

УДК 355.014.1

Н.В. Фиров, доктор экономических наук, профессор
С.А. Сорокин

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОБЪЁМА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОТРАБОТКИ СИСТЕМ И ЭЛЕМЕНТОВ ОБРАЗЦОВ ВВТ НА РАННИХ ЭТАПАХ ИХ СОЗДАНИЯ

В статье предложен методический подход к прогнозированию объемов отработки систем и элементов образцов ВВТ, как составной части общей методологии оценки затрат на их создание. В его основу положена гипотеза о зависимости объема отработки изделия от степени отличия его характеристик по сравнению с прототипом. На примере маршевых твердотопливных двигателей проведено обоснование объема испытаний разрабатываемого изделия, обеспечивающего его отработку с заданной доверительной вероятностью.

Ключевые слова: опытно-конструкторская работа; экспериментальная отработка; тактико-технические характеристики; степень новизны; доверительная вероятность.

Создание новых образцов вооружения и военной техники (ВВТ) связано с определенными техническими и экономическими рисками, которые оказывают существенное влияние на сроки и стоимость выполнения опытно-конструкторских работ (ОКР), прогнозирование которых вследствие значительной неопределенности вызывает серьезные трудности и характеризуется, как правило, невысокой точностью. Особенно это характерно в отношении работ по экспериментальной отработке систем и элементов разрабатываемых образцов.

Одна из основных причин значительной ошибки прогноза затрат на создание образцов ВВТ на основе существующих методик с использованием параметрических методов состоит в том, что затраты определяются с учетом основных тактико-технических характеристик образцов. В то же время, по нашему мнению, более уместным было бы учитывать не абсолютные значения характеристик образцов, их систем и элементов (в дальнейшем изделий), а степень отличия (новизны) изделий от прототи-

пов. Подтверждение гипотезы о влиянии степени новизны разрабатываемого изделия по отношению к прототипу (степени радикальности реализованных в изделии инноваций) на затраты и объем его отработки показано в работе [1]. Однако, предложенный в ней методический подход позволяет оценить лишь изменения в объемах отработки изделий, вызванные различной степенью их новизны, т.е. проводить сравнительный анализ, и не позволяет определить сами объемы отработки.

Степень новизны изделий может быть отражена двумя уровнями описания: конструктивным и параметрическим (функциональным) [1; 2]. Конструктивный уровень описания характеризует степень новизны изделия с позиции его структуры и отражает использование в нем ранее разработанных (заимствованных) и новых (оригинальных) составных элементов. Функциональный уровень описания должен характеризовать отличие разрабатываемого изделия от своего прототипа по основным эксплуатационно-техническим характеристикам.

При прогнозировании затрат на проведение ОКР предпочтительным является использование конструктивного описания степени отличия разрабатываемых изделий от прототипов, где основным показателем является коэффициент применяемости ($K_{пр}$), характеризующий долю стандартных и унифицированных (заимствованных с других разработок) составных частей в изделии. Однако, учитывая трудности расчета коэффициента применяемости и в связи с ограниченной фактической информацией по нему, особенно на ранних этапах работ по созданию изделий, практическая реализация подхода к оценке рассматриваемых временных и стоимостных показателей на его основе проблематична. Более предпочтительным при проведении указанных оценок является использование параметрического уровня описания новизны разрабатываемых изделий.

При параметрическом описании уровень новизны изделия (радикальности инноваций) может быть выражен в виде степени преемственности изделий по основным характеристикам либо в виде относительного изменения характеристик [3]. Использование того или иного показателя степени новизны разрабатываемого изделия не принципиально. В данной статье для оценки степени новизны разрабатываемых изделий по отношению к прототипу использовано относительное изменение характеристик ($\bar{\Delta P}$).

Одно из центральных мест при создании методик прогнозирования объемов испытаний изделий занимает вопрос выбора учитываемых характеристик. В этом плане необходимо выделить, в первую очередь, показатели назначения изделий, габаритно-массовые характеристики и показатели, отражающие уровень их технического совершенства. К числу первых в отношении, например, двигателей относятся тяга, время работы и др. Однако более предпочтительным здесь является использование характеристик, отражающих, косвенным образом, одновременно несколько показателей назначения, что в определенной степени смягчает проблему их свертки. Так для маршевых двигателей в качестве таких «обобщающих» характеристик могут быть использованы их масса и суммарный импульс. Следует отметить, что, несмотря на существующее скептическое отношение к массе, этот показатель достаточно успешно используется при экономических оценках, особенно в отношении различного рода силовых установок [5-7], а в рассматриваемом примере масса двигателя, кроме тяги и времени работы, дополнительно косвенно отражает давление в камере сгорания – важного стоимостного фактора.

