развития парка таких аппаратов.

В таблице 1 приведена сводная оценка потенциала унификации всех рассмотренных компонентов СЭС.

Сводная оценка потенциала унификации

Группа компонентов	Потенциал унификации	Основные факторы, ограничивающие унификацию
Электрические машины в составе ГТД	---	Потенциал унификации напрямую зависит от унификации самих ГТД, т.к. машина сопрягается с двигателем и проектируется непосредственно под него.
Аккумуляторные батареи	Средний	Различия в энергоёмкости и условиях эксплуатации
Водородные ТЭ	Высокий для ТЭ, Низкий для ЭХГ	ЭХГ проектируются на разную мощность с разным составом вспомогательного оборудования
Силовые преобразователи для вторичного электропитания	Выше среднего	Различные схемотехнические топологии, специфические требования к электромагнитной совместимости и внешним воздействиям
Компоненты СЭС	Высокий	Небольшое разнообразие номиналов напряжения и тока, возможность параллельного включения
Электродвигатели	Низкий	Различие в скоростных, тепловых и механических характеристиках
Силовые преобразователи для электродвигателей	Выше среднего	Различные схемотехнические топологии, специфические требования к электромагнитной совместимости и внешним воздействиям, соотношения кратности числа обмоток двигателя и количества преобразователей
Прочие потребители	---	Определяется требованиями парка ЛА и их разработчиков

Проведённый анализ показывает, что наибольшие возможности унификации сосредоточены в областях коммутационной и распределительной аппаратуры, а также преобразователях, где число режимов эксплуатации и вариативность параметров сравнительно ограничены. Для этих категорий возможно создание единой платформы компонентов, покрывающей весь диапазон применений – от лёгких беспилотных до пассажирских ЛА.

В то же время электромеханические преобразователи энергии (двигатели, генераторы) обладают значительно большей конструктивной и функциональной вариативностью, что ограничивает их унификацию на уровне изделия и требует поиска решений на уровне интерфейсов, сопряжений и методики модульного проектирования. Компромиссный подход может заключаться в формировании типоразмерных семейств с сохранением унифицированных интерфейсов и

протоколов управления при индивидуализированных электромеханических характеристиках.

Потенциал межотраслевой унификации качественно совпадает с оценками для унификации в рамках авиационной отрасли – системы распределения энергии, силовые преобразователи, электрохимические источники питания имеют большой потенциал унификации, чем электрические машины. Особенно стоит отметить, что в авиационной технике предъявляются иные требования как по режимам работы (нагрузочным кривым) электрических машин, так и в целом к изделиям предъявляются иные требования по стоимости, надежности, серийности, что определяет иной набор технологий на основе которых эти агрегаты проектируются и изготавливаются. На рисунке 2 представлено сравнение требований к СУ в авиации и в автомобильной промышленности.

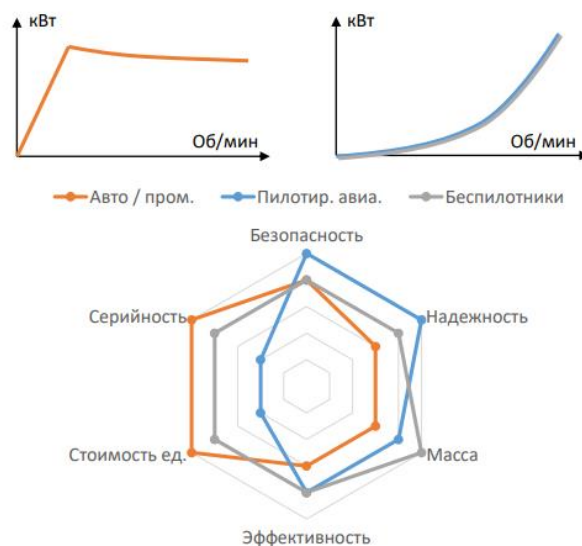


Рисунок 2 - Требования к силовым установкам в авиации и автомобильной промышленности

Также следует учесть, что требования по внешним воздействующим факторам (ВВФ), электромагнитной совместимости, типам охлаждения сильно рванятся в разных отраслях. Так, в автомобильной промышленности требования по ВВФ задаются ГОСТ Р ИСО 16750-1-2025 [4], а в авиационной КТ-160G [5], ряд требований в которых сильно разнится. Авиационная техника подвергается воздействию более низких температур и более интенсивных вибраций, а также электростатическим разрядом большего напряжения, в то время как автомобильная техника может испытывать на себе действие более высоких температур. Эти факторы ведут к тому, что межотраслевая синергия возможна в

большой степени на уровне компонентов или узлов, а не на основе изделий, т.к. требования по ВВФ к изделиям зачастую сильно ранятся.

