

Бакулин В.Н.
Малков С.Ю.
Гончаров В.В.
Ковалев В.И.

**Управление
обеспечением
стойкости сложных
технических систем**



МОСКВА
ФИЗМАТЛИТ ®

Научное издание

*БАКУЛИН Владимир Николаевич
МАЛКОВ Сергей Юрьевич
ГОНЧАРОВ Владимир Владимирович
КОВАЛЕВ Виктор Иванович*

**УПРАВЛЕНИЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕМ СТОЙКОСТИ СЛОЖНЫХ
ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

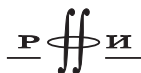
Редактор *В.Д. Боксер*
Оригинал-макет *В.Г. Марков*
Компьютерная графика: *С.Ю. Спиглазова*
Оформление переплета: *А.Ю. Алехина*

Подписано в печать 15.12.05. Формат 60×90/16. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 19. Уч.-изд. л. 20,9. Тираж 400 экз.
Заказ №

Издательская фирма «Физико-математическая литература»
МАИК «Наука/Интерпериодика»
117997, Москва, ул. Профсоюзная, 90
E-mail: fizmat@maik.ru, fmlsale@maik.ru;
<http://www.fml.ru>

Отпечатано с готовых диапозитивов
в ОАО «Чебоксарская типография № 1»
428019, г. Чебоксары, пр. И. Яковлева, 15

УДК 523.4, 629.7
ББК 39.62
Б 19



*Издание осуществлено при поддержке
Российского фонда фундаментальных
исследований по проекту 04-01-14123д*

Бакулин В. Н., Малков С. Ю., Гончаров В. В., Ковалев В. И.
Управление обеспечением стойкости сложных технических систем. — М.:
ФИЗМАТЛИТ, 2005. — 304 с. — ISBN 5-9221-0664-3.

В монографии рассмотрены методические основы создания сложных технических систем, стойких к воздействию дестабилизирующих факторов различной физической природы. На примере летательных аппаратов рассмотрена процедура расчетно-экспериментальной оценки стойкости. Показано, как на основе разработанных методов может осуществляться управление обеспечением стойкости сложных технических систем на различных этапах их разработки: при обосновании и задании требований к стойкости, в ходе проектирования и экспериментальной отработки, в процессе подтверждения заданных требований на этапе приемочных испытаний.

Книга предназначена для специалистов в области проектирования сложных технических систем, аспирантов и студентов старших курсов технических вузов.

© ФИЗМАТЛИТ, 2005

© В. Н. Бакулин, С. Ю. Малков,
В. В. Гончаров, В. И. Ковалев, 2005

ISBN 5-9221-0664-3

УПРАВЛЕНИЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕМ
СТОЙКОСТИ СЛОЖНЫХ
ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ К
ВОЗДЕЙСТВИЮ
ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ
РАЗЛИЧНОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ
ПРИРОДЫ

В.Н.БАКУЛИН, С.Ю.МАЛКОВ,
В.В.ГОНЧАРОВ, В.И.КОВАЛЕВ

Москва
2005

УДК 623.4, 629.7
ББК 39.62

В монографии рассмотрены методические основы создания сложных технических систем, стойких к воздействию дестабилизирующих факторов различной физической природы. На примере летательных аппаратов рассмотрена процедура расчетно-экспериментальной оценки стойкости. Показано, как на основе разработанных методов может осуществляться управление обеспечением стойкости сложных технических систем на различных этапах их разработки: при обосновании и задании требований к стойкости, в ходе проектирования и экспериментальной отработки, в процессе подтверждения заданных требований на этапе приемочных испытаний.

Книга предназначена для специалистов в области проектирования сложных технических систем, аспирантов и студентов старших курсов технических вузов.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Перечень сокращений	8
Предисловие	10
Введение	12

I. МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ СОЗДАНИЕМ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ, СТОЙКИХ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ

Глава 1. Проблемы обеспечения стойкости сложных технических систем к воздействию дестабилизирующих факторов	17
--	-----------

1.1. Стойкость СТС и анализ проблем, возникающих при реали- зации мероприятий по ее обеспечению на различных этапах жизненного цикла объектов	17
1.2. Анализ научно-методических проблем в области задания и подтверждения требований к стойкости СТС	21
1.3. Цель и задачи управления обеспечением стойкости СТС . .	26

Глава 2. Методический подход к заданию и подтвер- ждению требований к количественным характеристикам стойкости при наличии неопределенностей	32
---	-----------

2.1. Анализ существующих подходов к учету неопределенно- стей при задании и подтверждении требований к характе- ристикам стойкости и надежности СТС	32
2.2. Методический подход к заданию требований к количествен- ным характеристикам стойкости	37
2.3. Методы учета неопределенностей при расчетно- экспериментальной оценке стойкости	45
2.4. Принципы организации работ по подтверждению требова- ний по стойкости при наличии неопределенностей	53

Глава 3. Методические основы учета неопределенно- стей при задании требований к стойкости СТС	57
--	-----------

3.1. Методические принципы задания требований к стойкости СТС	57
--	----

3.2. Общее содержание работ и этапы обоснования требований к количественным характеристикам стойкости	58
3.3. Неопределенности, возникающие в процессе обоснования требований по стойкости, и методы их учета для различных ситуаций	64
3.3.1. Ситуация 1: непреднамеренное воздействие факторов естественного происхождения (66). 3.3.2. Ситуация 2: преднамеренное воздействие дестабилизирующих факторов с известными характеристиками (74). 3.3.3. Ситуация 3: преднамеренное воздействие дестабилизирующих факторов с неизвестными характеристиками (81).	
Глава 4. Методические основы учета неопределенностей при подтверждении требований к стойкости СТС	85
4.1. Методические принципы подтверждения требований к стойкости СТС	85
4.2. Этапы подтверждения требований по стойкости. Особенности проведения испытаний на моделирующих установках . .	89
4.3. Неопределенности, возникающие в процессе оценки и подтверждения стойкости, и способы их учета	94
4.3.1. Неопределенности при подтверждении требований по стойкости на основе полномасштабных испытаний СТС (94). 4.3.2. Неопределенности при подтверждении требований по стойкости на основе автономных испытаний отдельных составных частей и подсистем СТС (98).	
4.4. Подтверждение требований к количественным характеристикам стойкости при наличии разного объема исходных данных	104
4.4.1. Подтверждение требований на основе полномасштабных испытаний СТС (104). 4.4.2. Подтверждение требований на основе расчетов и автономных испытаний составных частей и систем СТС (110).	
Глава 5. Особенности учета неопределенностей при оценке и подтверждении стойкости СТС	115
5.1. Оценка показателей живучести на различных этапах жизненного цикла разработки СТС	115
5.2. Особенности использования метода повышенных нагрузок для увеличения информативности зачетных испытаний . .	118
5.3. Возможности использования инженерных методов при формировании оценочной функции потери работоспособности	122
5.4. Влияние неопределенностей в оценке функции потери работоспособности объектов испытаний на достоверность подтверждения стойкости	124