В отношении показателей технического совершенства действует одно из правил: «чем больше показатель, тем лучше» либо «чем меньше показатель, тем лучше». К показателям, отражающим уровень технического совершенства двигателей можно отнести коэффициент весового совершенства, удельный импульс и т.п. Для некоторых изделий, например, для систем управления, систем ориентации показатели назначения (различного рода точностные показатели) одновременно характеризуют и уровень их технического совершенства.

Если характеристика не отражает уровень технического совершенства изделия, то показатель $\bar{\Delta}P$ рассчитывается по формуле:

$$\bar{\Delta}P = \frac{|P - P^*|}{P^*}, \quad (1)$$

где $\bar{\Delta}P$ – показатель уровня новизны изделия (относительное отклонение характеристики от прототипа); P, P^* – значения характеристики рассматриваемого изделия и его прототипа, соответственно.

Оценку степени новизны разрабатываемых образцов по характеристикам, отражающим уровень технического совершенства, также допускается проводить по формуле (1). В то же время здесь более уместно использовать следующие зависимости [4]:

если характеристику требуется максимизировать (чем больше характеристика, тем выше уровень технического совершенства):

$$\bar{\Delta}P = \frac{|P - P^*|}{P^* - P_{min}}, \quad (2)$$

если характеристику требуется минимизировать:

$$\bar{\Delta}P = \frac{|P - P^*|}{P_{max} - P^*}, \quad (3)$$

где P_{min}, P_{max} – минимальное и максимальное значение характеристики изделий рассматриваемого вида.

Использование формул (2), (3) вместо (1) позволяет более корректно отразить некоторые важные тенденции в разработке изделий, в зависимости от уровня их технического совершенства. В частности, известно, что развитие науки, техники и общественной жизни подчиняется, как правило, экспоненциальному закону. В связи с этим, чем выше технический уровень образца, тем больше финансовых и временных ресурсов потребуется для его дальнейшего совершенствования на заданную степень новизны. Формулы (2) и (3) как раз и позволяют учесть не только степень отличия образца от прототипа, но и отражают уровень их технического совершенства, а, следовательно, и отмеченную выше закономерность.

В случае необходимости учета нескольких ценообразующих характеристик в условиях ограниченности опытных данных целесообразно проводить их свертку.

Иллюстрация наличия существенной связи между количеством испытаний разрабатываемых изделий и степенью их отличия по основным характеристикам от прототипа и невозможности использования в целях прогнозирования числа испытаний абсолютных значений характеристик на примере маршевых твердотопливных двигателей приведена на рисунках 1 и 2.

