

ВЫБОР ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

© 2025

- М. А. Ковалёв** доктор технических наук, доцент, профессор кафедры эксплуатации авиационной техники;
Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королёва;
kovalev.ma@ssau.ru
- А. В. Кириллов** кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации авиационной техники;
Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королёва;
aleksey.v.kirillov@ssau.ru
- В. В. Ситников** аспирант;
Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королёва;
freiker007@gmail.com

Рассматриваются вопросы оценки эффективности процесса стендовых испытаний беспилотных летательных аппаратов. Отмечается, что оценить эффективность испытаний можно с помощью четырех основных показателей: экономическая эффективность, продолжительность испытаний, достоверность испытаний, точность измерений. Предлагаются математические выражения для определения численного значения каждого показателя. Рассматриваются вопросы оценки экономической эффективности испытаний беспилотных летательных аппаратов, проводимых на разных этапах жизненного цикла изделия. Предлагается методика оценки эффективности проведения наземных испытаний на основе механизмов многокритериального анализа. Приводится пример расчёта обобщенного показателя эффективности испытаний системы электроснабжения беспилотного летательного аппарата самолётного типа при работе бортовых генераторов электрической энергии под разной нагрузкой.

Беспилотный летательный аппарат; наземные испытания; эффективность испытаний; организация испытаний; показатели эффективности; многокритериальный анализ

Цитирование: Ковалёв М.А., Кириллов А.В., Ситников В.В. Выбор показателей эффективности системы стендовых испытаний беспилотных летательных аппаратов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2025. Т. 24, № 2. С. 19-32. DOI: 10.18287/2541-7533-2025-24-2-19-32

Введение

Процессы испытаний присутствуют на всех этапах жизненного цикла беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Так, на этапе проектных и опытно-конструкторских работ испытания на основе моделирования помогают решать задачи оценки совершенства конструктивно-схемных решений, выявить ошибки в расчётах. На этапе опытного производства испытания опытных изделий позволяют уточнить значения показателей функционирования БПЛА, дать рекомендации по доработке изделия. В процессе серийного производства БПЛА с помощью испытаний решаются задачи обеспечения качества готовых изделий и стабильности технологических процессов. Следует отметить, что, в отличие от воздушных судов гражданской авиации, БПЛА постоянно совершенствуются и дорабатываются, поэтому серийные модели выпускаются недолго, а в процессе эксплуатации БПЛА испытания решают традиционные задачи контроля, диагностики и устранения неисправностей бортовых систем.

Вместе с тем до настоящего времени алгоритмы организации и проведения испытаний БПЛА базируются в основном на предшествующем опыте, отсутствует приемлемая теория испытаний БПЛА, позволяющая оптимизировать этапы жизненного цикла изделия [1].

Как на этапе разработки программы испытаний, так и на этапе их организации и проведения существует проблема «*принятия решения*» – какой метод и методику измерений выбрать, какое испытательное оборудование использовать, какая последовательность воздействий на БПЛА должна быть выполнена и так далее.

В [1] в качестве решения указанной проблемы предложено использовать понятие «*эффективность испытаний*». То есть решения должны приниматься таким образом, чтобы процесс испытания технической системы был наиболее эффективным. Для оценки эффективности испытаний в [1] введены «*показатели эффективности*».

В [2] введено схожее понятие «*качество испытаний*» – как степень выполнения требований к испытанию. Предлагается алгоритм повышения качества испытаний авиационной техники за счёт совершенствования требований к испытаниям и соответствующей документации.

Авторы настоящей статьи продолжают и дополняют исследования, представленные в [1; 2] применительно к стендовым (наземным) испытаниям БПЛА.

В [1] вводится вектор показателей эффективности испытаний как n -мерный вектор:

$$\hat{Y}_{\langle n \rangle} = [\hat{Y}_1, \hat{Y}_2, \hat{Y}_3, \dots, \hat{Y}_n], \quad (1)$$

где физический смысл компонент $Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_n$ определяется целями испытаний и задачами исследования последних. Например, Y_1 – показатель точности количественных результатов испытаний, Y_2 – показатель достоверности этих результатов, Y_3 – стоимость испытаний, Y_4 – длительность испытаний и так далее. Диалектически символ « $\wedge$ » обозначает случайную природу объекта, в данном случае компонент Y . Выражение (1) означает, что эффективность испытаний – многогранный параметр, определяемый отдельными показателями разной физической природы.

Пусть задан вектор допустимых значений показателей $Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_n$ качества процесса испытаний:

$$Y_{\langle n \rangle}^{\text{д}} = [Y_1^{\text{д}}, Y_2^{\text{д}}, Y_3^{\text{д}}, \dots, Y_n^{\text{д}}],$$

тогда выражение:

$$\hat{Y}_{\langle n \rangle} \in \{Y_{\langle n \rangle}^{\text{д}}\} \quad (2)$$

определяет достаточную степень эффективности испытаний.

Как правило, на практике области допустимых значений параметров задаются в виде пороговых значений, тогда выражение (2) примет вид:

$$(\hat{Y}_{\langle n \rangle} < Y_{\langle n \rangle}^{\text{д}}) = \bigcap_{i=1}^n (\hat{Y}_i < Y_i^{\text{д}}). \quad (3)$$

Однако существуют сложности практического применения выражения (3) для оценки эффективности испытаний, для решения которых предлагается вероятностный

подход [1]. Также стоит отметить, что выражение (3) предполагает, что процесс испытания будет считаться эффективным, если все показатели эффективности будут ниже своих допустимых пороговых значений. На практике при планировании и организации испытаний часто приходится жертвовать одними показателями, например, стоимостью испытаний, для достижения необходимого уровня других, таких, как достоверность результатов, точность измерений и так далее. Более того, в большинстве случаев известными являются только экономические и временные ограничения. Что касается других пороговых значений – существуют трудности с определением их значений.

