

В.Е. Селезнев

Технологии Виртуальных Испытательных Стендов

Методология
разработки и
применения



В. Е. Селезнев

Технологии Виртуальных Испытательных Стендов

Методология разработки и применения

Монография



МОСКВА – 2024

УДК 004.02 004.8 004.94 623.5
ББК 22.18 22.253 32.813
С29



<https://elibrary.ru/vpwwfdg>

Рецензент:

К.К. Абгарян – д.ф.-м.н., главный научный сотрудник, руководитель отдела
ФИЦ «Информатика и управление» РАН, профессор ВМК МГУ

Селезнев, Вадим Евгеньевич.

С29 Технологии Виртуальных Испытательных Стендов: методология разработки и применения : монография / В.Е. Селезнев. – Москва : МАКС Пресс, 2024. – 608 с.

ISBN 978-5-317-07290-2

<https://doi.org/10.29003/m4301.978-5-317-07290-2>

Монография содержит подробное описание практического подхода к решению в сжатые сроки сложных производственных проблем, связанных с анализом, синтезом, оценением, испытаниями и эксплуатацией наукоёмких технических или технологических систем. Основным инструментом такого решения является создание и практическая реализация технологий Виртуальных Испытательных Стендов (ВИС). При этом ВИС представляется в формате прикладной компьютерной программы или малой компактной киберфизической системы с задействованием цифровых двойников и теории искусственного интеллекта.

В книге изложены и научно обоснованы теоретические и прикладные положения методологии разработки и применения технологий ВИС (сокращённо – методологии «ТехноВИС»), включая характерную для неё общую схему вычислительного эксперимента, вложенные концепцию и методологию построения и эксплуатации ВИС, а также методы управления проектами её производственного воплощения.

Даны иллюстративные примеры производственной реализации технологий ВИС в разных отраслях промышленности для решения важных задач, требующего оперирования знаниями на стыке нескольких областей науки, техники и технологий.

Материал монографии обобщает тридцатилетний опыт разработки и использования технологий ВИС или их сегментов для автоматизированного решения сложных практически значимых проблем создания и совершенствования наукоёмких продуктов с существенным положительным эффектом и соблюдением сроков, априори выделенных на их решение.

Предложенная методологии «ТехноВИС» на сегодняшний день нашла производственное применение в машиностроении, приборостроении, станкостроении, трубопроводном транспорте, тепловой и атомной энергетике, автомобилестроении, трубной промышленности, металлургии, в обеспечении промышленной, пожарной и экологической безопасности. Она активно применялись как в Российской Федерации, так и за её пределами.

Книга ориентирована на инженерно-технических специалистов и научных работников, занимающихся практически значимым автоматизированным решением проблем анализа, синтеза, оценивания, экспериментальной отработки или эксплуатации наукоёмких технических или технологических систем с гибридным применением аппарата численного имитационного моделирования и структурно-параметрической оптимизации. Её содержание может оказаться полезным разработчикам прикладного программно-математического обеспечения, аспирантам и преподавателям, занимающимся математическим моделированием и проведением расчётно-аналитических работ в технической, технологической или смежных областях.

Монография доступна студентам старших курсов технических вузов.

УДК 004.02 004.8 004.94 623.5
ББК 22.18 22.253 32.813

Все права защищены. Никакая часть настоящей книги не может быть воспроизведена или передана в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами, будь то электронные или механические, включая фотокопирование и запись на магнитный носитель, а также размещение в Интернете, если на то нет письменного разрешения её владельца.