5.5. Рациональное планирование мероприятий по обеспечению и подтверждению стойкости и методы оценивания результатов работ	128
---	-----

II. РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА СТОЙКОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ

Глава 6. Постановка задачи оценки стойкости	135
6.1. Элементы летательных и космических аппаратов, наиболее подверженные воздействию протонного излучения	136
6.2. Уровни характеристик протонного излучения, воздействующего на элементы летательных и космических аппаратов	142
6.2.1. Источники и уровни протонного излучения (142).	
6.2.2. Аналитический метод расчета транспортировки потоков нейтральных частиц (143).	
6.3. Механизмы поражения элементов летательных и космических аппаратов при воздействии протонного излучения . . .	148
6.4. Условия и критерии поражения элементов летательных и космических аппаратов при воздействии протонного излучения	151
6.4.1. Условия и критерии поражения жидкостных двигательных установок (151). 6.4.2. Условия и критерии поражения твердотопливных двигательных установок (153). 6.4.3. Условия и критерии поражения бортовой аппаратуры системы управления (155).	

Глава 7. Расчетно-экспериментальные методы оценки и критериальные уровни поражения (стойкости) жидкостных и твердотопливных двигательных установок при воздействии протонного излучения	156
7.1. Аналитический метод расчета энерговыделения протонного излучения в конструкционных материалах и цилиндрических оболочечных конструкциях с учетом его начальной моноэнергетичности	157
7.2. Численный метод расчета тепловыделения в цилиндрической многослойной конструкции твердотопливной двигательной установки при воздействии моноэнергетического протонного излучения	174

7.3. Расчетная оценка прочности корпуса твердотопливной двигательной установки при тепловом воздействии протонного излучения	188
7.4. Расчетная оценка возможности самовоспламенения топлива при тепловом воздействии протонного излучения	192
7.5. Расчетная оценка внутрибаллистических характеристик и поражения твердотопливной двигательной установки при тепловом воздействии протонного излучения	193
7.6. Расчетная оценка теплового воздействия протонного излучения на корпус топливного бака и поражения жидкостной двигательной установки	198
7.7. Численный метод расчета электрических токов и потенциалов в диэлектрической многослойной оболочечной конструкции при воздействии протонного излучения	204
7.8. Экспериментальные методы и результаты определения электрофизических характеристик диэлектрических конструкционных материалов в условиях и вне воздействия протонного излучения	217
7.9. Расчетная оценка условий возникновения электрических пробоев в корпусе твердотопливной двигательной установки	228
7.10. Расчетная оценка условий воспламенения топлива при электрическом пробое корпуса твердотопливной двигательной установки	229
7.11. Критериальные уровни поражения (стойкости) твердотопливных и жидкостных двигательных установок при воздействии протонного излучения	232
Глава 8. Расчетно-экспериментальные методы оценки и критериальные уровни поражения (стойкости) бортовой аппаратуры системы управления при воздействии протонного излучения	237
8.1. Методика экспериментального определения реакции электрорадиоизделий на воздействие протонного излучения	238
8.1.1. Состав и описание экспериментального стенда (238).	
8.1.2. Измерение параметров воздействующего на объекты испытаний протонного излучения (243).	
8.1.3. Объекты испытаний, критерии и показатели их стойкости (245).	
8.1.4. Порядок проведения испытаний (245).	
8.2. Результаты экспериментальной оценки поражающего действия протонного излучения на электрорадиоизделия аппаратуры системы управления	247
8.2.1. Определение уровней необратимых отказов электрорадиоизделий (247).	
8.2.2. Определение условий возникновения сбоев	

в электрорадиоизделиях (250). 8.2.3. Оценка воздействия протонного излучения на работоспособность стабилитронов (255).	
8.3. Экспериментальная оценка вторичных электромагнитных эффектов, возникающих при воздействии протонного излучения	255
8.3.1. Электромагнитные поля в корпусах приборов (257).	
8.3.2. Радиационно-наведенные токи и потенциалы в линиях связи (257). 8.3.3. Оценка влияния радиационно-наведенных токов и потенциалов на уровень безсбойной работы цифровых интегральных микросхем (259). 8.3.4. Оценка возможности электрических пробоев между конструкцией и электрическими цепями системы управления (261).	
8.4. Анализ результатов испытаний и экспериментальных оценок	262
8.4.1. Необратимые отказы цифровых интегральных микросхем (262). 8.4.2. Сбойные эффекты в интегральных микросхемах (263). 8.4.3. Реакция аналоговых элементов электроники на воздействие протонного излучения (264). 8.4.4. Влияние возникающих вторичных электромагнитных эффектов на поражающее действие протонного излучения (265).	
Глава 9. Критериальные уровни поражения (стойкости) летательных и космических аппаратов. Рекомендации по повышению их стойкости. Управление стойкостью	268
Приложение 1. Расчетные соотношения для оценки результатов испытаний сложных технических систем на моделирующих установках	274
Приложение 2. Методы учета неопределенностей различного типа при подтверждении требований к стойкости СТС	278
Список литературы	286

