

Научная статья
УДК 623:658.562

Роль цифровых технологий в обеспечении испытаний сложных технических систем

**Владимир Герасимович Найденев, Денис Леонидович Егоров,
Константин Викторович Лендоев**

Аннотация. В статье отмечается, что одним из направлений повышения эффективности экспериментально-испытательной базы полигонов является широкое внедрение цифровых технологий в процесс подготовки и проведения испытаний сложных технических систем. При этом рассмотрены две основные области применения цифровых технологий: при проведении моделирования испытываемых технических систем в рамках опытно-теоретического метода испытаний, а также применение цифровых технологий при автоматизации решения широкого круга задач полигонных испытаний технических систем. Рассмотрены этапы имитационного моделирования сложных технических систем, возможности применения цифровых двойников в рамках реализации опытно-теоретического метода испытаний, а также направления дальнейшего развития опытно-теоретического метода испытаний технических систем. Кроме того, рассмотрены области использования цифровых технологий при комплексной автоматизации широкого круга задач полигонных испытаний.

Ключевые слова: цифровые технологии; сложные технические системы; опытно-теоретический метод; натурные и модельные испытания; математические и компьютерные модели

Для цитирования: Найденев В.Г., Егоров Д.Л., Лендоев К.В. Роль цифровых технологий в обеспечении испытаний сложных технических систем // Вооружение и экономика. 2026. №3(77). С. 46-53.

Original article

The Role of Digital Technologies in Test Support of Complex Technical Systems

Vladimir G. Naidenov, Denis L. Egorov, Konstantin V. Lendoev

Abstract. The article notes that one of certain directions for the efficiency improvement prospects of the polygons experimental test base is the widespread digital technology introduction in the complex technical systems preparation and testing process. At the same time, two main areas of digital technologies application in the tested technical systems modeling within the frame of analytical method, and the use of digital technologies in the course of automation for wide range of tasks solution of technical systems polygon test are considered both. The stages of complex technical systems simulation modeling, the possibility of digital twin application within the framework of the experimental theoretical test method implementation, and the direction of further development of the experimental theoretical method of technical system tests are considered as well. In addition, the areas of use of digital technologies in the complex automation of a wide range of tasks, polygon tests are considered.

Keywords: digital technologies; complex technical system; experimental theoretical method; natural and model tests; mathematical and computer models

For citation: Naidenov V.G., Egorov D.L., Lendoev K.V. The Role of Digital Technologies in Test Support of Complex Technical Systems. Vooruzhenie i ekonomika = Armament and Economics. 2026; 77(3): 46-53. (In Russ.).

Особенность современного этапа развития экспериментально-испытательной базы (ЭИБ) полигонов состоит в том, что основные ее технико-экономические показатели в рамках используемых аппаратных, программных и технологических решений достигли своих предельных значений. В этих условиях даже для незначительного повышения отдельных показателей эффективности экспериментально-испытательной базы полигонов, на основе ранее разработанных методических и технологических решений во многих случаях, требуются существенные, во многом неоправданные материальные затраты. Поэтому для дальнейшего повышения эффективности испытаний необходимо внедрение технологических инноваций [1].

Одним из направлений повышения эффективности экспериментально-испытательной базы полигонов является широкое внедрение цифровых технологий в процесс подготовки ЭИБ к проведению испытаний, в ходе проведения натурных и модельных испытаний

образцов сложных технических систем (ТС), а также в процесс обработки испытательной информации и представления результатов испытаний¹.

Известно, что основными видами испытательных работ, проводимых на полигонах, являются натурные и модельные испытания образцов сложных технических систем². При этом процесс натурных испытаний заключается в непосредственном экспериментальном исследовании изделия без изменения его собственной природы в естественных условиях существования. Такие испытания могут проводиться как при естественных внешних воздействующих факторах, так и при внешних воздействующих факторах, создаваемых искусственным путем с помощью специальных испытательных стендов или специальных методов и моделей, применяемых на испытательных полигонах.