555002

ISBN 978-5-317-07290-2



© Селезнев В. Е., 2024
© Селезнева М. В. (дизайн обложки), 2024
© Оформление. ООО «МАКС Пресс», 2024

Посвящается
моей супруге, другу и коллеге
Ольге Геннадиевне Селезневой

Оглавление

ПРЕДИСЛОВИЕ	12
ВВЕДЕНИЕ	15
Список основных используемых сокращений	22

ГЛАВА 1

ОБЩАЯ СХЕМА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА В СОСТАВЕ МЕТОДОЛОГИИ РАЗРАБОТКИ И ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ВИС

1.1 Развёрнутое определение технологии ВИС	31
1.1.1 Истоки формирования понятия «технология ВИС»	31
1.1.2 Численное аналитико-имитационное моделирование, регламентируемое методологией «ТехноВИС»	36
1.1.3 Объект исследования в методологии «ТехноВИС»	38
1.1.4 Комплексная моделируемая система в методологии «ТехноВИС»	41
1.1.5 Основная математическая модель в методологии «ТехноВИС»	43
1.1.6 Цифровые двойники, цифровые тени, среда и пространство цифровых двойников в методологии «ТехноВИС»	47
1.1.7 Определение понятия «технология ВИС» в методологии «ТехноВИС»	50
1.1.8 Пояснения к введённому понятию «технология ВИС»	51
1.2 Описание общей схемы вычислительного эксперимента в составе методологии «ТехноВИС»	53
1.2.1 Нулевой этап «Изучение производственной проблемы»	54
1.2.2 Первый этап «Вербальное описание постановки задачи моделирования»	55
1.2.3 Второй этап «Концептуальное моделирование»	57
1.2.4 Третий этап «Построение субмоделей гибридной оптимизационной математической модели ВИС»	58
1.2.5 Четвёртый этап «Выбор или разработка методов численного исследования построенных субмоделей»	64
1.2.6 Пятый этап «Формирование гибридной оптимизационной математической модели ВИС»	67
1.2.7 Шестой этап «Построение ВИС для решения задачи моделирования»	68
1.2.7.1 Обобщённый вариант состава ВИС	69
1.2.8 Седьмой этап «Научное планирование виртуальных экспериментов на базе ВИС для решения поставленной задачи моделирования»	70
1.2.9 Восьмой этап «Выполнение запланированных вычислительных экспериментов на базе ВИС для решения задачи моделирования»	74
1.2.10 Девятый этап «Внедрение полученных результатов применения ВИС для устранения производственной проблемы»	75

1.2.11	Дополнительный этап вычислительного эксперимента.....	75
1.3	Определение понятия «Виртуальный Испытательный Стенд» в методологии «ТехноВИС»	76
1.4	Хронологическое описание основных этапов становления и развития методологии «ТехноВИС».....	77
1.4.1	Возникновение технологий ВИС при разработке систем автоматизированного проектирования наукоёмких изделий и новых технологических процессов	77
1.4.2	Становление технологий ВИС при создании аппаратно-программных комплексов численного оценивания фактического состояния дефектных участков магистральных трубопроводов	79
1.4.3	Разработка технологий ВИС для численного анализа функционирования и чувствительности внутритрубных магнитных снарядов-дефектоскопов	80
1.4.4	Разработка технологий ВИС для оптимального управления газовыми потоками в трубопроводной системе Международной газотранспортной компании «SPP-DSTG» (Словакия – Германия – Франция)	83
1.4.5	Разработка технологий ВИС для численного анализа процессов загрязнения рек и распространения жидких опасных веществ по их руслам, сопровождаемых негативными воздействиями на население и экологию прилегающих районов	88
1.4.6	Разработка Виртуального Испытательного Полигона для исследования эффективности методик и средств борьбы с пожарами на объектах ТЭК	88
1.4.7	Разработка технологий ВИС для численного исследования безопасности атомных электростанций в интересах ОАО «Концерн Росэнергоатом».....	92
1.4.8	Разработка Высокоточных Компьютерных Тренажёров для обучения диспетчерского и линейного персонала газовой промышленности	96
1.4.9	Разработка технологий ВИС для совершенствования сквозных технологических процессов изготовления труб и соединительных отводов большого диаметра	99
1.4.10	Разработка технологий ВИС для численного оценивания разбалансов в поставках природного газа на базе восстановления транспортных потоков....	108
1.4.11	Разработка Виртуального Баллистического Полигона для совершенствования стрелкового оружия, автоматических пушек и боеприпасов к ним	112
1.4.12	Разработка технологий ВИС для автоматизированного построения трасс прокладки разветвлённых жгутов в рамках системы автоматизированного проектирования приборов	115
1.4.13	Разработка технологий ВИС для глубоко автоматизированного синтеза системы автоматического оптимального управления в составе макетного образца пусковой установки	116
1.5	Минимальный теоретический фундамент, требуемый для разработки методологии «ТехноВИС» и собственно технологий ВИС	119
1.6	Область основного приложения методологии «ТехноВИС».....	120
1.7	О языке междисциплинарного общения при разработке и применении технологий ВИС	120