Для сохранения значимости каждого отдельного показателя качества испытаний, создания возможности практического применения идеи многопараметрической оценки эффективности испытаний в настоящей статье предлагается использовать механизмы многокритериального анализа [3; 4].

Задачу выбора наиболее эффективного способа организации и проведения испытаний БПЛА можно рассматривать как задачу принятия решения в условиях неопределённости. При этом метод «свертывания» всех показателей в один обобщённый (агрегированный) [4] может быть представлен следующим образом:

$$\hat{Y}_{\langle n \rangle} = \sum_{i=1}^n w_i \hat{Y}_i, \quad (4)$$

где w_i – весовой коэффициент i -го показателя качества испытаний.

Зададим область допустимых значений для $\hat{Y}_{\langle n \rangle}$ как $[0;1]$, где $\hat{Y}_{\langle n \rangle} = 0$ будет означать минимальную эффективность испытаний и $\hat{Y}_{\langle n \rangle} = 1$ соответственно максимальную эффективность стендовых испытаний БПЛА. При правильном выборе показателей эффективности испытаний $\hat{Y}_i$ и распределении значений весовых коэффициентов w_i такой подход позволит решить проблему «принятия решения», о которой говорилось выше.

В [5] рассмотрены подходы к двухуровневым задачам подобного типа. Однако, задача выбора показателей эффективности, которые могли бы быть не качественно, а количественно оценены еще на этапе планирования и подготовки к испытаниям, не является простой. Количество таких показателей может быть различным для разных БПЛА. Ниже описаны наиболее значимые, по мнению авторов, показатели, которые следует использовать на практике.

Показатель 1. Экономическая эффективность

Один из самых важных факторов для любого процесса испытаний – это наличие ресурсов, необходимых для его осуществления. Это относится и к подготовке, и к проведению испытаний. Рассмотрим один из показателей эффективности испытаний, предложенный в [1], связанный с финансовыми затратами:

$$\hat{Y}_1 = \frac{\Delta \hat{E}}{\hat{C}}, \quad (5)$$

где $\Delta \hat{E}$ – общий эффект от применения объекта испытаний, $\hat{C}$ – стоимость проведения испытаний.

В выражении (1) $\Delta\hat{E} = \hat{E} - \hat{E}_0$, где $\hat{E}$ – эффект, получаемый в результате использования испытанной системы; $\hat{E}_0$ – эффект, получаемый от дальнейшего использования не испытанной системы (предполагается, что испытания не проводились). Выражение (5) предполагает наличие выбора – проводить испытания или нет. Однако при разработке и производстве БПЛА, как и другой авиационной техники, зачастую проведение испытаний является обязательным. Получение численных значений величин $\hat{C}, \hat{E}, \hat{E}_0$ на практике будет зависеть от того, на каком этапе жизненного цикла БПЛА проводятся испытания. На рис. 1 представлена блок-схема получения значений величин (5) на этапе проектирования и разработки БПЛА.

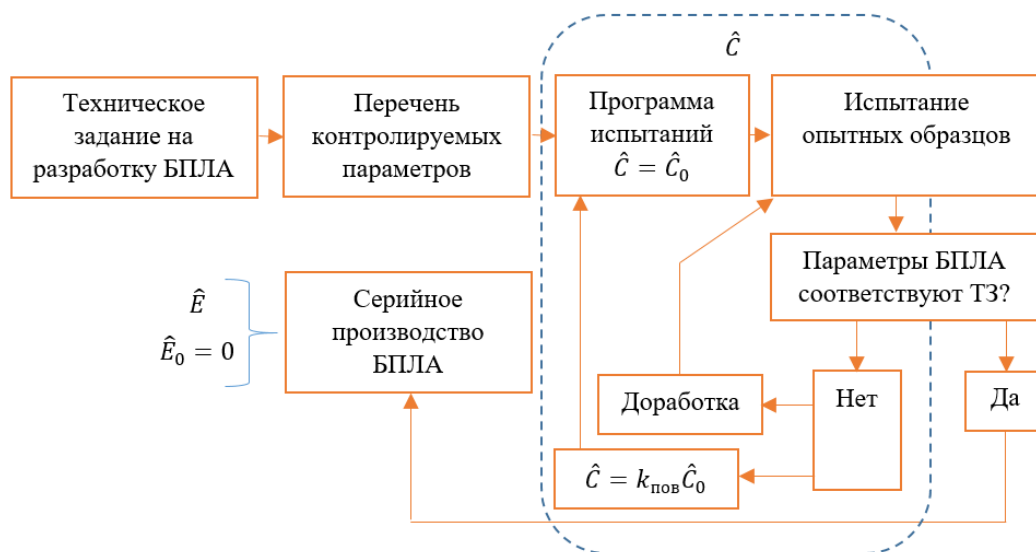


Рис. 1. Блок-схема испытаний на этапе проектирования и разработки БПЛА

После формирования технического задания (ТЗ) на разработку БПЛА можно выделить перечень контролируемых параметров, которые должны быть проверены в процессе проведения исследовательских испытаний [6]. Перечень контролируемых параметров, а также планируемые условия эксплуатации БПЛА, позволяют разработать программу испытаний. На основе программы испытаний подбираются методы и методики испытаний, перечень необходимого стенового оборудования и средств измерений, необходимый инженерный персонал. Таким образом, для каждой организации можно определить начальную стоимость исследовательских испытаний $\hat{C}_0$.