Оценка экономического эффекта от унификации

Вопросы оценки экономического эффекта от унификации рассматриваются в ряде работ [6-8]. Для решения задачи унификации конкретных систем разработаны схемы, по которым можно выстроить данный процесс [9]. Однако, чтобы оценить экономический эффект от унификации изделий, необходимо определить его составляющие. В общем случае экономический эффект, который здесь и далее измеряется в денежных единицах, можно представить в виде формулы (1), как разность положительных и отрицательных эффектов унификации:

$$E_{\text{униф}} = \sum E_{\text{положит}} - \sum E_{\text{отриц}} \quad (1)$$

Для расчета составляющих экономического эффекта примем, что перспективный парк состоит из ЛА k типов, с общим числом $N = \sum_{i=1}^k N_i$, где N_i – количество аппаратов i -го типа. В каждом ЛА применяются различные электротехнические изделия. Всего выделим l -типов изделий (например, электродвигатель привода винта, преобразователь вторичного напряжения 800 В/27 В, коммутатор шины 800 В и т.д.), отличающихся внутри типа характеристиками, например, размерностью (номинально мощностью) или специальными требованиями, и образующих типоряд. Общий объем производства электротехнических изделий для выпуска и обслуживания парка ЛА равен $r = \sum_{j=1}^l \sum_{i=1}^{q_j} r_{j,i}$, где q_j – количество уникальных изделий в типоряде изделий j -го типа, $r_{j,i}$ – количество изделий j -го типа i -ой характеристики.

Положительными эффектом унификации являются:

1. Снижение затрат на разработку изделий.

Затраты на разработку изделия впоследствии переносятся на цену изделия обратно пропорционально серийности. При повышении серийности снижаются общие затраты на разработку, ввиду уменьшения количества разрабатываемых изделий, и, соответственно, снижается надбавка к цене производимого изделия. Общую экономию на уровне всей отрасли можно оценить, как разность затрат на

разработку диверсифицированного и унифицированного типоряда изделий. Примем, что в унифицированных типорядах количество уникальных по характеристикам изделий не превышает такового для диверсифицированного типоряда $\forall j \in [1; l]: q_j^{\text{униф.}} \leq q_j^{\text{диверс.}}$, где униф. – унифицированный, диверс. – диверсифицированный. Поскольку изделия разрабатываются для одного и того же ряда ЛА, а значит обеспечивают один и тот же набор потребных характеристик, можно предположить, что средние затраты на разработку одного изделия в уникальном и диверсифицированном типоряде будут одинаковы $f_j^{\text{униф.}} \approx f_j^{\text{диверс.}} = f_j$. Тогда эффект от диверсификации в части снижения стоимости разработки будет равен:

$$E_{\text{разр.}} = \sum_{j=1}^l f_j * q_j^{\text{диверс.}} - \sum_{j=1}^l f_j * q_j^{\text{униф.}} = \sum_{j=1}^l f_j * (q_j^{\text{диверс.}} - q_j^{\text{униф.}}), \quad (2)$$

где разр. – разработки.

2. Снижение затрат на серийное производство изделий.

Ввиду меньших количеств изделий в типоряде каждого типа, растет их серийность. С ростом количества изделий в серии растет их качество и снижается стоимость. Этот эффект называется эффектом обучения, и он известен для изделий авиакосмической промышленности, где наблюдается снижение стоимости каждого следующего в серии изделия на 15% при удвоении объема выпуска [6, 10]. Примем что для электротехнических изделий авиационного назначения этот коэффициент такой же. Объем выпуска изделия j-го типа i-ой характеристики состоит из $r_{j,i}$ штук. В таком случае стоимость выпуска $p_k^{j,i}$ единицы изделия под порядковым номером k в серии ($1 \leq k \leq r_{j,i}$) будет определяться по формуле (3) степенной функции Райта [11]:

$$p_k^{j,i} = p_1^{j,i} \cdot k^{\frac{\log(1-0,15)}{\log(2)}} \approx p_1^{j,i} \cdot k^{-0,234}, \quad (3)$$