ГЛАВА 2

ОСНОВНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ И ПРИЧИНЫ СОЗДАНИЯ И РАЗВИТИЯ
МЕТОДОЛОГИИ РАЗРАБОТКИ И ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ВИС

2.1 Формирование подходов к снижению негативного влияния человеческого фактора при проектировании систем	123
2.1.1 Методология «ТехноВИС» и системы автоматизированного проектирования изделий и технологических процессов	131
2.2 О развитии методов численного моделирования и численной оптимизации с позиции методологии «ТехноВИС»	135
2.2.1 Сеточные методы теоретической механики	136
2.2.2 Сеточные методы численного решения задач механики и электродинамики сплошных сред	139
2.2.2.1 Методы конечных разностей	143
2.2.2.2 Методы конечных элементов	144
2.2.2.3 Методы граничных элементов	147
2.2.2.4 Методы конечных (контрольных) объёмов	148
2.2.2.5 Методы частиц	148
2.2.3 Методы структурно-параметрической оптимизации	150
2.2.3.1 Методы математического программирования	151
2.2.3.2 Методы динамического программирования	154
2.2.3.3 Методы стохастической оптимизации	154
2.2.3.4 Генетические алгоритмы	161
2.2.3.5 Методы многокритериальной оптимизации	165
2.2.3.6 Методы вариационного исчисления	171
2.2.3.7 Методы математической идентификации	173
2.2.3.8 Методы поиска внутренней точки системы алгебраических равенств и неравенств	174
2.2.3.9 Методы оптимизации на графах	175
2.2.4 Методы теории конечных автоматов	177
2.3 О технологиях искусственного интеллекта в рамках совершенствования методологии «ТехноВИС»	179
2.3.1 Эволюционное моделирование	179
2.3.2 Нейросетевое моделирование	181
2.3.2.1 Парадигмы обучения искусственной нейронной сети	182
2.3.2.2 Глубокое обучение как частный случай машинного обучения	183
2.3.2.3 Стохастический градиентный спуск	185
2.3.2.4 Свёрточная нейронная сеть	190
2.4 Развитие теории автоматического управления и её использование в методологии «ТехноВИС»	191
2.4.1 О фундаментальной задаче автоматического управления	193

2.4.2 Адаптивные САУ НП.....	197
2.4.3 Интеллектуальные САУ НП.....	198
2.5 Влияние возникновения киберфизических и мехатронных систем на развитие методологии «ТехноВИС».....	199
2.6 Технологии цифровых двойников и развитие методологии «ТехноВИС»	204
2.7 Развитие методов математической статистики и их роль в совершенствовании методологии «ТехноВИС».....	209

ГЛАВА 3

ВЛОЖЕННАЯ КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ВИС В СОСТАВЕ МЕТОДОЛОГИИ РАЗРАБОТКИ И ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ВИС