Несомненно, натурные испытания образцов сложных ТС представляют собой наилучший способ получения искомых оценок тактико-технических характеристик и показателей эффективности испытываемых образцов, так как в процессе их проведения могут быть получены наиболее объективные статистические данные в условиях воздействия внешней среды, адекватных условиям дальнейшей эксплуатации испытываемых образцов ТС. Однако в процессе испытаний образцов ТС проведение большого количества натурных экспериментов существенно ограничено. Это связано с тем, что для проведения натурных испытаний ТС необходимы большие затраты времени, материальных и финансовых средств. Поэтому наряду с натурными испытаниями применяется и модельный подход. Последний основан на опосредованном познании, когда в силу различных обстоятельств вместо реального объекта непосредственно исследуется другой, сходный с ним и более доступный естественный или искусственный, материальный или идеальный объект, который в определенных отношениях, существенных свойствах замещает изучаемый реальный объект и дает о нем новые знания.

Технология модельных испытаний осуществляется с привлечением методов физического и математического моделирования. Применение этих методов позволяет отказаться от ряда сложных натурных испытаний реальных изделий или их макетов. Например, при проектировании изделия, когда реально оно еще не существует, модель позволяет проверить новые идеи и концепции, выдвигаемые в процессе разработки, методы и средства их реализации и оценить предлагаемый результат. При этом исследовательские испытания с использованием математических и физических моделей позволяют оценить потенциальные возможности новых идей и концепций при их реализации в будущем изделии.

В статье рассмотрены две области применения цифровых технологий в процессе проведения испытаний сложных ТС. Первая область связана с применением цифровых технологий при проведении моделирования испытываемых технических систем в рамках опытно-теоретического метода испытаний, а вторая область – с применением цифровых технологий при автоматизации решения широкого круга задач планирования испытаний ТС, подготовки ЭИБ испытательных полигонов к проведению испытаний, организации и управления процессом проведения испытаний, статистической обработки, представления и документирования результатов проводимых испытаний технических систем, а также с дальнейшим внедрением вычислительных средств и их программного обеспечения в средства ЭИБ, применяемых для обеспечения испытаний ТС.

Необходимо отметить, что рациональное сочетание натурных и модельных испытаний образцов сложных ТС представляет собой технологию опытно-теоретического метода испытаний образцов технических систем, который был разработан в 1960-х гг. У истоков разработки опытно-теоретического метода стояли такие видные ученые, как Н.Бусленко, И.Пенчуков, А.Шаракшанэ, И.Железнов, В.Ивницкий, В.Мудров и другие ученые.

¹ Буренок В.М., Найденов В.Г. Методы повышения эффективности применения средств и систем обеспечения испытаний вооружения, военной и специальной техники. М.: Граница, 2006. 263 с.

² См.: Шаракшанэ А.С., Железнов И.Г., Ивницкий В.А. Сложные системы: учеб. пособие. М.: Высшая школа, 1977. 247 с.; см. также [2].

Опытно-теоретический метод испытаний сложных ТС представляет собой систему взаимно связанных по технологическим процедурам, согласованных по решаемым задачам и этапам исследований, а также по выполняемым функциям методов аналитических исследований, натурных испытаний и моделирования. Этот метод базируется на научно обоснованном рациональном сочетании результатов сравнительно небольшого числа ресурсоемких натурных экспериментов с достаточно большим объемом результатов моделирования, получаемых с использованием математических и компьютерных моделей [3].

Основу опытно-теоретического метода испытаний сложных технических систем составляют математическая теория многофакторного планирования экспериментов, теория математической статистики и имитационного моделирования, а также методология рационального комплексирования данных, полученных в ходе натурных экспериментов, математического и физического моделирования. Именно в опытно-теоретическом методе испытаний сложных технических систем реализуется широко используемая в последнее время технология цифрового двойника изделия, который по своему определению представляет собой систему, состоящую из цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с изделием или его составными частями.

Классический опытно-теоретический метод испытаний предполагает реализацию сложного технологического процесса отработки и испытаний, создаваемых образцов сложных ТС. Основные положения опытно-теоретического метода испытаний приведены на рисунке 1 [1].