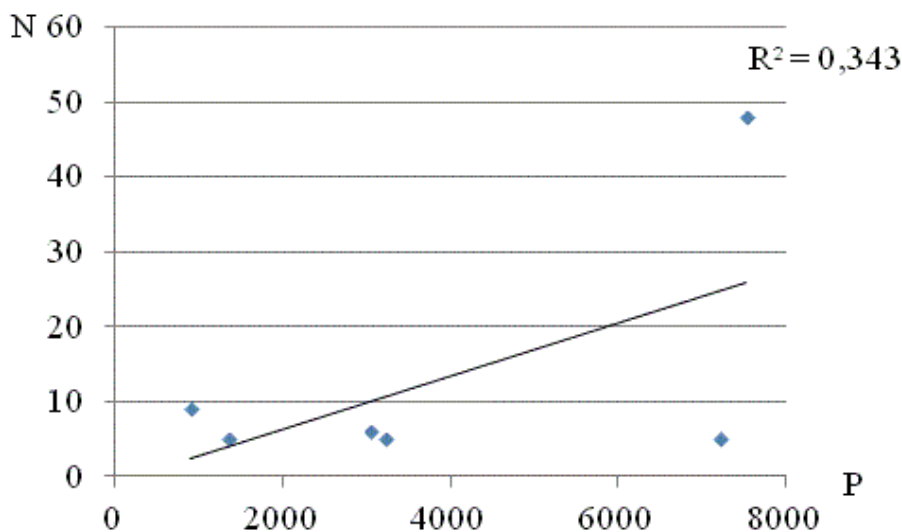


Рисунок 1 – Характер влияния суммарного импульса двигателя на объем испытаний

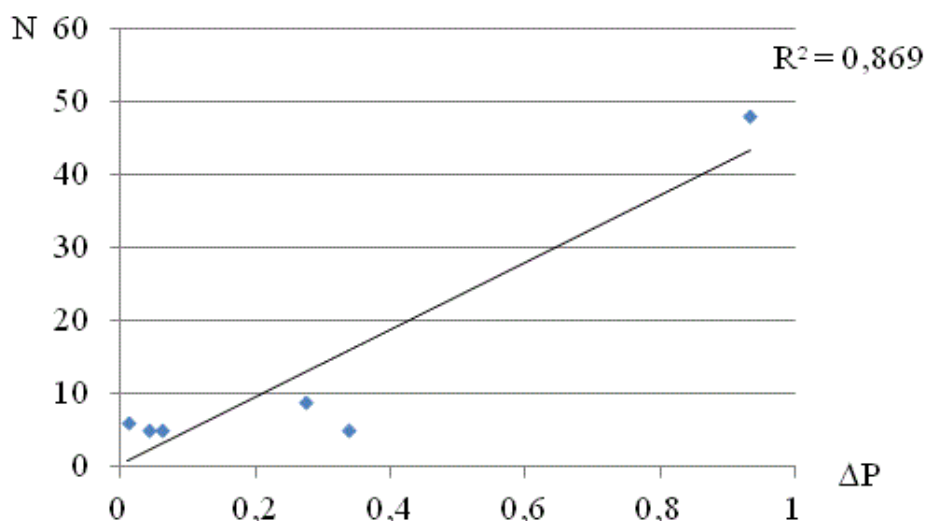


Рисунок 2 – Зависимость объема испытаний двигателя от относительного изменения его суммарного импульса по отношению к прототипу

Согласно проведенному анализу между количеством испытаний двигателя при его отработке и относительным отклонением его суммарного импульса от прототипа устанавливается устойчивая связь с коэффициентом детерминации 0,869. О влиянии суммарного импульса двигателя (абсолютных значений характеристик) на объем его отработки не может быть и речи. Здесь коэффициент детерминации составляет всего лишь 0,343. Если использовать полиномиальную модель, то коэффициенты детерминации составят 0,989 и 0,461, соответственно. Аналогичный результат был получен при учете в качестве основной характеристики

массы двигателя. При линейной аппроксимации коэффициент детерминации между количеством испытаний и массой двигателя составляет 0,543, а при учете относительного изменения массы – 0,967.

В дальнейшем нами используется полученная на основе обработки статистических данных полиномиальная зависимость количества испытаний, необходимых для отработки твердотопливных маршевых двигателей, от степени отличия их суммарного импульса от прототипа, имеющая вид:

$$\dot{N} = 68,043\bar{\Delta}P^2 - 18,673\bar{\Delta}P + 6,0786, \quad (4)$$

где \dot{N} – точечный прогноз количества испытаний двигателя; $\bar{\Delta}P$ – относительное отклонение суммарного импульса разрабатываемого двигателя от прототипа.

В интересах окончательного решения вопроса о возможности применения установленной регрессионной зависимости (4) было проверено правдоподобие гипотезы о согласованности теоретического и статистического распределений. Как известно, для этого могут применяться различные критерии согласия, в том числе и используемый нами критерий Фишера, рассчитываемый по формуле [8]:

$$F = \frac{\sigma_{\text{рег}}^2}{\sigma_{\text{ост}}^2}, \quad (5)$$

где $\sigma_{\text{рег}}^2$, $\sigma_{\text{ост}}^2$ – дисперсия регрессии, характеризующая отклонения расчетных значений показателя от его среднего значения и остаточная дисперсия, характеризующая отклонения фактических значений показателя от расчетных, соответственно.

Указанные дисперсии вычисляются по формулам:

$$\sigma_{\text{рег}}^2 = \frac{\sum(N_{ip} - N_{cp})^2}{m - 1}; \quad \sigma_{\text{ост}}^2 = \frac{\sum(N_i - N_{ip})^2}{n - m}, \quad (6)$$

где N_{ip} – расчетное значение количества испытаний; N_{cp} – среднее значение количества испытаний; n – объем выборки; m – количество статистических параметров в модели.