3.1 Основные теоретические положения вложенной концепции построения и эксплуатации ВИС	213
3.2 Стадии построения и эксплуатации ВИС.....	218
3.2.1 Стадия 1 «Когнитивное и концептуальное моделирование функционирования наукоёмкого продукта при построении ВИС».....	218
3.2.2 Стадия 2 «Математическое моделирование функционирования наукоёмкого продукта при построении ВИС»	225
3.2.3 Стадия 3 «Компьютерное моделирование функционирования наукоёмкого продукта при построении ВИС»	227
3.2.4 Стадия 4 «Комплексная разработка ВИС».....	230
3.2.5 Стадия 5 «Тестирование, верификация и валидация ВИС»	230
3.2.6 Стадия 6 «Научное планирование виртуальных экспериментов на базе ВИС для решения исходной производственной проблемы».....	231
3.2.7 Стадия 7 «Проведение виртуальных экспериментов на базе ВИС для решения исходной производственной проблемы».....	232
3.2.8 Стадия 8 «Анализ полученных результатов виртуальных экспериментов и проверка выполнения критериев решения исходной производственной проблемы на базе ВИС»	234
3.3 Общая формулировка вербальной постановки исходной производственной проблемы (шаблоны постановки ИПП).....	234

ГЛАВА 4

ВЛОЖЕННАЯ МЕТОДОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ВИС КАК КЛЮЧЕВОЙ КОМПОНЕНТ МЕТОДОЛОГИИ РАЗРАБОТКИ И ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ВИС

4.1 Основные теоретические положения вложенной методологии построения и эксплуатации ВИС	236
4.2 Практический алгоритм решения исходной производственной проблемы на базе построения и эксплуатации ВИС	239
4.2.1 Шаг 1 «Вербальное описание постановки обобщённой задачи построения и эксплуатации ВИС для устранения исходной производственной проблемы»	239

4.2.2 Шаг 2 «Формирование концептуальных моделей для решения исходной производственной проблемы»	248
4.2.2.1 Базовые положения концептуального моделирования, используемые для решения исходной производственной задачи	248
4.2.2.2 Построение концептуальных моделей с применением методов имитационного моделирования.....	250
4.2.2.3 Обобщённая процедура разработки концептуальных моделей для решения исходной производственной проблемы	254
4.2.2.4 К вопросу построения концептуальной модели системы управления	255
4.2.2.5 К вопросу построения концептуальной версии гибридной оптимизационной математической модели ВИС	256
4.2.3 Шаг 3 «Построение математических моделей для преодоления исходной производственной проблемы»	257
4.2.3.1 Подход к построению имитационных математических моделей	258
4.2.3.2 Подход к построению оптимизационных математических моделей.....	263
4.2.3.3 Построение имитационных математических моделей.....	268
4.2.3.4 Выбор или разработка методов численного анализа построенных имитационных математических моделей	281
4.2.3.5 Построение оптимизационных математических моделей и алгоритмов оптимизации	300
4.2.3.6 Требование к внесению изменений в математические модели.....	303
4.2.4 Шаг 4 «Компьютерная реализация разработанных математических моделей и методов их численного исследования для решения исходной производственной проблемы»	303
4.2.5 Шаг 5 «Построение ВИС для устранения исходной производственной проблемы»	307
4.2.6 Шаг 6 «Тестирование, верификация и валидация ВИС»	307
4.2.7 Шаг 7 «Научное планирование виртуальных экспериментов на базе ВИС для решения исходной производственной проблемы».....	311
4.2.8 Шаг 8 «Решение исходной производственной проблемы посредством проведения виртуальных экспериментов на базе ВИС»	314
4.2.8.1 Проведение виртуальных экспериментов на базе ВИС для решения исходной производственной проблемы.....	314
4.2.8.2 Обработка, анализ и интерпретация результатов виртуальных экспериментов на базе ВИС для решения исходной производственной проблемы.....	314
4.2.8.3 Проверка выполнения критериев решения исходной производственной проблемы с применением ВИС	316
4.2.9 Шаг 9 «Внедрение полученных результатов эксплуатации ВИС для устранения исходной производственной проблемы»	318
4.3 О редукции положений теории информации на методологию «ТехноВИС».....	318