Перечень сокращений

БАСУ – бортовая аппаратура системы управления
БКС – бортовая кабельная сеть
ВВХ – внутрибаллистические характеристики
ВЭМЭ – вторичные электромагнитные эффекты
ГПО – герметизированный приборный отсек
ДВ – дестабилизирующее воздействие
ДУ – двигательная установка
ДФ – дестабилизирующий фактор
ЖКТ – жидкие компоненты топлива
ЖРД – жидкостной ракетный двигатель
ИМС – интегральные микросхемы
ИИ – ионизирующие излучения
ИСП – излучения средств поражения
ИЭТ – изделия электронной техники
КА – космический аппарат
КМ – композиционный материал
КПЭ – концентрированные потоки энергии
КС – камера сгорания
КТМ – конструктивно-технические меры
ЛА – летательный аппарат
МУ – моделирующие установки
НДС – напряженно-деформированное состояние
НИР – научно-исследовательская работа
ОКР – опытно-конструкторская работа
ПИ – протонное излучение
ПНЧ – поток нейтральных частиц
ППП – полупроводниковые приборы
ПРП – принцип распределения приоритетов
ПФ – поражающий фактор
ПЭВМ – персональная электронно-вычислительная машина
РН – ракета-носитель
РНТП – радиационно-наведенные токи и потенциалы
РНЭП – радиационно-наведенная электропроводность
РСВ – расчетные ситуации воздействия
РСлВ – расчетные случаи воздействия
РЭА – радиоэлектронная аппаратура
СВМ – синтетический волокнистый материал

СОК – силовая оболочка корпуса
СТС – сложная техническая система
СУ – система управления
ТЗ – техническое задание
ТЗП – теплозащитное покрытие
ТТ – твердое топливо
ТТЗ – тактико-техническое задание
ТО – технический облик
ТТХ – тактико-технические характеристики
ТУ – технические условия
УБР – уровень бесбойной работы
УНО – уровень необратимых отказов
ФУ – функциональный элемент
ЭВМ – электронно-вычислительная машина
ЭИБ – экспериментально-испытательная база
ЭМП – электромагнитное поле
ЭП – электропроводность
ЭМИ – электромагнитный импульс
ЭРИ – электрорадиоизделия

Предисловие

Проблема обеспечения стойкости сложных технических систем, то есть их способности сохранять нормальное функционирование в процессе и после воздействия дестабилизирующих факторов (радиационных, термосиловых, вибрационных и др.), является весьма актуальной в различных прикладных областях.

Обеспечение стойкости сложных технических систем к воздействию дестабилизирующих факторов является весьма длительным, трудоемким, многоитерационным процессом, связанным с учетом различного типа неопределенностей. Во-первых, данный процесс охватывает все основные этапы жизненного цикла системы, который может длиться десятилетия. Во-вторых, определение уровней показателей стойкости само по себе является весьма сложной задачей, существенно более сложной, чем, например, определение уровней показателей надежности. В-третьих, оценка стойкости сложной технической системы к воздействию дестабилизирующих факторов требует обширных знаний в различных научных и технических областях. Это обусловлено необходимостью определения физических механизмов воздействия дестабилизирующих факторов на объект, знания особенностей функционирования сложной технической системы, умения прогнозировать реакцию функционирующей системы на воздействие, сопровождающуюся протеканием различных по своей природе физических процессов. И, наконец, в-четвертых, оценка стойкости обычно затруднена недостаточностью необходимых для этого данных.

Кроме того, существует еще одно обстоятельство, имеющее важное прикладное значение. Оно обусловлено необходимостью заложить в проектируемую сложную техническую систему такие уровни стойкости к воздействию дестабилизирующих факторов, которые могли бы обеспечить ее безотказное функционирование на протяжении всего жизненного цикла. С другой стороны, желание обеспечить стойкость с большим запасом может повлечь негативные последствия, заключающиеся в дополнительных затратах, возможном ухудшении других характеристик системы, усложнении технологического процесса при производстве и т.п. Поэтому нахождение разумного компромисса в данном случае является насущной потребностью и требует от специалистов в этой области глубоких знаний и большого опыта.

В этом и во многих других аспектах проблемы обеспечения стойкости и надежности сложных технических систем имеют много общего.

Однако нельзя не отметить, что в научном плане оценка характеристик стойкости является более сложной задачей. Поэтому существует насущная необходимость в проведении таких исследований и их опубликования. В связи с этим вызывает удовлетворение появление книги, посвященной этой тематике, тем более, что авторы стремятся широко подойти к решению поставленных проблем, не ограничиваясь рассмотрением частных вопросов.

Книга рассчитана, в первую очередь, на специалистов, занимающихся проблемами стойкости, но также может представлять интерес и для специалистов других областей знаний. В ней с единых позиций рассмотрены проблемы междисциплинарной интеграции знаний в процессе управления обеспечением стойкости сложных технических систем к воздействию дестабилизирующих факторов различной физической природы. Поэтому книга также будет, безусловно, полезна для аспирантов и лиц, обучающихся в высших учебных заведениях по соответствующим специальностям.

Академик РАН

В.С.Авдеевский

Введение

Высокие показатели надежности и стойкости к воздействию дестабилизирующих факторов (проникающей радиации, механических ударов, импульсных электромагнитных полей и т.п.) являются необходимым качеством сложных технических систем (СТС), предназначенных для функционирования в экстремальных внешних условиях. К подобным СТС относятся, например, космическая, военная техника, аппаратура ядерных реакторов, техника МЧС и т.п. При проектировании и конструировании уникальных и дорогостоящих объектов этого типа возникают проблемы в реализации традиционных подходов к заданию и подтверждению требований по стойкости и надежности. Эти подходы основаны на представлении о том, что эксплуатационные отказы имеют вероятностную природу. На основе вероятностно-статистических подходов построены все нормативно-технические документы, касающиеся надежности таких объектов. Между тем на практике применение статистических методов к отработке характеристик стойкости сталкивается с непреодолимыми трудностями, которые обусловлены следующими обстоятельствами:

- ограниченностью знаний о возможных ситуациях воздействия и о детальными характеристиках воздействующих дестабилизирующих факторов;

- ограниченностью знаний о механизмах поражающего действия этих факторов на элементы объектов;

- невозможностью воспроизведения натуральных условий в испытаниях, поскольку испытательная база, как правило, не позволяет адекватно моделировать натурное воздействие;

- невозможностью набора представительной статистики в испытаниях в силу уникальности и высокой стоимости объектов.