На этапе проектирования и разработки БПЛА испытания часто проводятся с использованием программных моделей [7], имитирующих логику работы бортового комплекса оборудования БПЛА. Программные модели являются имитаторами устройств, с которыми взаимодействует объект испытаний (электронный блок). Иногда доработка объекта испытаний заключается не в изменении его аппаратной части, а в обновлении программного обеспечения. При этом модели можно легко настроить под нужную версию программного обеспечения проверяемого блока. Цель испытаний в данном случае – проверка соответствия параметров электронного блока требованиям технического задания на проект.

В случае, если значения части параметров не соответствуют требованиям, выполняется доработка изделия и испытания повторяются (частично или полностью). Тогда

стоимость испытаний увеличивается пропорционально коэффициенту повторения $k_{\text{пов}}$. Если значения всех контролируемых параметров соответствуют техническому заданию, то БПЛА передаётся в серийное производство. Серийное производство и коммерческая реализация БПЛА формируют положительный эффект $\hat{E}$ от проведения испытаний (как части общего процесса проектирования и разработки БПЛА). В данном случае значение $\hat{E}_0 = 0$, так как без проведения испытаний невозможно разработать БПЛА, а значение $\hat{E}$ будет увеличиваться со временем. Таким образом, применение показателя (5) с практической точки зрения нецелесообразно, удобнее рассчитывать срок окупаемости проекта и заложить стоимость проведения испытаний в расходы на разработку и производство БПЛА. На рис. 2 представлена блок-схема получения значений величин (5) на этапе серийного производства БПЛА.

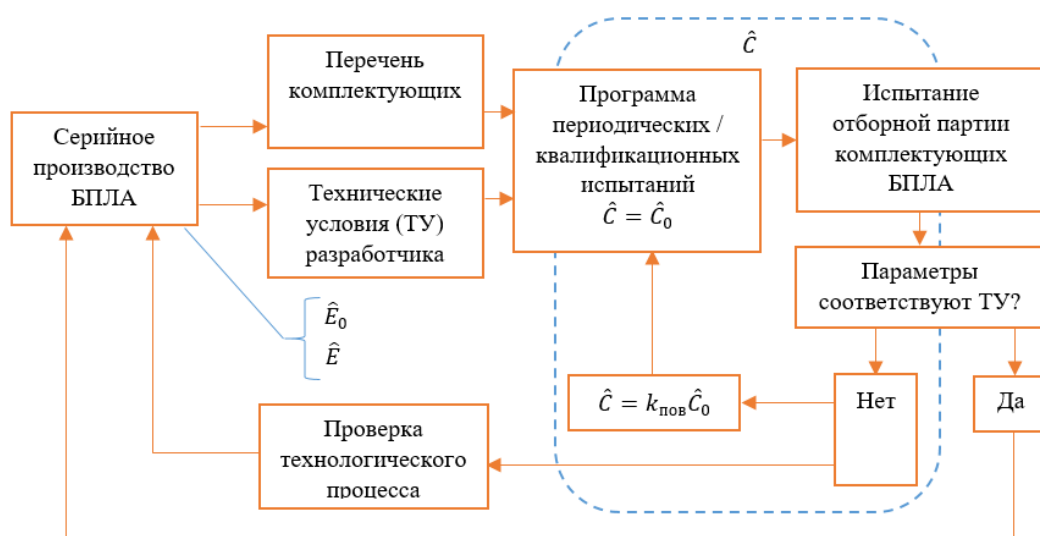


Рис. 2. Блок-схема испытаний на этапе серийного производства

При серийном производстве авиационной техники, в том числе и БПЛА, для контроля стабильности технологического процесса выполняются периодические и квалификационные испытания комплектующих изделий. В этом случае программа испытаний выпускается разработчиком на основе технических условий и перечня комплектующих БПЛА. Испытания проводятся через определённые интервалы времени. Для испытаний отбираются несколько изделий из партии. Как правило, программа периодических (квалификационных) испытаний предполагает воздействие на объект климатических и механических внешних воздействующих факторов [8]. Для реализации таких воздействий применяются климатические камеры, вибрационные, ударные и другие подобные стенды, а также специальное стендовое оборудование, обеспечивающее функционирование объекта в процессе испытаний и измерение контролируемых параметров. Зная, какое потребуется оборудование и количество инженерного персонала, можно определить начальную стоимость проведения испытаний $\hat{C}_0$.

В случае, если в процессе испытаний выявится несоответствие контролируемых параметров требованиям технических условий, выполняется проверка технологического процесса изготовления комплектующих и проводятся повторные испытания. Аналогично первому случаю начальная стоимость испытаний растёт в $k_{\text{пов}}$ раз. Если все испытания прошли успешно, то производителю комплектующих продлевается лицензия.