ГЛАВА 5**ОСНОВНЫЕ АСПЕКТЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТАМИ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДОЛОГИИ РАЗРАБОТКИ И ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ВИС**

5.1 Проект реализации методологии «ТехноВИС» как объект управления	329
5.2 Участники проекта реализации методологии «ТехноВИС»	341
5.3 Процессы инициации проекта реализации методологии «ТехноВИС»	347
5.4 Планирование проекта реализации методологии «ТехноВИС»	349
5.5 Организация исполнения проекта реализации методологии «ТехноВИС»	355
5.6 Контроль исполнения проекта реализации методологии «ТехноВИС»	356
5.7 Закрытие проекта реализации методологии «ТехноВИС»	360
5.8 Управление содержанием проекта реализации методологии «ТехноВИС» на разных стадиях его выполнения	362
5.9 Управление проектом реализации методологии «ТехноВИС» по временным параметрам	367
5.10 Управление стоимостью проекта реализации методологии «ТехноВИС»	369
5.11 Управление рисками проекта реализации методологии «ТехноВИС»	370
5.12 Управление трудовыми ресурсами проекта реализации методологии «ТехноВИС»	378

ГЛАВА 6**ПОДХОД К СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ТРАДИЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ РАЗРАБОТКИ НАУКОЁМКИХ ТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ ВИС**

6.1 Методология «ТехноВИС» как основа совершенствования процессов разработки научноёмких технических изделий	383
6.2 Совершенствование традиционных процессов проектирования новых научноёмких изделий с использованием технологий ВИС	385
6.3 Совершенствование традиционных процессов реверсивного инжиниринга и модернизации существующих научноёмких изделий с использованием технологий ВИС	401
6.4 Совершенствование процессов подготовки производства и изготовления спроектированных научноёмких изделий с использованием технологий ВИС	410
6.5 Совершенствование традиционных процессов экспериментальной отработки изготовленных научноёмких изделий с использованием технологий ВИС	410

ГЛАВА 7**КВИНТЭССЕНЦИЯ СОДЕРЖАНИЯ
МЕТОДОЛОГИИ РАЗРАБОТКИ И ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ВИС**

7.1 Основной принцип изложения методологии «ТехноВИС»	411
7.2 Ключевые понятия и категории методологии «ТехноВИС»	411

7.3 Базовые положения и сегменты методологии «ТехноВИС»	415
7.4 Комплекс правил, принципов, требований и рекомендаций по разработке и численному анализу математических моделей в методологии «ТехноВИС»	422
7.5 Обобщённый подход к решению исходной производственной проблемы в методологии «ТехноВИС»	428
7.6 Обеспечение повышенной точности и адекватности численного моделирования в методологии «ТехноВИС»	432
7.7 Управление надёжностью наукоёмких продуктов в методологии «ТехноВИС»	434
7.8 О роли теории информации в становлении методологии «ТехноВИС»	436
7.9 Об организационном сегменте методологии «ТехноВИС»	438
Список используемых публикаций	440
Приложение 1	
ИЛЛЮСТРАТИВНЫЙ ПРИМЕР ВЕРБАЛЬНОГО ОПИСАНИЯ ПОСТАНОВКИ ОБОБЩЁННОЙ ЗАДАЧИ ПОСТРОЕНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ВИС ДЛЯ ОТРАБОТКИ ГТД	476
П1.1 Краткая характеристика натурных и полунатурных испытательных стендов для исследования ГТД, его узлов, агрегатов и систем по результатам сбора и обработки первичной информации	476
П1.2 Вариант вербальной постановки обобщённой задачи	478
П1.3 Вербальное описание предлагаемых методов решения обобщённой задачи	485
Приложение 2	
ИЛЛЮСТРАТИВНЫЙ ПРИМЕР БАЗОВОЙ КОНЦЕПТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ВИРТУАЛЬНОГО БАЛЛИСТИЧЕСКОГО ПОЛИГОНА	486
П2.1 Краткая характеристика назначения ВБП	486
П2.2 Описание предлагаемого варианта базовой концептуальной модели ВБП	489
Приложение 3	
ИЛЛЮСТРАТИВНЫЙ ПРИМЕР АНАЛИТИЧЕСКОГО ВЫВОДА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПОЛЁТА ПУЛИ С УЧЁТОМ ЭФФЕКТОВ НУТАЦИИ, ПРЕЦЕССИИ И ДЕРИВАЦИИ В УСЛОВИЯХ ПОЛНОГО БЕЗВЕТРИЯ	501
П3.1 Список сокращений, используемых только в рамках приложения	501
П3.2 Краткая характеристика эффектов ротации, нутации, прецессии и деривации при неуправляемом полёте статически и динамически симметричной пули под действием плоскопараллельного гравитационного поля	501
П3.3 Математическая модель неуправляемого полёта пули переменной массы при полном безветрии	504
П3.4 Вариант вывода математической модели неуправляемого полёта пули переменной массы при полном безветрии	513
Приложение 4	
ИЛЛЮСТРАТИВНЫЙ ПРИМЕР РАЗРАБОТКИ МЕТОДА ЛАГРАНЖЕВЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ ПО ТРУБОПРОВОДНЫМ СИСТЕМАМ ...	547