где $p_1^{j,i}$ – стоимость выпуска первого экземпляра. Стоимость всей серии $P_{j,i}$ можно оценить через интеграл:

$$P_{j,i} = \sum_{k=1}^{r_{j,i}} p_1^{j,i} \cdot k^{-0,234} \approx \int_0^{r_{j,i}} p_1^{j,i} \cdot k^{-0,234} dk = p_1^{j,i} \cdot \frac{r_{j,i}^{1+(-0,234)}}{1 + (-0,234)} = p_1^{j,i} \cdot \frac{r_{j,i}^{0,766}}{0,766} \quad (4)$$

Общие затраты на серийный выпуск компонентов составят:

$$P_{\text{сер.пр-во}} = \sum_{j=1}^l \sum_{i=1}^{q_j} P_{j,i} = \sum_{j=1}^l \sum_{i=1}^{q_j} p_1^{j,i} \cdot \frac{r_{j,i}^{0,766}}{0,766} \quad (5)$$

Тогда экономия от унификации составит:

$$E_{\text{сер.пр-во}} = P_{\text{сер.пр-во}}^{\text{диверс.}} - P_{\text{сер.пр-во}}^{\text{униф.}} = \sum_{j=1}^l \left(\sum_{i=1}^{q_j^{\text{диверс.}}} p_1^{j,i} \cdot \frac{r_{j,i}^{\text{диверс.},0,766}}{0,766} - \sum_{i=1}^{q_j^{\text{униф.}}} p_1^{j,i} \cdot \frac{r_{j,i}^{\text{униф.},0,766}}{0,766} \right) \quad (6)$$

3. Сокращение времени разработки летательного аппарата.

Сокращение времени разработки положительно влияет на экономический эффект от внедрения. Любое новое изделие, в том числе ЛА, будет актуальным для эксплуатации по назначению некоторый ограниченный период времени – до морального устаревания. Соответственно при начале опытно-конструкторских работ можно сразу оценить период жизненного цикла (ЖЦ), в течение которого ЛА сможет совершать полезную работу, и, таким образом, сокращение времени разработки позволяет в течение большего периода получать положительный эффект от эксплуатации данного типа техники [12]. В этой связи, если экономический эффект от разработки и внедрения нового типа ЛА на всем ЖЦ оценивается как $E_h^{\text{ЖЦ}}$ ($h = 1 \dots k$), время ЖЦ оценивается как $t_h^{\text{ЖЦ}}$, а унификация компонентов позволит сократить время разработки и сертификации на $\Delta t_h^{\text{разр.униф.}}$, за счет того что возможно применить унифицированный узел вместо разработки специфического, то эффект от унификации для всех типов ЛА составит:

$$E_{\text{сокр.разр.}} = \sum_{h=1}^k E_h^{\text{ЖЦ}} \cdot \frac{\Delta t_h^{\text{разр.}}}{t_h^{\text{ЖЦ}}} \quad (7)$$

4. Повышение надежности изделий и сокращение затрат на техническое обслуживание и ремонт.

Большая серийность выпускаемых изделий позволяет быстрее собирать обратную связь по возможным недоработкам и особенностям эксплуатации. Таким образом, надежность техники также растет за счет эффекта обучения [13]. Повышение надежности означает, что ЛА будет реже требовать внепланового обслуживания. Таким образом, количество ремонтных процедур ($N_h^{\text{ремонт}}$), из-за которых ЛА стоит «на земле» и не совершает полезной работы при

унифицированной линейке агрегатов будет меньше, чем при диверсифицированной (обозначим разницу как $\Delta N_h^{\text{ремонт}}$). Вместе с тем при унифицированной линейке повышается доступность комплектующих, снижается время их поставки, что также снижает время выполнения работ (на $\Delta t_h^{\text{работ}}$) как по плановому техническому обслуживанию, так и по внеплановым ремонтам. Таким образом, простой техники связанный со временем, затраченным на техническое обслуживание и ремонт, снижается как за счет сокращения числа внеплановых ремонтов, так и за счет сокращения времени, затрачиваемого на проведение работ по плановому техническому обслуживанию и ремонту. Экономический эффект от сокращения времени простоя, в этой связи, можно оценить аналогично формуле (7), соотнеся сокращение времени на техническое обслуживание и ремонт с общим временем жизненного цикла:

$$E_{\text{сокр.простоя}} = \sum_{h=1}^k E_h^{\text{ЖЦ}} \cdot \frac{\Delta N_h^{\text{ремонт}} \cdot t_h^{\text{ремонт}} + (N_h^{\text{ремонт}} + N_h^{\text{ТО}}) \Delta t_h^{\text{работ}}}{t_h^{\text{ЖЦ}}} \quad (8)$$

Отрицательными эффектами унификации являются:

1. Повышение массы агрегатов.