На этапе серийного производства положительный эффект от использования результатов испытаний $\hat{E}$ также определяется возможностью дальнейшего выпуска и реализации БПЛА и будет увеличиваться со временем. Если периодические испытания обязательны, то, как и в предыдущем случае, $\hat{E}_0 = 0$, если нет, то $\hat{E}_0 = \hat{E}$ и показатель $\hat{Y}_1 = 0$. Таким образом, на этапе серийного производства показатель $\hat{Y}_1$ не информативен. Однако, стоит отметить, что цель испытаний на этапе серийного производства – это обеспечение качества выпускаемой продукции. Поэтому, если рассматривать общий эффект от применения испытаний $\Delta\hat{E}$ как повышение «уровня качества», то выражение (5) обретает практический смысл. Однако, на практике достаточно сложно оценить «изменение качества» продукции после проведения испытаний и без них.

На рис. 3 представлена блок-схема получения значений величин (5) на этапе эксплуатации БПЛА.

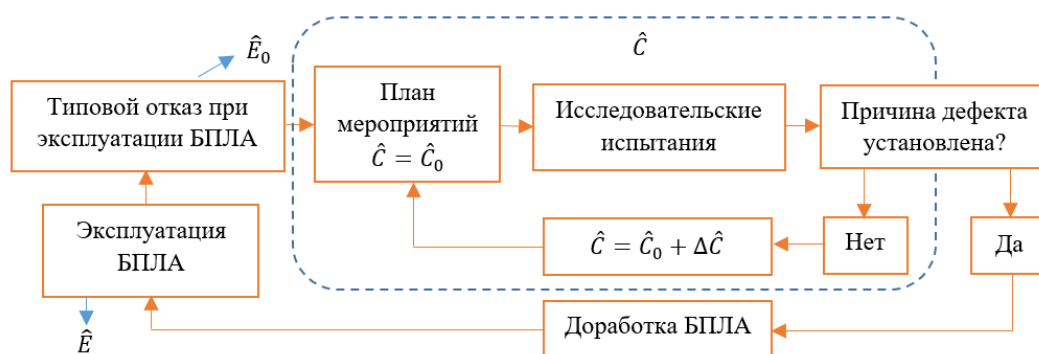


Рис. 3. Блок-схема испытаний на этапе эксплуатации

Предположим, что имеется опыт эксплуатации БПЛА, который позволил накопить статистику отказов. В результате анализа этой статистики разработчиком БПЛА выявлен повторяющийся типовой отказ, вынуждающий разработчика нести издержки в соответствии с гарантийными обязательствами. В такой ситуации у разработчика есть два пути: либо оставить все «как есть», либо провести исследования причин возникновения типового отказа и внести соответствующие изменения в конструкцию БПЛА или в технологию его изготовления.

Если выбирается второй вариант, то разрабатывается план мероприятий по выявлению причин типового отказа. Этот план включает определенный объем исследовательских испытаний [6], который задаёт начальную стоимость $\hat{C}_0$ их проведения. Если после проведения запланированного объема исследовательских испытаний причина типового отказа не установлена, то принимается решение о проведении дополнительных испытаний другого типа. Это увеличивает начальную стоимость испытаний на $\Delta\hat{C}$ и вносит соответствующие изменения в план мероприятий.

Процесс будет продолжаться до тех пор, пока причина отказа не будет установлена и выполнена доработка БПЛА. В результате разработчик устранил гарантийные издержки по данному отказу при дальнейшей эксплуатации БПЛА. В этом и будет состоять положительный эффект $\Delta\hat{E}$ от проведения испытаний, который можно оценить. Таким образом, на этапе лётной эксплуатации БПЛА возможно практическое применение показателя (5). Вместе с тем, целью настоящей статьи является определение показателей эффективности, которыми можно оперировать на этапе планирования и подготовки испытаний. Так как показатель (5) опирается на статистические данные, то

применять его для достижения поставленной цели можно только в том случае, если подобные испытания уже проводились.

Предлагается задать показатель экономической эффективности исходя из следующих рассуждений. Как правило, в качестве исходной информации для организации-исполнителя при планировании испытаний БПЛА являются объём испытаний и сроки их выполнения. При этом организация-исполнитель может проводить испытания полностью своими силами или привлекать сторонних соисполнителей. В случае проведения испытаний силами организации-исполнителя стоимость работ определяется затратами на разработку методики испытаний, проектирование и изготовление испытательного оборудования, а также прямыми и косвенными издержками на проведение испытаний. К прямым издержкам в общем случае относятся:

- фонд заработной платы сотрудников, непосредственно задействованных в проведении испытаний;

- затраты на расходные материалы, необходимые для проведения испытаний;

- расходы на электроэнергию и общехозяйственные нужды.

К косвенным издержкам относятся:

- фонд заработной платы работников административно-управленческого персонала и вспомогательных служб;

- амортизация испытательного оборудования;

- расходы на содержание и ремонт зданий, где размещены испытательные лаборатории;

- затраты на охрану и безопасность;

- другое.

Затраты на разработку методики испытаний, проектирование и изготовление испытательного оборудования включают стоимость пуско-наладочных работ, аттестацию как оборудования, так и методики испытаний. Сюда же можно отнести закупку типовых испытательных стендов (климатические камеры, стенды для имитации механических внешних воздействующих факторов). Таким образом, аналитические службы организации-исполнителя могут рассмотреть разные варианты проведения испытаний, оценить стоимость работ при каждом из них.