Приложение 5

ИЛЛЮСТРАТИВНЫЙ ПРИМЕР ПОСТРОЕНИЯ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ В ГАЗОПРОВОДНЫХ СЕТЯХ	556
П5.1 Постановка задачи	556
П5.2 О моделировании газовых течений в трубопроводной сети.....	557
П5.3 Формализация задачи восстановления транспортных потоков и метод её решения	561
П5.4 О критерии в сравнительном анализе полученных решений	569
П5.5 О методе настройки моделей газопроводных сетей на реальные параметры объектов моделирования.....	573

Приложение 6

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОСНОВНЫХ АСПЕКТОВ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОЛОГИИ «ТЕХНОВИС» ПРИ АНАЛИЗЕ НАДЁЖНОСТИ НАУКОЁМКИХ ПРОДУКТОВ	577
--	-----

Приложение 7

К ВОПРОСУ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ВИРТУАЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С ЦИФРОВЫМИ ДВОЙНИКАМИ НАУКОЁМКИХ ПРОДУКТОВ.....	591
П7.1 Сбор и хранение полученных результатов виртуальных экспериментов	591
П7.2 Предварительная обработка, фильтрация и сортировка собранных и сохранённых результатов виртуальных экспериментов	594
П7.3 Анализ обработанных результатов виртуальных экспериментов и численное восстановление требуемых эмпирических зависимостей.....	600
П7.4 Интерпретация достигнутых результатов виртуальных экспериментов методами численного аналитико-имитационного моделирования и математической идентификации	608
П7.5 Научное обоснование интерпретированных результатов виртуальных экспериментов.....	609
П7.6 Наглядное представление результатов виртуальных экспериментов при их обработке и изучении.....	609
П7.7 Подготовка к переносу (трансляции) полученных результатов численных опытов на реальный наукоёмкий продукт или его научно обоснованную виртуальную версию	610

Предисловие

Характерным трендом нашего времени является ускоренное превращение традиционных отраслей промышленности и сельского хозяйства в высокотехнологичные производства. При такой трансформации дальнейшее развитие предприятий и повышение их конкурентоспособности опираются на фундамент современных достижений науки, техники и технологий. Актуальность такого преобразования в нашей стране обуславливается фактическим состоянием внутреннего и внешнего рынков, дефицитом кадров, фактическим переходом мирового сообщества к новому технологическому укладу, нестабильностью внешнеполитической ситуации и т.д.

Необходимость удовлетворения быстрорастущего потребительского спроса на высокотехнологичные изделия и услуги требует создания и внедрения в эксплуатацию широкого спектра наукоёмкой продукции в предельно сжатые сроки. Как показывает повседневная практика функционирования металлургических и машиностроительных производств, выполнение данного требования приходится осуществлять в сложных условиях острой нехватки материальных, финансовых и кадровых ресурсов.