Все это исключает возможность корректного определения вероятностных характеристик стойкости и делает бессодержательным задание требований в вероятностном виде. Необходимым становится решение задач:

- обоснования общей методологии задания и подтверждения требований по стойкости к уникальным объектам в условиях множественных неопределенностей;

- исследования общих системных особенностей реакции сложных технических систем на экстремальные воздействия и разработка научно обоснованных методов учета этих особенностей при задании требований к стойкости объектов;

разработки методов и математических моделей учета неопределенностей при задании и подтверждении требований по стойкости;

разработки и обоснования методов объединения разнородной информации о характеристиках объектов в целях обоснованного принятия решений в ходе их экспериментальной отработки и определения достаточности проводимых работ.

Для решения перечисленных задач следует:

1) определить взаимосвязь характеристик стойкости с другими оперативно-тактическими и техническими характеристиками объектов, на основе чего уточнить традиционные подходы к оцениванию стойкости объектов с учетом специфики их функционирования в условиях экстремальных нагрузок;

2) выявить и исследовать неопределенности различного типа (неопределенность исходных данных по условиям функционирования объектов, по характеристикам воздействующих факторов, неполнота знаний о механизмах воздействия внешних факторов на объекты, неадекватность воспроизведения реальных условий воздействия моделирующими установками, объективные ограничения на возможный объем испытаний и на качество получаемой в ходе испытаний информации и др.), возникающие в процессе оценки стойкости объектов, разработать методы их учета и минимизации;

3) исследовать малоизученные вопросы реакции сложных систем на экстремальные нагрузки, создать соответствующие математические модели;

4) разработать методы задания требований к количественным характеристикам стойкости и методы их расчетно-экспериментального подтверждения в условиях отсутствия натурных испытаний объектов на основе анализа результатов автономных испытаний подсистем на моделирующих установках;

5) разработать методический аппарат для оценки достоверности результатов определения стойкости объектов при различных планах ее отработки с учетом имеющихся неопределенностей;

6) разработать методический аппарат для оптимизации проведения расчетно-экспериментального подтверждения стойкости с учетом существующих ограничений и неопределенностей, связанных с реальными возможностями экспериментальной базы.

Основные сложности связаны с обоснованием методов принятия технических решений в условиях "гностических" неопределенностей (то есть неопределенностей, обусловленных невозможностью получения необходимой информации). В этих условиях методы, отработанные в теории надежности и основанные на теории вероятностей и математической статистике, не работают. Ключевыми понятиями становятся понятия достоверности, риска, распределения приоритетов, компенсации неопределенностей.

К настоящему времени взаимосогласованной системы задания и подтверждения требований по стойкости, адекватно учитывающей наличие "гностических" неопределенностей, еще не создано. В настоящей книге изложены некоторые результаты работ, проводимых с целью устранения данного научно-методического пробела.

Книга состоит из двух частей. В первой части изложены методические основы управления созданием СТС, стойких к воздействию дестабилизирующих факторов. По мнению авторов, управление является прерогативой заказчика СТС и осуществляется им в первую очередь посредством обоснованного задания требований к характеристикам стойкости разрабатываемой СТС на начальном этапе и проверки соответствия достигнутой стойкости заданным требованиям на заключительной стадии разработки (эта процедура обычно называется подтверждением характеристик стойкости).

Поскольку главные трудности связаны с необходимостью учета множественных неопределенностей, возникающих при задании и подтверждении требований по стойкости СТС, то основное внимание уделено именно этому вопросу. Показано, что возрастание неопределенностей обуславливает необходимость смены тактики их учета. В качестве примера рассмотрены вопросы задания требований по стойкости к:

СТС, функционирующим в условиях непреднамеренного воздействия дестабилизирующих факторов естественного происхождения;

СТС, функционирующим в условиях преднамеренного воздействия дестабилизирующих факторов с известными характеристиками;

СТС, функционирующим в условиях преднамеренного воздействия дестабилизирующих факторов с неизвестными характеристиками.

При обосновании рациональных управленческих решений со стороны заказчика учитываются затраты (издержки) на их реализацию на основе использования критерия "стоимость – эффективность".

Во второй части книги рассмотрены вопросы расчетно-экспериментальной оценки стойкости СТС к воздействию дестабилизирующих факторов. В качестве конкретного примера рассмотрено воздействие протонного излучения на летательные (самолеты, ракеты) и космические аппараты. Представлена декомпозиция задачи оценки стойкости СТС, рассмотрены различные механизмы поражающего действия первичных и вторичных полей ионизирующего излучения (ИИ) на объекты и их составные части, изложены алгоритмы определения критериев поражения чувствительных к воздействию элементов СТС. Описаны методический аппарат и экспериментально-испытательная база (ЭИБ), необходимые для проведения расчетно-экспериментальной оценки стойкости элементов СТС. Показано, как на основе полученных результатов оценки стойкости элементов СТС к воздействию дестабилизирующего фактора возможно управлять стойкостью СТС в целом.

В приложение авторами вынесены расчетные соотношения для оценки результатов испытаний СТС на моделирующих установках и методы учета неопределенностей различного типа при подтверждении требований к стойкости СТС.

При подготовке материала данной книги большую помощь авторам оказали Боев С.Г., Глухарев И.И., Гончаров В.Ф., Ишин А.Е., Ковалев С.И., Коссе Ю.В., Логинов Е.А., Любецкий И.П., Максимов М.В., Потопахин В.А., Починов Ю.Н., Харитонов П.А. Им и всем тем, кто помог выходу в свет этой книги, авторы выражают благодарность.

Авторы выражают глубокую признательность РФФИ за финансовую поддержку издания книги и проводимой научной работы.