Пусть будет получено N вариантов проведения испытаний стоимостью $C_i, i \in [1; N]$. С точки зрения экономики наиболее эффективным будет вариант с минимальной стоимостью проведения испытаний. Введём показатель экономической эффективности $Y_i \in [0; 1]$ как:

$$Y_i = \hat{Y}_i = \frac{C_{\max} - C_i}{C_{\max}}, \quad (6)$$

где $C_{\max}$ – стоимость самого дорогого варианта проведения испытаний; C_i – стоимость выбранного для исполнения варианта проведения испытаний.

Показатель Y_i будет принимать максимальное значение 1, если испытания проведены без финансовых затрат (на практике недостижимо) и минимальное значение 0, если испытания проводятся с максимальными в данных условиях финансовыми затратами. Несомненно, одного показателя Y_i недостаточно для принятия решения, но данный показатель является одним из значимых.

Показатель 2. Продолжительность испытаний

Выдерживание установленных сроков – одна из приоритетных задач при организации и проведении испытаний, поэтому целесообразно ввести показатель эффективности, связанный с продолжительностью испытаний. Чем быстрее будут выполнены испытания, тем выше будет их эффективность.

Пусть на проведение испытаний задан период времени $T_{\text{зад}}$. Введём показатель $Y_i \in [0; 1]$, где значение $Y_i = 0,5$ будет соответствовать выполнению испытаний в установленный срок:

$$Y_i = \frac{1}{1 + \frac{T_{\text{и}}}{T_{\text{зад}}}}, \quad (7)$$

где $T_{\text{и}}$ – расчётная продолжительность испытаний. Из (7) следует, что если $T_{\text{и}} \ll T_{\text{зад}}$, то $Y_i \rightarrow 1$; если $T_{\text{и}} \gg T_{\text{зад}}$, то $Y_i \rightarrow 0$.

Наиболее сложной задачей при определении Y_i на практике является расчёт $T_{\text{и}}$. На продолжительность испытаний могут влиять внешние по отношению к организации-исполнителю факторы, такие как готовность объектов испытаний, испытательного оборудования (или комплектующие к ним), логистика и другие обстоятельства.

Для оценки $T_{\text{и}}$ будем считать за момент начала испытаний получение задания на их проведение, а момент завершения испытаний – полное оформление протоколов с результатами испытаний и иной регламентирующей документацией. Тогда общую продолжительность испытаний можно представить как

$$T_{\text{и}} = k_{\text{п}}T_{\text{п}} + k_{\text{э}}T_{\text{э}} + k_{\text{о}}T_{\text{о}} + k_{\text{д}}T_{\text{д}}, \quad (8)$$

где $T_{\text{п}}$ – время, затраченное на организацию и планирование испытаний; $T_{\text{э}}$ – время, затраченное на проведение экспериментальной части испытаний; $T_{\text{о}}$ – время, затраченное на обработку результатов; $T_{\text{д}}$ – время, затраченное на оформление отчётной документации; $k_{\text{п}}, k_{\text{э}}, k_{\text{о}}, k_{\text{д}}$ – коэффициенты внеплановых потерь времени.

Отметим, что $T_{\text{и}}$ и $T_{\text{о}}$ зависят от методики проведения испытаний, применяемого оборудования и инструмента; слагаемые $T_{\text{п}}$ и $T_{\text{д}}$ – от качества организации работ и внутрисистемного документооборота организации-исполнителя.

Аналитические службы организации на основании известной трудоёмкости испытаний, наличия испытательного оборудования (или плана их изготовления), штатного расписания, а также заключённых контактов с соисполнителями (при наличии) с использованием (8) смогут оценить расчётную продолжительность испытаний $T_{\text{и}}$. При этом значения коэффициентов внеплановых потерь подбираются на основе предыдущего опыта работы организации.

Показатель 3. Достоверность испытаний

Результаты, полученные при испытаниях БПЛА, должны обладать достаточной степенью достоверности, позволяющей принимать однозначное решение в соответствии с целями проведения испытаний [6]. Под достоверностью результатов испытаний

будем понимать степень соответствия условий, созданных при испытании БПЛА, реальным условиям его эксплуатации. Примем, что максимально возможная достоверность результатов испытаний достигается только с помощью лётных испытаний БПЛА, проводимых на расчётных режимах работы его силовой установки и бортовых систем, в эксплуатационном диапазоне климатических и механических воздействий, высот и скоростей полёта.

Для оценки уровня достоверности результатов испытаний введём параметр $Y_d \in [0;1]$, где $Y_d = 0$ – полное несоответствие, и $Y_d = 1$ – полное соответствие условий испытаний реальным условиям эксплуатации.

Запишем выражение для расчёта Y_d в следующем виде:

$$Y_d = \sum_{i=1}^n w_{xi} \left(1 - \frac{|x_i - x'_i|}{x_i} \right) + \sum_{j=1}^m w_{kj} \left(1 - \frac{|k_j - k'_j|}{k_j} \right) + \sum_{g=1}^p w_{fg} \left(1 - \frac{|f_g - f'_g|}{f_g} \right), \quad (9)$$

где x_i – i -й параметр (характеристика) БПЛА, единицы измерения которого определяются его типом (например, вес, длины бортовых жгутов, размах крыла и т.д.); x'_i – i -й параметр объекта (модели), подвергаемого испытаниям (если модель полностью воссоздаёт реальный БПЛА по i -му параметру, то $x_i = x'_i$); w_{xi} – весовой коэффициент, определяющий значимость i -го параметра при решении задачи воссоздания реальных условий эксплуатации (значение w_{xi} выбирается опытным путём из диапазона $[0;1]$); n – количество параметров БПЛА, имитируемых при испытании; k_j, k'_j, w_{kj} – соответственно значения климатических внешних воздействующих факторов (ВВФ) в эксплуатации и при испытаниях, их весовые коэффициенты; f_g, f'_g, w_{fg} – соответственно значения механических ВВФ в эксплуатации и при испытаниях, их весовые коэффициенты, m, p – количество соответственно климатических и механических ВВФ, имитируемых при испытании.