Потребность в выпуске изделий, устройств и приборов, конкурентоспособных на отечественном и мировом рынках, невозможно удовлетворить без разработки или адаптации глубоко автоматизированных технологических процессов и высокоточного оборудования с элементами интеллектуальной автоматики для их практической реализации. Поэтому к категории «наукоёмкий продукт» следует относить не только технические изделия с соответствующими параметрами, свойствами и функционалом, но и глубоко автоматизированные технологические системы, обеспечивающие их изготовление и поступление на рынок.

Важными процедурами на пути доведения наукоёмкого продукта до потребителя являются его экспериментальная отработка, размещение по месту будущей эксплуатации и наладка его функционирования в местах размещения. Сложность такого доведения, прежде всего, обусловлена значительными временными, финансовыми, материальными и кадровыми затратами на выполнение данных процедур.

Кардинального удешевления перечисленных процедур можно добиться с помощью широкого применения виртуальных испытательных стендов и полигонов для численного экспериментирования с цифровыми двойниками исследуемого продукта. При этом основной целью виртуальных экспериментов будет являться гарантированная минимизация количества и объёма натурных испытаний или пуско-наладочных работ, сопровождаемых изготовлением соответствующих опытных образцов и арендой натурных испытательных полигонов или пуско-наладочных площадок.

К тому же, ряд натурных экспериментов может характеризоваться повышенной промышленной, пожарной или экологической опасностью, что увеличивает стоимость их выполнения по причине организации и проведения мероприятий по предотвращению возможных негативных последствий для персонала, населения и окружающей среды. В то же время виртуальные эксперименты являются изначально безопасными и экологически чистыми.

При наличии в стране острого дефицита кадров особую актуальность приобретают вопросы рациональной организации и оптимального управления процессами проектирования, конструирования, изготовления, экспериментальной отработки и внедрения наукоёмких продуктов. Без учёта специфики производственных процессов их выпуска и доведения до потребителя, требующих больших интеллектуальных затрат со стороны вовлечённых в работу специалистов высшей и высокой квалификации, управление такими проектами теряет необходимую эффективность и контрольные функции. Это приводит к росту незапланированных затрат, необоснованному нарушению календар-

ных планов, затяжным конфликтам в команде разработчиков и в итоге – к полной остановке работ по проекту.

В связи с вышеизложенным, вниманию читателей предлагается научно-прикладная монография, в которой были впервые столь глубоко и детально исследованы теоретический, прикладной и организационный аспекты автоматизированного поиска, научного обоснования и практической реализации оптимальных решений сложных производственных задач создания, внедрения или эксплуатации наукоёмких продуктов. При этом поиск решений проводился в рамках требования максимально достижимой минимизации негативного влияния человеческого фактора на получаемые результаты. Это требование имеет повышенную значимость в условиях ранее отмеченного острого дефицита конструкторских, технологических и производственных кадров. Обеспечение выполнения указанного требования осуществлялось посредством автоматизированной постановки и автоматического решения комплекса специальных задач условной оптимизации с обоснованным стремлением к достижению их глобальных оптимумов.

Синергетическое сочетание перечисленных аспектов стало базисом для создания автором книги *методологии разработки и применения технологий Виртуальных Испытательных Стендов* (ВИС), получившей условное обозначение «ТехноВИС». Данная методология разрабатывалась, совершенствовалась и верифицировалась на временном отрезке с продолжительностью более 30 лет. За это время автором совместно с его учениками и коллегами было успешно решено свыше 60 уникальных производственных проектов, характеризующихся высоким барьером сложности и имеющих важное значение для предприятий различных отраслей промышленности как в Российской Федерации, так и за её пределами.