Унификация приводит к тому, что при выполнении опытно-конструкторских работ вместо разработки изделия под задачу, разработчик выбирает изделие из унифицированной линейки, которое зачастую может обладать избыточными характеристиками: большей номинальной мощностью, более высокой защищенностью от ВВФ и т.д. Это означает, что масса такого изделия оказывается выше, чем масса специализированного, а значит использование унифицированных изделий увеличивает массу ЛА, и, как следствие повышает расход топлива, а также может ограничивать характеристики аппарата (дальность, полезную нагрузку и т.п.). Эффект от ограничения характеристик будет разобран далее, в данном разделе оценим именно эффект от повышения массы ЛА, и, как следствие, расхода топлива. Доля стоимости топлива $\varphi_{\text{топливо}}$ в стоимости ЖЦ ЛА $C^{\text{ЖЦ}}$ довольно существенна, для гражданской авиации оценивается порядка 19% [14]. Таким образом, если массу ЛА обозначить как m_h , а разницу в массе комплекта унифицированного и специализированного

оборудования обозначить как Δm_h ($h = 1 \dots k$), эффект от увеличения массы оборудования составит:

$$E_{\text{увел.масс.}} = \sum_{h=1}^k N_h \cdot \frac{\Delta m_h}{m_h} \cdot C_h^{\text{ЖЦ}} \cdot \alpha_h^{\text{ТОПЛИВО}} \quad (9)$$

2. Ограничение на летно-технические характеристики летательного аппарата.

Применение агрегатов из унифицированной линейки может негативно сказаться на характеристиках ЛА не только из-за роста массы, но и ввиду того, что унифицированный компонент может обладать дефицитом определенных свойств (стойкость к экстремальным ВВФ, специфичным для аппарата, продолжительность работы на режимах пиковой мощности и т.п.). Дефицит свойств компонентов может стать фактором, определяющим дефицит свойств ЛА в целом (ограничение по внешним температурам, перегрузкам, необходимость проведения специфических процедур при эксплуатации, и т.п.). Критичность этих ограничений определяется разработчиком и заказчиком, и может стать поводом для разработки специализированного узла и отказа от применения, унифицированного в конкретном случае. Но в случае применения унифицированного решения, почти всегда возникает какой-то дефицит свойств, начиная от сокращения полезной нагрузки из-за больше массы компонентов, заканчивая сложно оцениваемыми ограничениями. Учет эффекта этого фактора должен оценивать индивидуально, поэтому обозначим его через величину $\beta_{\text{огранич.}} < 1$, учитывающую ограничения на ЛТХ ЛА, на которую умножается экономический эффект на всем ЖЦ от применения каждого конкретного типа ЛА. Тогда учет эффекта ограничения ЛТХ можно записать в виде формулы (10):

$$E_{\text{огранич.}} = \sum_{i=1}^k E_i^{\text{ЖЦ}} \cdot (1 - \beta_i^{\text{огранич.}}) \quad (10)$$

Коэффициент $\beta_{\text{огранич.}}$ хоть и является величиной меньше единицы, довольно близок, т.к. если бы ограничение ЛТХ от применения унифицированного изделия было бы существенным, разработчик принял бы решение о разработке специализированного решения, т.к. это было бы экономически оправданным в данном случае.

Таким образом эффект от унификации можно рассчитать как:

$$E_{\text{униф}} = E_{\text{разр.}} + \Delta E_{\text{сер.пр-во}} + E_{\text{сокр.разр.}} + E_{\text{сокр.простоя}} - E_{\text{увел.масс.}} - E_{\text{огранич.}} \quad (11)$$

где соответствующие эффекты рассчитываются по формулам (2, 6-10).

Использование предложенной модели позволяет провести количественную оценку выгоды от унификации изделий в масштабе всей авиационной отрасли на основе прогнозных данных по разрабатываемой линейке ЛА и потребного оборудования для них, экономического эффекта от применения данных ЛА и стоимости их ЖЦ.

Заключение

Проведенный анализ компонентов СЭС и электродвижения перспективных ЛА демонстрирует дифференцированный потенциал их унификации. Наибольший эффект может быть достигнут в области коммутационных устройств и силовых преобразователей, где ограниченный ряд номинальных напряжений и токов, а также возможность модульного построения систем позволяют свести номенклатуру к нескольким платформенным типоразмерам. Унификация этих компонентов способна обеспечить значительный экономический выигрыш за счет роста серийности, упрощения логистики и повышения ремонтпригодности.