Часть I

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
УПРАВЛЕНИЯ СОЗДАНИЕМ
СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ
СИСТЕМ, СТОЙКИХ К
ВОЗДЕЙСТВИЮ
ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ
ФАКТОРОВ

Глава 1

ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СТОЙКОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ

1.1. Стойкость СТС и анализ проблем, возникающих при реализации мероприятий по ее обеспечению на различных этапах жизненного цикла объектов

Стойкость как свойство объектов сложных технических систем (СТС) нужна для обеспечения их эффективного применения по назначению при эксплуатации в условиях действия дестабилизирующих факторов внешней среды (например, объектам военного назначения стойкость нужна для обеспечения требуемой эффективности их боевого применения в условиях противодействия противника). На эффективность применения СТС влияет множество факторов: надежность, живучесть, ремонтпригодность и т.п. Наиболее существенным образом стойкость влияет на живучесть СТС. Живучестью СТС называется их свойство выполнять свои функции в условиях дестабилизирующих воздействий внешней среды (например, живучесть объектов военного назначения проявляется в их способности сохранять свои боевые возможности в условиях противодействия противника [166]). Живучесть зависит от оперативно-тактических и технических характеристик СТС, а также от особенностей дестабилизирующих воздействий (ДВ). И то, и другое имеет случайный характер, поэтому показатели живучести являются вероятностными величинами.

Мерами повышения живучести являются: усиление защиты СТС от дестабилизирующих воздействий с помощью дополнительного введения специальных конструктивных элементов, применение активных средств защиты, влияющих на свойства внешней среды, применение алгоритмических средств защиты аппаратуры СТС от сбоев в работе и т.п. Одной из основных мер является повышение стойкости элементов СТС к воздействию дестабилизирующих факторов среды.

Работы по обеспечению стойкости проводятся на всех этапах жизненного цикла СТС. Жизненный цикл, как правило, включает в себя следующие этапы:

проведение научно-исследовательских работ (в том числе фундаментально-поисковых и проектно-поисковых);
разработка аванпроекта (технического предложения);
разработка эскизного проекта;
разработка рабочей документации на опытные изделия, их изготовление, проведение предварительных испытаний;
приемочные испытания;
серийное производство и принятие в эксплуатацию;
эксплуатация;
снятие с эксплуатации и утилизация.

Основной целью работ по стойкости на ранних этапах жизненного цикла (этапы НИР, разработки аванпроекта) является обоснование требований по стойкости, задаваемых в тактико-техническом задании (ТТЗ) на изделие. В научно-исследовательских работах проводится исследование возможностей появления дестабилизирующих воздействий при штатной эксплуатации СТС, определяются (или уточняются) характеристики дестабилизирующих факторов в различных условиях воздействия, исследуются механизмы и особенности поражающего действия ДФ на различных этапах функционирования СТС, определяются возможные пути и способы обеспечения стойкости, методы защиты, достижимые уровни стойкости. На основе проведенных НИР формируется ТТЗ на аванпроекты, где требования по стойкости задаются в концептуальном, проблемно-ориентированном виде, исходя из целевого назначения СТС и представлений о видах и характеристиках возможных дестабилизирующих воздействий.

В аванпроекте разработчик системы проводит проработку различных вариантов СТС и его составных частей, в частности, различных вариантов обеспечения требуемых стойкости и живучести, анализирует возможные конструктивные, схемно-технические решения и другие защитные мероприятия, проводит оценку возможностей и требуемых мощностей экспериментальной (испытательной) базы по отработке стойкости, определяет перечень расчетно-теоретических и экспериментальных работ, которые необходимо провести на этапах эскизного проектирования для подтверждения технической возможности внедрения в изделия новых достижений науки и техники по обеспечению стойкости. На основании материалов аванпроекта заказчик выбирает базовый вариант и формирует ТТЗ на разработку СТС, в который включаются требования к стойкости.

Основной целью работ по стойкости на этапе эскизного проектирования является комплексное обоснование технических и технологических решений по обеспечению заданных требований по стойкости для выбранного варианта технического облика СТС. На этом этапе разработчик проводит расчетные и экспериментальные (в основном для обоснования методик расчета и получения данных по характеристикам используемых новых материалов) работы по оценке стойкости.

По результатам проведенных работ в эскизном проекте помещаются материалы по техническому описанию и обоснованию выбранного варианта обеспечения стойкости (включая обоснование технических, схемных решений, выбранных материалов защитных экранов и покрытий, алгоритмов функционирования и т.п.), по оценке стойкости, а также живучести и эффективности применения изделия.

На этапе технического проектирования и разработки опытных образцов проводится отработка стойкости СТС и их подсистем и подготовка к приемочным испытаниям. На основании результатов отработочных испытаний делается заключение о готовности к этапу приемочных испытаний, в ходе которых осуществляется подтверждение требований по стойкости.

В ходе серийного производства и эксплуатации проводится контроль характеристик, влияющих на стойкость СТС, и – при необходимости – проводятся выборочные контрольные испытания.

В ходе работ по обеспечению стойкости необходимо решить ряд проблем.

На **начальных стадиях** создания СТС основные проблемы связаны с определением необходимой номенклатуры задаваемых требований и с обоснованием количественных характеристик стойкости. Трудности обусловлены неопределенностями в выборе типовых ситуаций дестабилизации СТС, сложным характером воздействия дестабилизирующих факторов на СТС и их подсистемы, сложностями в определении достаточности формируемых требований по стойкости для обеспечения необходимой живучести СТС.

На **завершающих стадиях** создания СТС основные проблемы связаны с определением достаточности проводимых мероприятий для подтверждения заданных требований по стойкости. Трудности обусловлены отсутствием возможности адекватного воспроизведения натурального воздействия дестабилизирующих факторов с помощью моделирующих установок, высокой стоимостью испытаний, приводящей к невозможности достижения необходимой достоверности подтверждения путем набора экспериментальной статистики.