Методология «ТехноВИС» изначально была ориентирована на оперативное устранение сложных и особо сложных производственных проблем, возникающих в процессе жизненных циклов наукоёмких продуктов, посредством гибридного применения численных алгоритмов условной структурно-параметрической оптимизации с элементами искусственного интеллекта, численного аналитико-имитационного моделирования повышенной точности и совокупности цифровых двойников разных типов. До появления в обиходе отечественной и зарубежной научно-технической общественности терминов «цифровой двойник», «цифровая тень», «среда цифровых двойников» и «цифровой менеджер» их аналоги в методологии именовались компьютерными аналитическими системами, высокоточными компьютерными симуляторами, аппаратно-программными комплексами на базе технологий высокоточного компьютерного моделирования и др. Появление в 2010 году терминологического аппарата технологий цифровых двойников в значительной степени упростило изложение указанной методологии.

В рамках современного толкования методологии «ТехноВИС» цифровые двойники и цифровые тени существуют, функционируют и взаимодействуют друг с другом в специально построенной для них компьютерной среде научно обоснованной виртуальной реальности под управлением цифрового менеджера ВИС. Они моделируют с максимально достижимыми адекватностью и точностью процессы существования и управляемого динамического поведения синтезируемых, анализируемых или изучаемых наукоёмких продуктов. В рамках имитационного моделирования учитываются взаимодействия этих продуктов с возмущённой внешней средой и заданными внешними объектами в условиях воздействий ожидаемых естественных помех, возможных ошибок управления, прогнозируемых негативных и поражающих факторов.

Устраняемая производственная проблема тем или иным способом, регламентированной методологией, сводится к задаче синтеза, анализа или оценивания наукоёмкого продукта. Данные численные процедуры проводятся в глубоко автоматизированном режиме в виде постановки и решения серий однокритериальных или многокритериальных задач условной оптимизации. В процессе их решения цифровой менеджер ВИС стре-

мится получить практически значимые результаты, максимально приближенные к глобальному оптимуму. Здесь следует особо подчеркнуть, что для авторской методологии «ТехноВИС» характерна фундаментальность подхода к изучению, формализации, поиску решения и фактическому устранению возникшей производственной проблемы, а также научная обоснованность и детальная проработанность предлагаемых методов и средств её устранения.

В книге содержание методологии раскрывается от главы к главе «по спирали», т.е. эпизодически осуществляется возвращение к ранее затронутым аспектам, но на новом уровне их изучения или освещения под новым углом зрения на решаемую задачу. Такое повторение пройденного материала с обновлённых позиций способствует его ускоренному усвоению читателями. Также в процессе изложения материала автор книги старался по возможности приводить достаточно подробное вербальное описание математических и компьютерных моделей, а также методов их анализа, что значительно повысило доступность её содержания для разработчиков цифровых двойников, проектировщиков, конструкторов, технологов, испытателей и квалифицированных пользователей наукоёмких продуктов.

Всё вышеперечисленное делает предлагаемую вниманию читателей монографию актуальной на сегодняшний день и в обозримом будущем. Эту актуальность также обуславливает с одной стороны новизна и аргументированность взглядов автора на многие решаемые проблемы, а с другой стороны – многолетняя верификация предлагаемых способов устранения производственных проблем на широком спектре решённых задач, имеющих высокие уровни сложности и важности.

Хочется надеяться, что предлагаемая книга послужит дальнейшему развитию теории и практики высокоточного компьютерного моделирования в целях ускорения и удешевления процессов создания, экспериментальной отработки и доведения до потребителя отечественных наукоёмких продуктов на базе технологий цифровых двойников, искусственного интеллекта и математической оптимизации в целях нахождения практически реализуемых оптимальных решений сложных производственных задач в различных отраслях промышленности на стыке разных областей знаний.

*Заслуженный металлург Российской Федерации,
Вице-президент Российского союза промышленников и предпринимателей –
председатель Координационного совета РСПП в ПФО,
председатель Совета директоров АО «Русполимет»*

Виктор Владимирович Ключай

Нижний Новгород, сентябрь 2024 года