В то же время, для таких компонентов, как электрические машины (двигатели, стартер-генераторы) и аккумуляторные батареи, потенциал унификации существенно ограничен ввиду жесткой привязки их параметров к конкретным летно-техническим характеристикам и условиям эксплуатации различных классов ЛА. Для этих групп наиболее перспективным представляется путь стандартизации интерфейсов, протоколов управления и создание типоразмерных рядов, что позволит сохранить гибкость проектирования при достижении частичного синергетического эффекта. Таким образом, формируемая расчетная модель обоснования оптимального типоряда компонентов систем электроснабжения должна основываться на принципе избирательной унификации, направленной на оптимизацию номенклатуры там, где это технически и экономически целесообразно.

Предложена модель расчета эффекта от унификации линеек авиационных компонентов, которая позволяет оценить выгоду от унификации, а также

провести количественное сравнения разных программ унификации компонентов (разных множителей типорядов), для выбора оптимального решения.

Конфликт интересов

Авторы заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Список источников

1. L.N. Titova, Yu.A. Pertsev, P.O. Nuhin, S.A. Samodurova Development of an evaluation method for electromechanical systems unification // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 4th International Scientific and Technical Conference on Energy Systems, ICES 2019, Belgorod, 31 октября – 01 ноября 2019 года, Vol. 791, Belgorod: Institute of Physics Publishing, 2020;

2. Ю.А. Перцев, Л.Н. Титова, С.Г. Зеленская Оценка унификации электромеханических систем // Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве: Труды Международной научно-технической конференции, посвященной памяти д.т.н., профессора Зайцева Александра Ивановича, Воронеж, 21–23 ноября 2019 года. – Воронеж: ООО "Научное издательство Гусевых", 2019. – С. 369-373;

3. Р.С. Аносов, Ю.М. Глазунов, С.Г. Зеленская Методика оценки технико-экономического эффекта от реализации вариантов унификации энергетических систем // Энергия - XXI век. – 2017. – № 4(100). – С. 86-91;

4. ГОСТ Р ИСО 16750-1-2025. Транспорт дорожный. Внешние факторы воздействия и испытания электрического и электронного оборудования. Часть 1. Общие положения. Москва, 2025. – 28 с.;

5. Квалификационные требования стран СНГ КТ-160G. Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования (Внешние воздействующие факторы – ВВФ). Требования, нормы и методы испытаний. 2015, ред. 1;

6. А.Е. Карпов, В.В. Клочков Проблемы формирования производственной программы российского гражданского авиастроения: диверсификация и унификация продукции // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2022): Труды XV международной конференции, Москва, 26–28 сентября 2022 года. Под общей редакцией С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна. – Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2022. – С. 898-904;

7. В.Л. Лясковский, А.П. Ярмола, А.С. Афанасьев, М.А. Алашеев О задаче выбора рационального прогнозного варианта комплектования стационарных и условно подвижных объектов автономными системами электроснабжения при ресурсных ограничениях // Электронные информационные системы. – 2024. – № 4(43). – С. 73-79;

8. А.Б. Гусейнов Обоснование рационального уровня унификации и типажа систем снаряжения // Труды МАИ. – 2011. – № 49. – С. 14;

9. Р.С. Аносов, Ю.М. Глазунов, Ю.А. Перцев Постановка задачи системной унификации энергетических систем // Энергия - XXI век. – 2017. – № 3(99). – С. 17-24;

10. A. Bongers Learning and forgetting in the jet fighter aircraft industry // PLoS ONE. – 2017. – 12(9);

11. О.В. Павлов Определение регрессионных функций кривых обучения в серийном производстве автомобилей // Вестник Самарского университета. Экономика и управление. – 2021. – Т. 12, № 4. – С. 212-222;

12. И.Е. Селезнева, В.В. Клочков Анализ угроз экономической безопасности России, связанных с проблемами государственного управления научно-технологическим развитием // Экономическая безопасность. – 2023. – Т. 6, № 3. – С. 941-962;

13. В.В. Клочков, С.С. Критская Анализ влияния темпов освоения производства новой техники на ее конкурентоспособность // Экономический анализ: теория и практика. – 2013. – № 4(307). – С. 11-22;

14. IATA, Industry Statistics Fact Sheet: December 2022, 2023: сайт. – URL: <https://www.iata.org/en/iata-repository/pressroom/fact-sheets/industry-statistics/> (дата обращения 12.12.2025).