До последнего времени наиболее распространенной была следующая схема решения этих проблем. **Требования по стойкости** в ТТЗ задавались в виде амплитудных значений воздействия дестабилизирующих факторов (ДФ), оцененных для наиболее неблагоприятных ситуаций. Эти значения являлись количественной мерой задаваемых уровней стойкости, причем учет возможного усиления поражающих эффектов при комплексном и многоразовом воздействии ДФ осуществлялся путем повышения задаваемых уровней стойкости. Соответствующие коэффициенты запаса определялись эвристическим путем для каждого дестабилизирующего фактора. В условиях недостатка знаний о механизмах поражающего действия ДФ основным ориентиром при выборе коэффициентов запаса была техническая дости-

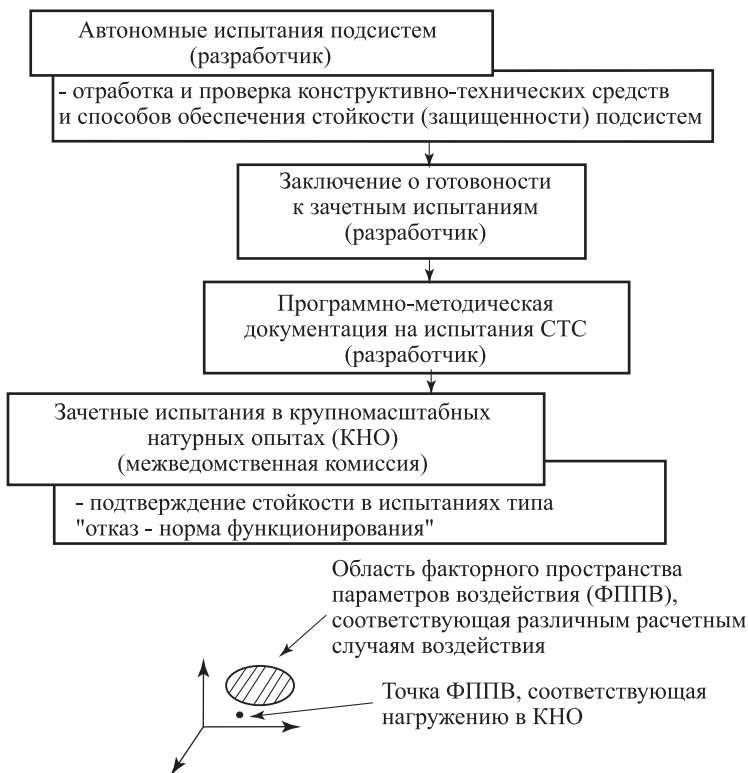


Рис. 1.1. Блок-схема, иллюстрирующая систему подтверждения стойкости с использованием крупномасштабных натурных опытов.

жимость задаваемого уровня стойкости, определяемая развитием соответствующих технологий. Для разных ДФ коэффициенты запаса составляли от 1,2 до 10 и более раз.

Основой **системы подтверждения стойкости** были зачетные испытания объектов в целом в единичных крупномасштабных натурных опытах (в соответствии с методом натурных испытаний [117, 162]), которые проводились по биномиальному плану типа "отказ – норма функционирования". Вследствие невозможности адекватного математического моделирования функционирования элементов СТС в условиях воздействия испытываемый объект воспринимался как "черный ящик", и основной задачей при организации экспериментального подтверждения являлось наиболее **адекватное воспроизведение** требуемого воздействия (при этом автономные испытания подсистем имели чисто отработочный характер и их результаты использовались фактически лишь при подготовке заключения о готовности

к зачетным испытаниям). Блок-схема существовавшей до настоящего времени системы подтверждения стойкости представлена на рис.1.1.

Реально реализация метода натурных испытаний для подтверждения стойкости дорогостоящих СТС возможна лишь в существенно урезанном виде без полного набора требуемой статистики, что явилось причиной возникновения таких недостатков, как малая информативность испытаний, отсутствие возможности экстраполировать их результаты на другие расчетные случаи воздействия, невозможность получения информации о фактическом уровне стойкости, низкая достоверность результатов вследствие единичности нагружений и т.п. Кроме того, само нагружение СТС в крупномасштабных опытах, как правило, лишь частично соответствовало натурному воздействию. Вопросы о достаточности испытаний как бы выносились за скобки обсуждения в предположении, что эта проблема решается за счет того, что требования по стойкости были заданы с учетом коэффициентов запаса. Все это приводило к тому, что испытания, как правило, имели не доказательный, а демонстрационный характер, то есть в случае положительного исхода демонстрировали отсутствие явных ошибок при конструировании СТС.

Тенденцией последнего времени из-за возрастающих финансовых и технических ограничений является снижение возможностей проведения крупномасштабных натурных опытов, являвшихся основой подтверждения стойкости. Это повлекло за собой необходимость кардинального пересмотра всей системы обеспечения стойкости и развития расчетно-экспериментальных методов подтверждения с использованием результатов испытаний отдельных систем объектов на моделирующих установках, параметры которых существенно отличаются от натурных нагрузок.

1.2. Анализ научно-методических проблем в области задания и подтверждения требований к стойкости СТС

Систематические исследования, посвященные научно-методическим вопросам задания и подтверждения требований по стойкости, ведутся уже несколько десятилетий. Они были инициированы работами по обеспечению защищенности объектов вооружения и военной техники от действия ядерного оружия. Основное внимание в них уделялось исследованию возможных сценариев применения ядерного оружия потенциальным противником, определению характеристик поражающих факторов (ПФ) с учетом их взаимодействия со средой распространения и с объектом поражения, изучению реакции объектов на воздействие, определению критериев поражения, разработке методов моделирования ПФ средствами испытательных

стендов, обоснованию перспектив развития испытательной базы страны ([115, 135–138, 179, 180] и др.). Активно исследовались также вопросы обеспечения стойкости гражданских и военных объектов к воздействию факторов естественного происхождения – к молниевому воздействию (для наземных объектов), к воздействию факторов космического пространства (для космических аппаратов) и др.

Общая методология задания и подтверждения требований по стойкости, использовавшаяся в данных исследованиях, базировалась на положениях теории надежности. Это обусловлено смысловой близостью данных понятий. Действительно, обычно стойкость определяется как свойство объектов, комплектующих элементов (материалов) выполнять свои функции и сохранять параметры в пределах установленных норм во время и после действия дестабилизирующих факторов. По своей сути данное определение практически совпадает с определением надежности: "Надежность – свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования" [116]. Таким образом, на основе этих определений можно сделать вывод о том, что стойкость – это надежность в условиях воздействия. Такой подход является широко распространенным. Например, в фундаментальной работе по стойкости [115] сказано: "Имеется явная аналогия между показателями безотказности (одной из характеристик надежности) и радиационной (электромагнитной) стойкости. Это дает основание для использования при решении задач теории стойкости хорошо развитого понятийного и математического аппарата теории надежности и сосредоточения основных усилий исследователей на учете особенностей механизмов отказов, вызываемых воздействием ИИ (ЭМИ – электромагнитного импульса)".