Отличительной чертой этого метода является то, что он позволяет оценивать как отдельные характеристики элементов в испытываемой системе, так и характеристики системы в целом в виде показателей эффективности в широком диапазоне их изменения. При этом одновременно решается задача наиболее рационального использования ограниченного числа натурных экспериментов, включая задачу увязки результатов экспериментов с результатами моделирования.



Рисунок 1 – Основные положения опытно-теоретического метода испытаний сложных технических систем

Применение опытно-теоретического метода испытаний сложных технических систем позволяет существенно снизить материальные и финансовые затраты на проведение испытаний. Кроме того, экспериментальные натурные испытания, как правило, не позволяют изучить поведение сложных технических систем во всем диапазоне условий применения из-за невозможности реального воспроизведения некоторых ситуаций применения испытываемых технических систем по назначению. В то же время, применение методов моделирования в рамках опытно-теоретического метода испытаний позволяет оценить технические характеристики испытываемых технических систем во всем факторном пространстве условий проведения их испытаний и дальнейшей эксплуатации технических систем.

В рамках реализации опытно-теоретического метода испытаний технических систем имеет место широкое применение цифровых имитационных моделей, которые по определению представляют собой систему математических и компьютерных моделей, а также электронных документов изделия, описывающую структуру, функциональность и поведение вновь разрабатываемого или эксплуатируемого изделия на различных стадиях жизненного цикла, для которой на основании результатов цифровых или иных испытаний выполняется оценка соответствия предъявляемых к изделию требований.

Несмотря на специфические особенности построения и применения каждой конкретной цифровой имитационной модели, в процессе моделирования можно выделить последовательность следующих этапов [3-5]:

- формулирование решаемой методами моделирования проблемы или задачи и определение целей исследования;
- изучение исследуемой системы и построение ее содержательного описания, выраженного в понятиях определенной предметной области;
- построение формализованного описания моделируемой системы, представленного формальными категориями на основе знаний, содержащихся в ее содержательном описании;
- разработка моделирующего алгоритма и реализация модели на ЭВМ, включая отладку программы;
- верификация модели, то есть подтверждение того, что программное обеспечение компьютерного моделирования выполняет подготовку исходных данных, расчеты и обработку результатов таких расчетов в соответствии с указанной математической моделью;
- валидация программного обеспечения компьютерного моделирования, то есть подтверждение того, что программное обеспечение компьютерного моделирования в заявленной области применения адекватно и с заданной степенью точности выполняет подготовку исходных данных, расчеты и обработку результатов таких расчетов;
- планирование и проведение имитационного эксперимента в соответствии с выбранным планом и получение требуемых данных об испытываемом объекте.

Отличительным признаком опытно-теоретического метода испытаний является использование цифровых моделей, прошедших валидацию по результатам натурных испытаний сложных технических систем. При этом под валидацией имитационной модели понимается процесс, позволяющий установить тот факт, что разрабатываемая модель является адекватной, то есть позволяющей достаточно точно описывать испытываемую техническую систему или ее составную часть. Под адекватностью модели и реального объекта испытаний понимается близость их выходных характеристик в соответствии с выбранным критерием согласия. Адекватность математической модели подтверждается, если установлено, что выходные данные модели соответствуют выходным данным реальной испытываемой ТС при идентичных входных воздействиях.

На этапе валидации математических моделей испытываемых ТС необходимо располагать математическим аппаратом, позволяющим проводить сравнительное оценивание различных решений, исходя из конечных целей всего процесса моделирования. Для разработки такого аппарата нужно иметь методики идентификации параметров разработанных математических моделей с конкретными показателями точности и достоверности, а также критерии сопоставления результатов натурных и модельных экспериментов, определяющих

меру близости соответствующих модельных и реальных процессов. Математически задача проверки адекватности модели реальному объекту испытания обычно формулируется как задача проверки некоторой совокупности гипотез. Конкретный вид и содержание проверяемых гипотез определяется для каждой рассматриваемой задачи в отдельности.