References

1. L.N. Titova, Yu.A. Pertsev, P.O. Nuhin, S.A. Samodurova Development of an evaluation method for electromechanical systems unification // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 4th International Scientific and Technical Conference on Energy Systems, ICES 2019, Belgorod, October 31 – November 01, 2019, Vol. 791, Belgorod: Institute of Physics Publishing, 2020;
2. Yu.A. Pertsev, L.N. Titova, S.G. Zelenskaya *Novye tekhnologii v nauchnykh issledovaniyakh, proektirovaniy, upravlenii, proizvodstve: Trudy Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, posviashchennoi pamiati d.t.n., professora Zaitseva Aleksandra Ivanovicha*, Voronezh, November 21-23, 2019. – Voronezh: Gusev Scientific Publishing House, LLC, 2019. pp. 369-373;
3. R.S. Anosov, Yu.M. Glazunov, S.G. Zelenskaya *Energiya - XXI vek*, 2017, № 4(100), pp. 86-91;
4. GOST R ISO 16750-1-2025. *Road vehicles. Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment. Part 1. General*. Moscow, 2025, 28 p.;
5. Qualification requirements of the CIS countries CT-160G. *Operating and environmental conditions for on-board aviation equipment (External influencing factors). Requirements, standards, and test methods*. 2015, ed. 1;
6. A.E. Karpov, V.V. Klochkov *Upravlenie razvitiem krupnomasshtabnykh sistem (MLSD'2022): Trudy XV mezhdunarodnoi konferentsii*, Moscow, September 26-28, 2022. Under the general editorship of S.N. Vasiliev, A.D. Tsvirkun. Moscow: V.A. Trapeznikov Institute of Management Problems of the Russian Academy of Sciences, 2022. pp. 898-904;
7. V.L. Lyaskovsky, A.P. Yarmola, A.S. Afanasyev, M.A. Alashev *Elektronnyye informatsionnyye sistemy*, 2024, № 4(43), pp. 73-79;
8. A.B. Guseynov *Trudy MAI*, 2011, No. 49, p. 14;
9. R.S. Anosov, Yu.M. Glazunov, Yu.A. Pertsev *Energiya - XXI vek*, 2017, № 3(99), pp. 17-24;
10. A. Bongers Learning and forgetting in the jet fighter aircraft industry // PLoS ONE, 2017, 12(9);

11. O.V. Pavlov *Vestnik Samarskogo universiteta. Ekonomika i upravlenie*, 2021, vol. 12, No. 4, pp. 212-222;
12. I.E. Selezneva, V.V. Klochkov *Ekonomicheskaja bezopasnost*, 2023, Vol. 6, No. 3, pp. 941-962;
13. V.V. Klochkov, S.S. *Ekonomicheskii analiz: teoriia i praktika*, 2013, No. 4(307), pp. 11-22;
14. IATA, Industry Statistics Fact Sheet: December 2022, 2023: website. – URL: <https://www.iata.org/en/iata-repository/pressroom/fact-sheets/industry-statistics/> (date of request 12.12.2025).

Информация об авторах

Антон Петрович Ярмола, полковник, заместитель начальника, Управление перспективных межвидовых исследований и специальных проектов МО РФ; г. Москва, Россия; antonyarmola@rambler.ru

Владислав Сергеевич Калитка, кандидат химических наук, директор проектного комплекса «Электродвижение», ФГБУ «НИЦ «Институт имени Н.Е. Жуковского»; РФ, Московская обл., г. Жуковский, Россия; vladislav.kalitka@yandex.ru

Никита Дмитриевич Васильков, главный специалист проектного комплекса «Электродвижение», ФГБУ «НИЦ «Институт имени Н.Е. Жуковского», Московская обл., г. Жуковский, Россия; vasilkovnd@nrczh.ru

Information about the authors

Anton P. Yarmola, Colonel, Deputy Chief, Directorate of Advanced Interspecies Research and Special Projects of the Russian Ministry of Defence, Moscow, Russia; antonyarmola@rambler.ru

Vladislav S. Kalitka, Candidate of Chemical Sciences, Director of the Electric Propulsion Project Complex, NRC «Zhukovsky Institute», Moscow region, Zhukovsky, Russia; vladislav.kalitka@yandex.ru

Nikita D. Vasilkov, Main Expert of the Electric Propulsion Project Complex, NRC «Zhukovsky Institute», Moscow region, Zhukovsky, Russia; vasilkovnd@nrczh.ru