Как видно из (9), параметр Y_d в основном определяется применяемой методикой испытаний и испытательным оборудованием. На практике расчёт показателя достоверности Y_d результатов испытаний является трудоёмким. Точность и трудоёмкость расчёта будет возрастать при увеличении количества расчётных параметров n, m, p . Для упрощения расчёта Y_d можно задаться минимально допустимым уровнем точности определения показателя Y_d .

Показатель 4. Точность измерений

Ещё один показатель, определяющий качество испытаний, – это точность измерений контролируемых параметров БПЛА. Показатель достоверности Y_d (9) в основном определяется внешними по отношению к объекту испытаний условиями, которые воссоздают условия реальной эксплуатации БПЛА. При этом в процессе испытаний выполняются измерения параметров функционирования самого БПЛА и его систем как реакции объекта на эти внешние воздействия. Только измерения, выполненные в процессе испытания, с достаточной точностью определяют характеристики самого БПЛА. Недостаточная точность измерений параметров БПЛА может привести к неоднозначному результату при испытаниях и, как следствие, к необходимости повторного их проведения.

Введём показатель точности измерений, выполняемых при испытании. Как известно, для количественной оценки точности измерений используется понятие «погрешность (ошибка) измерений». Поэтому за основу показателя точности измерений примем приведённую погрешность δ измерения физической величины – параметра объекта испытаний. Так как в процессе испытаний выполняются измерения нескольких параметров БПЛА, запишем выражение для вычисления показателя точности измерений $Y_\delta \in (0; 1]$, как

$$Y_\delta = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log \left(1 + \frac{|\Delta x_i|}{x_{\max i}} \right), \quad (10)$$

где $x_{\max i}$ – предел измерения измерительного канала i -го параметра объекта испытаний; Δx_i – абсолютная погрешность измерительного канала i -го параметра объекта испытаний; n – количество измеряемых параметров объекта испытаний.

Так как современные средства измерения разнообразных физически параметров обладают достаточно высокой точностью, введена операция логарифмирования для усиления эффекта даже от малых улучшений точности измерения испытательного оборудования. Как видно из (10), показатель Y_δ примет максимальное значение $Y_\delta = 1$ в случае, когда абсолютные погрешности измерений всех измеряемых при испытании параметров БПЛА будут равны нулю (в реальности невозможно). Соответственно, $Y_\delta = 0$, когда все абсолютные погрешности будут сопоставимы со значениями измеряемых величин.

На практике для расчёта показателя Y_δ необходимо применить известные методы определения абсолютной погрешности измерений, описанные в [9 – 12]. В случае, если погрешности измерения разных параметров отличаются значительно (на порядок и более), рекомендуется применять выражение (10) для группы однотипных параметров. В этом случае показателей Y_δ будет несколько, в соответствии с количеством групп.

В соответствии с (4), (6), (7), (9), (10) запишем выражение для расчёта обобщённого показателя эффективности испытаний БПЛА по заданным четырём показателям:

$$Y_{\langle 4 \rangle} = w_y Y_y + w_t Y_t + w_d Y_d + w_\delta Y_\delta. \quad (11)$$

Зададим область значений показателя как $Y_{\langle 4 \rangle} \in [0; 1]$. Тогда сумма весовых коэффициентов в выражении (11) равна 1. При расчёте показателя $Y_{\langle 4 \rangle}$ организация-исполнитель определяет степень значимости каждого отдельного показателя и задаётся значениями весовых коэффициентов, которые остаются постоянными для расчёта эффективности разных вариантов проведения испытаний БПЛА. Наиболее эффективный вариант соответствует максимальному значению показателя $Y_{\langle 4 \rangle}$.

В качестве примера представим расчёт показателя $Y_{\langle 4 \rangle}$ при испытании системы электроснабжения БПЛА самолётного типа. Пусть основное требование заказчика испытаний – уложиться в заданный срок, обеспечив достаточную достоверность испытаний. При этом заказчик просит предоставить ему калькуляцию сметы на выполнение работ. Требования к точности измерений заключаются в применение средств измерений, которые утверждены Росстандартом и зарегистрированы в Госреестре средств измерений.

Испытания предполагают оценку в наземных условиях напряжения на шинах постоянного тока на соответствие требованиям ГОСТ Р 54073-2010 [13] при работе бортовых генераторов электрической энергии БПЛА под разной нагрузкой. Измерительная система испытательного стенда содержит три канала измерения: текущих оборотов двигателя, выходного напряжения генераторов постоянного тока, тока нагрузки.

Организация-исполнитель рассматривает три стратегии проведения испытаний:

Стратегия 1. Проведение испытаний на имеющейся стендовой базе с небольшими доработками под объект испытаний («Доработка стендов»).

Стратегия 2. Разработка под данные испытания нового автоматизированного стенда, повышающего достоверность результатов испытаний, и проведение испытаний с применением нового стенда («Новый стенд»).