В результате проведенного анализа было установлено, что расхождения между теоретической кривой и статистическим распределением вызваны случайными обстоятельствами, обусловленными, в том числе, и ограниченными исходными данными, а не являются существенными и не вызваны неадекватностью самой модели реальному процессу. Гипотеза об адекватности модели не была отклонена.

Таким образом, результаты корреляционного и регрессионного анализов подтверждают гипотезу о наличии существенной связи между количеством испытаний разрабатываемых изделий и степенью их отличия от основных характеристик прототипов.

Использование при прогнозировании числа испытаний не абсолютных характеристик изделий, а показателя, характеризующего их отличие от характеристик изделий-прототипов, обуславливает не только саму возможность более корректного прогнозирования числа испытаний, но и возможность расширения объёма статистических данных, дополнительно повышая обоснованность прогноза. Так, например, в рассматриваемом случае выборка формировалась не отдельно для маршевых двигателей первой, второй либо третьей ступеней, а в отношении всех типоразмеров маршевых двигателей. А, как известно, решение проблемы ограниченности информации для образцов ВВТ имеет огромное значение.

Ниже на примере маршевых твердотопливных двигателей, изложен алгоритм и проведено обоснование объема испытаний разрабатываемого образца, обеспечивающего его отработку с некоторой заданной доверительной вероятностью β .

Как известно (см., например, [8]), интервальный прогноз показателя, в данном случае объема испытаний, определяется по зависимости:

$$N_{\text{и}} = \dot{N} \pm t_{\beta} \cdot \sigma_N \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(\bar{\Delta P}_{\text{расч}} - \bar{\Delta P}_{\text{ср}})^2}{k}}, \quad (7)$$

где $N_{\text{и}}$ – интервальный прогноз необходимого количества испытаний для отработки разрабатываемого двигателя; \dot{N} – точечный прогноз количества испытаний двигателя, определяемый по формуле (4); t_{β} – коэффициент Стьюдента – табличный коэффициент, отражающий степень доверия прогнозу; σ_N – среднее квадратическое отклонение числа испытаний по индивидуальным наблюдениям от линии регрессии;

n – объем выборки; $\bar{\Delta P}_{cp}$ – среднее значение относительного отклонения основной характеристики изделий от прототипов в выборке; k – сумма квадратов отклонений фактических индивидуальных отклонений показателя $\bar{\Delta P}_i$ от его среднего значения в выборке:

$$k = \sum (\bar{\Delta P}_i - \bar{\Delta P}_{cp})^2. \quad (8)$$

Таким образом, в целях прогнозирования объема испытаний разрабатываемого изделия, обеспечивающего его отработку с требуемой наперед заданной доверительной вероятностью, методика должна содержать:

\dot{N} – регрессионную зависимость точечного прогноза количества испытаний изделия (в рассматриваемом случае зависимость (4));

показатель k – сумма квадратов отклонений фактических индивидуальных отклонений показателя $\bar{\Delta P}_i$ от его среднего значения в выборке;

σ_N – среднее квадратическое отклонение числа испытаний по индивидуальным наблюдениям от линии регрессии;

$\bar{\Delta P}_{cp}$ – среднее значение относительного отклонения основной характеристики изделий от прототипов в выборке.

Среднее квадратическое отклонение объема испытаний по индивидуальным наблюдениям от линии регрессии определяется по известной зависимости вида:

$$\sigma_N = \sqrt{\frac{\sum (N_i - N_{ip})^2}{n}}, \quad (9)$$

где N_i – фактические объемы испытаний; N_{ip} – расчетные объемы испытаний, определяемые по регрессионной зависимости точечного прогноза (4).

На основе проведенных расчетов установлено:

$$\sigma_N = 1,587; \quad k = 0,607; \quad \bar{\Delta P}_{cp} = 0,276.$$

Пусть разрабатывается двигатель, отличающийся по суммарному импульсу от своего прототипа на 30%. Необходимо определить объем испытаний, обеспечивающий отработку двигателя с доверительной вероятностью 0,7 (весьма вероятно).

Точечный прогноз количества испытаний разрабатываемого двигателя при отличии его характеристики от прототипа на 30% в соответствии с формулой (4) составит: $\dot{N} = 6,6$.

Коэффициент Стьюдента для доверительной вероятности $\beta = 0,7$ и объема выборки $n=6$ согласно приложения 5 работы [8] равен: $t_\beta = 1,156$.