Необходимо также отметить, что в последние десятилетия теоретические исследования по совершенствованию опытно-теоретического метода испытаний сложных технических систем проводились без системной увязки всех аспектов проблемы обеспечения испытаний финальных образцов ТС только по отдельным направлениям. В основном эти исследования касались вопросов совершенствования технологии проектирования различных математических и компьютерных моделей. Однако, например, имеют место проблемные вопросы идентификации параметров многомерных математических нелинейных моделей технических систем, особенно в случаях наличия результатов натурных экспериментов малого размера, либо проведение идентификации параметров моделей по результатам проведения единичных экспериментов³. Слабо проработаны и вопросы определения оптимального соотношения количества натурных и модельных экспериментов, проводимых при испытаниях сложных технических систем.

Несмотря на все сложности в реализации на полигонах опытно-теоретического метода испытаний сложных технических систем, он и до настоящего времени составляет основу технологий полигонных испытаний образцов сложных ТС и его совершенствование является одним из основных направлений развития испытательного полигонного комплекса.

На рисунке 2 приведены основные направления, по которым должно идти развитие опытно-теоретического метода испытаний сложных технических систем.



Рисунок 2 – Направления развития опытно-теоретического метода испытаний сложных технических систем

³ Найденов В.Г. Алгоритм идентификации параметров сложных многомерных математических моделей испытываемых технических систем при реализации опытно-теоретического метода испытаний // Вооружение и экономика. 2025. №3(73). С. 26-35.

Главным принципом, наиболее полно обеспечивающим повышение точности и достоверности результатов испытаний, сокращение их продолжительности, уменьшение трудоемкости, стоимости и численности испытательного персонала, является принцип комплексной автоматизации испытаний, реализуемый путем применения автоматизированных систем испытаний различных классов и назначения, построенных на базе средств вычислительной техники и других средств автоматизации технологических процессов испытаний с использованием высокоточных средств измерений и соответствующего аттестованного испытательного оборудования. В основе комплексной автоматизации испытаний технических систем также лежат цифровые технологии.

Автоматизированная система испытаний представляет собой организационно-технический комплекс, предназначенный для обеспечения максимально возможного в данных условиях уровня автоматизации испытательных работ. В такой системе сочетаются информационно-измерительные и управляющие функции как по отношению к объекту испытаний, так и к условиям его функционирования.

Автоматизированные системы испытаний различного назначения, построенные на основе цифровых технологий, как организационно-технические комплексы включают следующие составные части:

- техническое обеспечение, объединяющее всю совокупность информационно-измерительной, вычислительно-моделирующей и управляющей техники, обеспечивающей функционирование системы испытаний;
- математическое обеспечение, состоящее из математических методов, моделей и алгоритмов, используемых в технологии испытаний;
- программное обеспечение, состоящее из пакетов программ автоматизации измерений, регистрации, обработки, отображения и документирования результатов испытаний, а также комплекса программ управления процессом испытаний;
- лингвистическое обеспечение, объединяющее всю совокупность специализированных языковых средств и трансляторов для взаимодействия обслуживающего персонала с системой;
- организационно-методическое обеспечение, определяющее режимы эксплуатации системы и действия обслуживающего персонала.

Конкретный состав и логика взаимодействия составляющих этих видов обеспечения автоматизированной системы испытаний должны выбираться, исходя из целей и задач соответствующих испытаний.

В настоящее время цифровые технологии в составе экспериментально-испытательной базы полигонов применяются в следующих средствах и системах:

- в средствах траекторных, радиотелеметрических и других видов измерений, в средствах создания фоно-целевой обстановки в районе проведения испытаний технических систем, а также в стендах математического и физического моделирования при реализации опытно-теоретического метода испытаний технических систем;
- в автоматизированных системах планирования, управления процессом подготовки и проведения испытаний образцов ТС, а также системах обеспечения безопасности проведения натурных испытаний технических систем;
- в автоматизированных системах сбора и передачи измерительной и другого вида испытательной информации, а также в системах связи и другой телекоммуникационной аппаратуре;
- в системах автоматизированной математической обработки измерительной и другой испытательной информации, полученной в ходе проведения испытаний образцов сложных технических систем;
- в системах математической обработки результатов испытаний, включающих комплекс расчетных моделей оценки тактико-технических характеристик испытываемых технических систем;
- в автоматизированных системах отображения и документирования результатов полигонных испытаний образцов сложных технических систем.