В целом, такая позиция имеет свои основания, однако, как показывает практика, буквальное применение методов теории надежности к решению задач стойкости не дает желаемого результата.

Чтобы лучше понять причины возникающих сложностей, необходимо уточнить специфику понятия "стойкость", которая определяется тесной связью стойкости с живучестью СТС. Дело в том, что в отличие от большинства других свойств и характеристик, влияющих на эффективность выполнения СТС своих функций, живучесть не является по сути дела собственной характеристикой СТС, так как она зависит не только от внутренних особенностей объекта, но и в существенной степени от внешних условий функционирования (например, для военных объектов – от способов противодействия противника). Можно говорить: "военная техника имеет надежность такую-то", но бессмысленно говорить: "военная техника имеет живучесть такую-то", если не добавлять "в таких-то условиях воздействия противни-

ка". Требования к живучести (а значит и к стойкости), меры по ее обеспечению напрямую зависят от развития вооружений противника и способов их применения, что вносит особые трудности в разработку таких требований и мер. Именно зависимость от способов противодействия противника является главным фактором, определяющим отличие стойкости от надежности военных объектов. Применение противником новых средств поражения или даже просто изменение тактики использования имеющихся средств может существенно повлиять на уязвимость военной техники и превратить стойкие объекты в нестойкие. Аналогичная ситуация складывается и в отношении гражданских объектов, функционирующих в условиях дестабилизирующих воздействий. Перейдем к более детальному анализу существующих методов задания и подтверждения требований по стойкости.

Методы задания требований по стойкости.

Существующие методы задания требований к характеристикам стойкости основаны на подходах, развитых в теории надежности [171]. Данные подходы предполагают создание определенных запасов прочности, для обоснования которых используется соотношение "нагрузка – прочность" [84], характеризующее предполагаемое воздействие дестабилизирующих факторов на СТС (нагрузка) и реакцию СТС на это воздействие для разных ситуаций (прочность). Характеристики нагрузки и прочности выражаются в виде вероятностных распределений, отражающих разброс параметров воздействия и реакции. Как правило, нижняя граница поля запасов выбирается по "правилу трех сигм" (то есть для вероятности непревышения 0,997 при нормальном распределении нагрузки) применительно к максимально напряженной ситуации воздействия. Поскольку точность определения нагрузок всегда ограничена, в целях компенсации "остаточного рассеивания запасов и элемента незнания" [135] используются эвристические коэффициенты безопасности, на которые умножаются значения нагрузок при задании требований. При этом обычно считается, что разброс параметров реакции слабо влияет на задаваемые требования. Это является справедливым при малых дисперсиях функции прочности. В целом, данный подход дает удовлетворительные результаты при отработке стойкости к механическому воздействию вследствие наличия хорошо развитых методов оценки прочности конструкций в строительной механике, позволяющих достаточно точно определять дисперсии распределений для стандартных ситуаций воздействия. При попытке применения такого подхода к заданию требований по стойкости, например, к радиационному или электромагнитному воздействию, возникают сложности из-за отсутствия надежных сведений о соответствующих функциях распределения. В общем случае методические сложности использования соотношения "нагрузка – прочность" при задании требований по стойкости связаны с необходимостью корректного учета следующих неопределенностей:

слабой предсказуемости возникновения критических ситуаций (для гражданских объектов);

ограниченности сведений о стратегии противодействия противника (для военных объектов);

ограниченности знаний о дестабилизирующих факторах и о их детальных характеристиках, что обусловлено сложным характером их взаимодействия со средой распространения и объектом поражения;

ограниченности знаний о механизмах поражающего действия дестабилизирующих факторов на элементы СТС;

единичности (или невозможности проведения) полномасштабных испытаний СТС в натурных условиях в ходе ее разработки.

Наличие данных неопределенностей приводит к "размытости" функций распределения нагрузки и реакции, к необходимости отказа от предположения о гауссовском виде этих функций, к необоснованному завышению требований в случае формального использования "правила трех сигм". В этих условиях коэффициенты запаса приходилось задавать, по существу, эвристически: основным ориентиром при их выборе была техническая достижимость задаваемых уровней стойкости. Такой метод компенсации неопределенностей при задании требований по стойкости был вынужденной мерой, поскольку он обладает серьезными недостатками: вследствие эвристического характера выбора коэффициентов запаса теряется функциональная связь между показателями стойкости и живучести, а также возникает риск существенного завышения требований, влекущего за собой неоправданно высокие материальные и финансовые затраты на их выполнение. Кроме того, отсутствие требований к достоверности подтверждения заданных уровней стойкости не позволяет обосновывать необходимый объем экспериментальной отработки СТС на моделирующих установках, что становится чрезвычайно важной проблемой в условиях отсутствия полномасштабных натурных испытаний.

Методы подтверждения требований по стойкости.

Существующая методология подтверждения требований по стойкости основывается на теории надежности, однако, как показывает практика, корректное использование строгих статистических методов контроля качества [117, 118, 162] оказывается невозможным. Это связано с неосуществимостью:

адекватного воспроизведения натурального воздействия дестабилизирующих факторов средствами испытательных стендов;

воспроизведения реальных условий функционирования объектов в условиях воздействия (например, условий полета космических аппаратов на околоземной орбите);

набора достаточной статистики в испытаниях и т.д.

Наличие неопределенностей, связанных с этими факторами, остро ставит вопрос о достоверности и достаточном объеме испытаний при

экспериментальной оценке стойкости. Методические трудности по учету этих неопределенностей стали причиной внутренних противоречий в нормативных документах, регламентирующих проведение работ по подтверждению стойкости.

С одной стороны, существуют общие требования к достоверности подтверждения вероятностных характеристик объектов военного и гражданского назначения в приемочных испытаниях [117], в соответствии с которыми реализуемый метод испытаний должен обеспечивать проверку соответствия объекта требованиям ТТЗ и оценку его возможностей в условиях, максимально приближенных к реальной эксплуатации, с необходимой точностью и достоверностью. Рекомендуется использовать биномиальную безотказную схему проведения испытаний. Точность оценки соответствия вероятностной характеристики заданным требованиям должна характеризоваться доверительным интервалом (двусторонним или односторонним) и определяемой по результатам испытаний доверительной вероятностью попадания истинного значения характеристики в указанный интервал. Таким образом, достоверность подтверждения отождествляется со значением доверительной вероятности, для которой рекомендуется выбирать значение в интервале 0,9 – 0,99. При этом считается, что ширина доверительного интервала должна задаваться заказчиком в каждом конкретном случае в зависимости от цели проведения оценки.