Интервальный прогноз объема испытаний определяется по зависимости (7) и равен: $N_{\text{и}} = 6,6 \pm 2$.

В рассматриваемом случае, учитывая требование целочисленности количества испытаний, необходимо более глубоко проанализировать результаты отработки двигателя при 9-ти, 8-ми и 7-ми испытаниях, т.е. решить обратную задачу: оценить доверительную вероятность того, что объем испытаний не превысит указанных величин. В этих целях необходимо определить такие значения t_β , при которых верхние границы интервального прогноза будут соответствовать заданным объемам испытаний, т.е. $N_{\text{зад}} = 9$, $N_{\text{зад}} = 8$ и $N_{\text{зад}} = 7$.

Коэффициент t_β определяется по зависимости:

$$t_\beta = \frac{N_{\text{зад}} - \dot{N}}{\sigma_N \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(\bar{\Delta P}_{\text{расч}} - \bar{\Delta P}_{\text{ср}})^2}{k}}} \quad (10)$$

При $N_{\text{зад}} = 9$, исходя из (10) имеем: $t_\beta = 1,512$ и $\beta = 0,806$. Тогда можно заключить: вероятность того, что количество испытаний не превысит 9-ти, равна: $\text{Вер}_9 = 0,5 + \frac{0,806}{2} = 0,903$.

Для 8 испытаний имеем: $t_\beta = 0,882$ и $\beta = 0,580$. Вероятность того, что для отработки не потребуется больше 8-ми испытаний, равна: $\text{Вер}_8 = 0,5 + \frac{0,580}{2} = 0,790$.

Вероятность того, что для отработки двигателя не потребуется больше 7-ми испытаний составит менее заявленной величины 0,7.

Следовательно, при прогнозировании ожидаемых затрат и сроков проведения ОКР необходимо исходить из того, что для отработки двигателя потребуется проведение 8-ми испытаний.

Таким образом, установлено, что для отдельных видов изделий между объемами испытаний при их отработке и степенью их отличия от прототипов по основным характеристикам может существовать тесная связь. Объем отработки изделий в данном случае может быть представлен в виде регрессионной зависимости от степени его новизны.

Такой подход к прогнозированию объема испытаний разрабатываемых изделий позволит:

1) обосновать объем испытаний разрабатываемого образца, обеспечивающего его отработку с требуемой наперед заданной доверительной вероятностью β ;

2) определить доверительную вероятность того, что количество испытаний при отработке изделия не превысит наперед заданного объема.

Следует также еще раз отметить, что использование при прогнозировании числа испытаний не абсолютных характеристик образцов, а их степени отличия от прототипов, позволяет увеличить объем выборки, дополнительно повышая обоснованность прогноза.

Кроме того, предложенный подход к прогнозированию объема испытаний изделий для их отработки, может быть использован для установления зависимости вероятности успешного выполнения работ от объема выделенных ассигнований. Высказывания о такой зависимости на качественном уровне известны. Однако, ее количественного описания или методологии построения в настоящее время пока не существует.

Список использованных источников

1. Фиров Н.В. Методическое обеспечение оценки влияния степени радикальности инноваций на стоимость и сроки разработки сложных технических систем // Экономический анализ: теория и практика. 2016. № 7(454). С. 185-195.
2. Фиров Н.В. Влияние степени радикальности инноваций на затраты по экспериментальной отработке изделий // Вопросы региональной экономики. 2016. № 1(26). С. 49-51.
3. Викулов С.Ф., Фиров Н.В. Постановка задачи обоснования рациональной степени радикальности инноваций при разработке образцов вооружения и военной техники // Вооружение и экономика. 2014. № 26.
4. Фиров Н.В. Методические основы оценки конкурентоспособности предприятия // Экономический анализ: теория и практика. 2013. № 22(325). С. 2-9.
5. Гальченко А.В., Тегин В.А. Долгосрочный прогноз стоимости боевых летательных аппаратов и численности ВВС стран мира // Вооружение и экономика. 2012. № 3.
6. Гальченко А.В., Тегин В.А. Долгосрочный прогноз стоимости танков и численности боевого состава бронесил стран мира // Вооружение и экономика. 2013. № 1.
7. Нестеров А.А. Об оценке стоимости образца вооружения и военной техники с учетом коэффициента военно-технического уровня // Вооружение и экономика. 2017. № 3.
8. Викулов С.Ф. Военно-экономический анализ: учебник. М.: ВУ, 2015. 340 с.