Стратегия 3. Привлечение соисполнителя, у которого имеется необходимое испытательное оборудование, что позволит сократить продолжительность испытаний («Соисполнитель»).

Исходные данные для расчёта представлены в табл. 1.

Таблица 1. Исходные данные

Параметр	Символ	Стратегия 1 «Доработка стендов»	Стратегия 2 «Новый стенд»	Стратегия 3 «Соисполнитель»
Расчётная стоимость работ, тыс. руб.	$C_{\text{и}}$	500	1700	1200
Заданный срок испытаний, мес.	$T_{\text{зад}}$	6...8	6...8	6...8
Расчётная продолжительность испытаний, мес.	$T_{\text{и}}$	5	8	4
Частота вращения валов генераторов БПЛА, об/мин	x_1	$(0...12\ 000) \pm 100$		
Частота вращения валов генераторов, воссоздаваемая испытательным стендом, об/мин	x'_1	$(0...10\ 000) \pm 200$	$(0...12\ 000) \pm 100$	$(0...10\ 000) \pm 200$
Длина участка силовой линии «Генератор – основные шины» на БПЛА, м	x_2	4		
Длина участка силовой линии «Генератор – основные шины» на испытательном стенде, м	x'_2	1	4	2
Нагрузка генераторов БПЛА, кВт: - минимальное значение - номинальное значение - максимальное значение	x_3 x_4 x_5	2,5 3,4 4		
Нагрузка генераторов, имитируемая стендом, кВт: - минимальное значение - номинальное значение - максимальное значение	x'_3 x'_4 x'_5	2,3 3,1 3,9	2,5 3,4 4	2,3 3,2 4
Воздействие климатических ВВФ	—	не выполняется	не выполняется	не выполняется
Воздействие механических ВВФ	—	не выполняется	не выполняется	не выполняется
Класс точности канала измерения частоты вращения вала генераторов	δ_1	1,5	1	1,5
Класс точности канала измерения напряжения на контролируемых шинах	δ_2	2,5	1,5	2,5
Класс точности канала измерения потребляемого тока	δ_3	2,5	1,5	2,5

Зададим значения весовых коэффициентов следующим образом. Так как внешние воздействующие факторы не предусмотрены, то для (9) $w_{kj} = w_{fg} = 0$. Поскольку испытательный стенд имитирует пять параметров БПЛА, оказывающих равнозначное влияние на результаты испытаний, то $w_x = 0,2$. С учётом исходных требований заказчика для (11): $w_3 = 0,2$; $w_t = 0,3$; $w_d = 0,25$; $w_\delta = 0,25$. На практике, если испытания проводятся впервые, могут возникнуть трудности с выбором значений весовых коэффициентов. В этом случае рекомендуется выбрать равнозначные их значения и выполнить корректировку на основе результатов испытаний в будущем.

В табл. 2 представлены результаты расчёта обобщенного показателя эффективности испытаний для трёх стратегий их проведения.

Таблица 2. Показатели эффективности испытаний

Стратегия	Значения показателей эффективности испытаний				
	Y_3	Y_t	Y_d	Y_δ	$Y_{(4)}$
Стратегия 1 «Доработка стендов»	0,7	0,62	0,78	0,97	0,76
Стратегия 2 «Новый стенд»	0	0,5	1	0,98	0,65
Стратегия 3 «Соисполнитель»	0,29	0,67	0,84	0,97	0,71

Результаты расчёта показывают, что наиболее эффективной в условиях заданных параметров является стратегия 1 «Доработка стендов» ($Y_{(4)} = 0,76$). На практике возможно добавление дополнительных показателей эффективности испытаний, характеризующих процесс испытаний более детально – количество задействованного персонала, количество одновременно измеряемых параметров, трудоёмкость подготовительных работ и так далее. Таким образом, предложенные в статье показатели и методика оценки эффективности испытаний позволяют на этапе планирования и подготовки испытаний избрать наиболее правильную стратегию действий.

Библиографический список

1. Элементы теории испытаний и контроля технических систем / под ред. Р.М. Юсупова. Л.: Энергия, 1978. 192 с.
2. Рожков В.Н. Оценка качества испытаний на этапе проектирования и разработки авиационной техники // Качество. Инновации. Образование. 2018. № 2 (153). С. 16-22.
3. Подиновский В.В. Многокритериальные задачи принятия решений: теория и методы анализа: учебник для вузов. М.: Издательство Юрайт, 2024. 486 с.
4. Подиновский В.В., Ногин В.Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. М.: Физматлит, 2007. 256 с.
5. Шакиров В.А., Панкратьев П.С. Поддержка принятия решений на стадии предпроектных исследований на основе двухуровневого многокритериального анализа // Прикладная информатика. 2013. № 6 (48). С. 111-121.
6. ГОСТ 16504-81. Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения. М.: Стандартинформ, 2011. 24 с.

7. Кириллов А.В., Ситников В.В., Тучин А.Л. Автоматизация процесса тестирования бортовых систем беспилотных летательных аппаратов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2024. Т. 23, № 2. С. 14-27. DOI: 10.18287/2541-7533-2024-23-2-14-27
8. ГОСТ 21964-76. Внешние воздействующие факторы. Номенклатура и характеристики. М.: Издательство стандартов, 1989. 32 с.
9. Кравченко Н.С., Ревинская О.Г. Методы обработки результатов измерений и оценки погрешностей в учебном лабораторном практикуме: учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. 88 с.
10. Игонин Н.Н., Макаровский И.М., Киселев Д.Ю. Измерения функциональных параметров при испытаниях и эксплуатации авиационной техники. Самара: Изд-во СГАУ, 2014. 77 с.
11. ГОСТ Р 8.736-2011. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. М.: Стандартинформ, 2019. 26 с.
12. ГОСТ Р 50.2.038-2004. Измерения прямые однократные. Оценивание погрешностей и неопределённости результата измерений. М.: Стандартинформ, 2011. 11 с.
13. ГОСТ Р 54073-2010. Системы электроснабжения самолётов и вертолётот. Общие требования и нормы качества электроэнергии. М.: Стандартинформ, 2011. 38 с.