С другой стороны, в нормативных документах, регламентирующих методы контроля и испытаний по подтверждению характеристик стойкости СТС, требования к достоверности подтверждения не сформулированы несмотря на то, что такие требования являются основой планирования испытаний. Сложилась ситуация, когда показатели стойкости комплектующих элементов и материалов рассматриваются как вероятностные характеристики и для их оценки используется обширный арсенал вероятностно-статистических методов, в то время как в отношении СТС в целом вероятностная природа стойкостных характеристик как бы выносится за скобки и, фактически, не обсуждается. Фактически, существующие нормативные документы, касающиеся стойкости СТС, имеют общеметодический характер, а принятие решений по конкретным методическим вопросам отдают на усмотрение заказчика СТС. Вопросы снижения статистической неопределенности в условиях ограниченного числа испытываемых объектов каждый раз встают при проведении отработочных и зачетных испытаний, однако в отсутствие единых методических подходов и нормативно установленных критериев эти вопросы решаются в каждом случае по-разному либо вообще выносятся за рамки вопросов, решаемых в испытаниях.

В последние годы проводились исследования [101, 106, 136, 137, 153], посвященные обоснованию методов расчетно-экспериментального подтверждения требований по стойкости на основе использования принципа распределения приоритетов для

учета неопределенностей, возникающих при оценке стойкости. Эти методы направлены на:

- обоснование нагрузок при проведении испытаний СТС на моделирующих установках с учетом отличия испытательного и натурного воздействия;

- повышение информативности зачетных испытаний за счет использования предварительной информации о стойкости объектов;

- обоснование способов подтверждения стойкости объектов на основе автономных испытаний их систем и элементов.

Данные методы являются продуктивными, они основываются на понятии риска, однако к настоящему времени они еще не сведены в единую взаимосвязанную систему обоснования и подтверждения требований по стойкости.

Таким образом, в отсутствии отработанной методологии по учету имеющихся неопределенностей требования задаются в виде уровней стойкости с учетом различных коэффициентов запаса для каждого воздействующего фактора, что делает их разбалансированными и не позволяет установить их однозначную связь с показателями живучести. Отсутствие обоснованных требований к подтверждению стойкости вносит неопределенность в планирование зачетных испытаний, делает невозможным оценку достаточности проводимых работ и количественный учет имеющихся результатов предварительных испытаний и расчетных оценок на зачетном этапе подтверждения требований. На основании существующих методов невозможно проводить обоснованную оптимизацию использования имеющихся материальных и финансовых ресурсов при проведении работ по обеспечению и подтверждению стойкости.

1.3. Цель и задачи управления обеспечением стойкости СТС

Управление созданием стойких СТС осуществляется заказчиком посредством:

- задания требований к характеристикам стойкости,
- сопровождения работ по ее обеспечению,
- контроля достаточности мероприятий по расчетно-экспериментальному подтверждению заданных требований.

Наиболее ответственными в организационном и методическом плане являются начальный (задание требований) и завершающий (подтверждение требований) этапы обработки стойкости. Проведенный выше анализ практических и научно-методических проблем в области обеспечения стойкости СТС показывает, что методы задания и подтверждения требований по стойкости должны:

- учитывать разнородные неопределенности, связанные с отсутствием исчерпывающей информации о возможных ситуациях воздействия

дестабилизирующих факторов и об ожидаемых характеристиках этого воздействия, с ограниченными возможностями экспериментальной базы, с невозможностью проведения статистических испытаний для контроля характеристик стойкости и т.п.;

позволять обоснованно планировать расчетно-экспериментальные работы, направленные на обеспечение стойкости, и оценивать достаточность проводимых мероприятий в ходе их выполнения;

связывать показатели стойкости с показателями живучести и позволять оценивать достигнутый уровень стойкости и живучести в ходе экспериментальной отработки;

позволять учитывать весь объем проводимых работ по оценке стойкости (включая расчеты, автономные испытания подсистем СТС и т.п.) на этапе подтверждения с целью повышения достоверности оценки и снижения необходимых объемов зачетных испытаний;

позволять оптимизировать работы по обеспечению и подтверждению стойкости с целью снижения материальных и финансовых затрат.

Основной сложностью обоснования этих методов является наличие множественных **неопределенностей**, связанных прежде всего с ограниченностью сведений о возможных ситуациях воздействия дестабилизирующих факторов и о их характеристиках, с недостаточной изученностью механизмов поражения, с ограничениями на возможный объем испытаний и на качество получаемой в ходе испытаний информации. Понятие "неопределенность" используется в теории принятия решений для обозначения информационной ситуации, при которой объем и качество имеющихся данных не достаточны для выбора **оптимального** решения из множества возможных альтернатив (в нашем случае должны быть приняты решения о предъявляемых к СТС требованиях по стойкости и об объемах испытаний, достаточных для подтверждения этих требований). В соответствии с этим должны быть решены следующие основные задачи:

разработка и обоснование критериев принятия **рациональных** решений, позволяющих в условиях имеющихся неопределенностей и ограничений минимизировать риск того, что создаваемые СТС будут обладать недостаточной стойкостью;

обоснование методов задания и подтверждения требований к СТС по стойкости к дестабилизирующим воздействиям на основе разработанных процедур принятия рациональных решений.

В общем виде задача принятия решений в условиях неопределенностей формулируется следующим образом.

Пусть органу управления (заказчику СТС) необходимо принять одно из множества $\Phi = \{\varphi_1, \dots, \varphi_m\}$ возможных решений. Пусть внешние условия могут принимать множество $\Theta = \{\vartheta_1, \dots, \vartheta_n\}$ взаимоисключающих состояний, причем неизвестно, какое именно состояние будет реализовано в реальных условиях эксплуатации СТС. Пусть