Применение цифровых технологий в средствах экспериментально-испытательной базы полигонов можно рассмотреть на примере современной радиолокационной станции траекторных измерений, в которой цифровые технологии выполняют следующие основные функции:

- формирования сложных зондирующих сигналов и управления диаграммой направленности антенной решетки;
- цифровой обработки радиолокационной информации о параметрах траекторий полета летательных аппаратов;
- обеспечения помехозащищенности радиолокационной станции от естественных и преднамеренных помех;
- формирования выходной измерительной информации о параметрах траекторий полета летательных аппаратов и другой служебной информации в форматах стандартных протоколов для передачи в центр обработки по телекоммуникационным каналам передачи данных.

Широкое применение цифровых технологий имеет место и в большинстве других средств обеспечения испытаний.

Рассматривая направления совершенствования цифровых технологий в полигонных испытаниях технических систем, нельзя не остановиться на вопросе совершенствования методик проведения оценок достигнутого уровня внедрения современных цифровых технологий в испытательный процесс образцов ТС, что весьма важно для объективного контроля процесса управления качеством полигонных испытаний. Такая оценка может основываться на сопоставлении значений основных характеристик процесса полигонных испытаний (стоимость испытаний, объем и достоверность оцениваемых тактико-технических характеристик ТС, время проведения испытаний и т.д.) до и после внедрения новых цифровых технологий.

Таким образом, весь опыт проведения испытаний современных образцов сложных технических систем показывает, что для повышения эффективности применения экспериментально-испытательной базы полигонов требуется дальнейшее широкое внедрение цифровых технологий во все сферы испытательного процесса, начиная с этапа планирования испытательных работ и заканчивая этапом отображения и документирования результатов оценок проведенных испытаний таких технических систем. Основными направлениями внедрения цифровых технологий в процесс обеспечения испытаний сложных ТС являются широкое применение цифровых двойников в рамках реализации опытно-теоретического метода испытаний, а также применением цифровых технологий для полной автоматизации решения задач планирования испытаний ТС, организации и управления процессом проведения испытаний, статистической обработки, визуализации и документирования результатов проводимых испытаний технических систем. По мере усложнения образцов испытываемых технических систем, ужесточения требований к точности и достоверности оценок их тактико-технических характеристик, а также снижения сроков проведения испытаний роль цифровых технологий в процессе испытаний таких ТС будет неуклонно повышаться.

Список источников

1. Найденов В.Г., Тарасенко К.А. Методический подход к определению рационального объема проводимых натурных экспериментов при испытаниях сложных технических комплексов // Вооружение и экономика. 2022. №4(62). С. 14-23.
2. Мустафаев Н.Г., Жуков А.А., Гаврилов М.В. Эффективность применения виртуальной реальности в оборонно-промышленном комплексе: современные технологии и перспективы // Проблемы повышения эффективности научной работы в оборонно-промышленном комплексе России: материалы VII Всеросс. науч.-практ. конф. (г. Знаменск, 11-12 апреля 2024 г.). Астрахань: АГУ им. В.Н. Татищева, 2024. С. 85-90.

3. Системно-концептуальные основы методологии военно-научных исследований и решения прикладных военно-технических проблем: монография в 3 кн. Кн.3 / Под ред. Б.А. Демидова. Тверь: ОПВЭиФ, 2014. 560 с.

4. Контролинг в управлении качеством и надежностью специальной электроники и электротехники. Т.2: Методологические основы обеспечения качества на стадии НИОКР и серийного производства: монография / Под ред. С.И. Бокова. Ярославль: Канцлер, 2025. 278 с.

5. Бусленко В.Н. Автоматизация имитационного моделирования сложных систем. М.: Наука, 1977. 239 с.

Информация об авторах

В.Г. Найденов – доктор технических наук, старший научный сотрудник.

Д.Л. Егоров – <https://orcid.org/0009-0006-9342-6175>.

К.В. Лендоев – SPIN 1414-2304.