SELECTION OF PERFORMANCE INDICATORS FOR THE SYSTEM OF BENCH TESTS OF UNMANNED AERIAL VEHICLES

© 2025

- | | |
|-----------------------|---|
| M. A. Kovalev | Doctor of Science (Engineering), Associate Professor,
Professor of the Department of Aircraft Maintenance;
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;
kovalev.ma@ssau.ru |
| A. V. Kirillov | Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department
of Aircraft Maintenance;
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;
aleksey.v.kirillov@ssau.ru |
| V. V. Sitnikov | Postgraduate Student;
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;
freiker007@gmail.com |

The issues of evaluating the effectiveness of the process of bench testing of unmanned aerial vehicles are considered. It is noted that the effectiveness of the tests can be assessed using four main indicators: economic efficiency, test duration, test reliability, and measurement accuracy. Mathematical expressions are proposed to determine the numerical value of each indicator. The issues of assessing the cost-effectiveness of testing unmanned aerial vehicles conducted at different stages of the product life cycle are considered. A methodology for evaluating the effectiveness of conducting ground tests based on multi-criteria analysis mechanisms is proposed. An example of calculating a generalized indicator of the effectiveness of testing the power supply system of an aircraft-type unmanned aerial vehicle when on-board electric power generators are operating under different loads is given.

Unmanned aerial vehicle; ground tests; test efficiency; test organization; performance indicators; multi-criteria analysis

Citation: Kovalev M.A., Kirillov A.V., Sitnikov V.V. Selection of performance indicators for the system of bench tests of unmanned aerial vehicles. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2025. V. 24, no. 2. P. 19-32. DOI: 10.18287/2541-7533-2025-24-2-19-32

References

1. *Elementy teorii ispytaniy i kontrolya tekhnicheskikh sistem* [Elements of the theory of testing and control of technical systems / ed. by R.M. Yusupov] Leningrad: Energiya Publ., 1978. 192 p.
2. Rozhkov V.N. Test quality assessment at the stage of design and development of aviation equipment. *Quality. Innovation. Education*. 2018. No. 2 (153). P. 16-22. (In Russ.)
3. Podinovskiy V.V. *Mnogokriterial'nye zadachi prinyatiya resheniy: teoriya i metody analiza: uchebnyk dlya vuzov* [Multicriteria decision-making tasks: theory and methods of analysis: textbook for universities]. Moscow: Yurayt Publ., 2024. 486 p.
4. Podinovskiy V.V., Nogin V.D. *Pareto-optimal'nye resheniya mnogokriterial'nykh zadach* [Pareto-optimal solutions to multicriterion problems]. Moscow: Fizmatlit Publ., 2007. 256 p.
5. Shakirov V.A., Pankratiev P.S. Decision making support at the pre-feasibility study stage based on two level multi-attribute analysis. *Journal of Applied Informatics*. 2013. No. 6 (48). P. 111-121. (In Russ.)
6. GOST 16504-81. The state system of testing products. Product test and quality inspection. General terms and definitions. Moscow: Standartinform Publ., 2011. 24 p. (In Russ.)
7. Kirillov A.V., Sitnikov V.V., Tuchin A.L. Automation of the process of testing on-board systems of unmanned aerial vehicles. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2024. V. 23, no. 2. P. 14-27. (In Russ.). DOI: 10.18287/2541-7533-2024-23-2-14-27
8. GOST 21964-76. Environmental factors. Nomenclature and characteristics. Moscow: Izdatel'stvo Standartov Publ., 1989. 32 p. (In Russ.)
9. Kravchenko N.S., Revinskaya O.G. *Metody obrabotki rezul'tatov izmereniy i otsenki pogreshnostey v uchebnom laboratornom praktikume: uchebnoe posobie* [Methods of processing measurement results and error estimation in educational laboratory practice: textbook]. Tomsk: Tomsk Polytechnic University Publ., 2011. 88 p.
10. Igonin N.N., Makarovskiy I.M., Kiselev D.Yu. *Izmereniya funktsional'nykh parametrov pri ispytaniyakh i ekspluatatsii aviatsionnoy tekhniki* [Measurement of functional parameters during testing and operation of aviation equipment]. Samara: Samara State Aerospace University Publ., 2014. 77 p.
11. GOST R 8.736-2011. Multiple direct measurements. Methods of measurement results processing. Main positions. Moscow: Standartinform Publ., 2019. 26 p. (In Russ.)
12. GOST R 50.2.038-2004. Direct single measurements. Estimation of errors and uncertainty of measurements result. Moscow: Standartinform Publ., 2011. 11 p. (In Russ.)
13. GOST R 54073-2010. Electric power supply systems of airplanes and helicopters. General requirements and norms of quality of electric energy. Moscow: Standartinform Publ., 2011. 38 p. (In Russ.)