

УДК 004.94:621.6

Г. В. Табунщик, канд. техн. наук,
Е. В. Шитикова

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ИСПЫТАНИЙ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК НАЗЕМНОГО ПРИМЕНЕНИЯ

***Аннотация.** Работа посвящена решению задачи формального представления процесса испытаний, в частности газотурбинных установок наземного применения. Рассмотрены различные подходы и предложена базовая модель процесса испытаний ГТУ НП, которая позволяет описать процесс испытаний ГТУ НП и выделить подмножество результатов испытаний. Предложенная базовая модель была расширена и модифицирована для процесса исследовательских испытаний ГТУ НП.*

***Ключевые слова:** газотурбинные установки, процесс испытаний, формализация, модель, диаграммы состояний*

G. Tabunshchyyk, PhD,
Y. Shytikova

FORMALIZATION OF THE GAS TURBIN UNITS TESTS PROCESS

***Abstract.** The article deals with the problem of the formal submission of the GTU tests process. Authors examined the different approaches and propose the basic formal model of GTU tests process. This model allows us to describe the GTU tests process and select the test results subset. The basic model is extended and modified to the GTU research test process.*

***Keywords:** gas turbine unit, test process, formalization, model, state diagrams*

Г. В. Табунщик, канд. техн. наук,
О. В. Шитикова

ФОРМАЛІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ВИПРОБУВАНЬ ГАЗОТУРБІННИХ УСТАНОВОК НАЗЕМНОГО ВИКОРИСТАННЯ

***Анотація.** Робота присвячена вирішенню задачі формального представлення процесу випробувань, зокрема газотурбінних установок наземного використання. Розглянуто різні підходи і запропоновано базова модель процесу випробувань ГТУ НВ, яка дозволяє описати процес випробувань ГТУ НВ і виділити підмножину результатів випробувань. Запропонована базова модель була розширена та модифікована для процесу дослідних випробувань ГТУ НВ.*

***Ключові слова:** газотурбінні установки, процес випробувань, формалізація, модель, діаграми станів*

Введение

Газотурбинные установки наземного применения (ГТУ НП) являются сложными техническими системами, для достижения хороших эксплуатационных характеристик которых с высокой степенью надежности и безопасности огромную роль играют испытания. В свою очередь процесс испытаний ГТУ НП, как один из этапов жизненного цикла рассматриваемых установок, является комплексным процессом, сложность которого связана с большим объемом решаемых задач, многоуровневостью этапов испытаний, неоднородностью информационных потоков, многообразием оцениваемых характеристик, большими материальными затратами и требует высокой точности обработки результатов [1].

Для решения перечисленных проблем целесообразно применение систем автоматизации, которые смогли бы значительно повысить качество контролируемой информации, оперативность ее получения, удобство и простоту анализа результатов испытаний, а также снизить риски учета ошибочной информации, связанные с человеческим фактором. Поэтому разработка подобных систем является достаточно актуальной задачей. Автоматизированные системы поддержки принятия решения являются эффективным средством управления различными технологическими процессами, к которым относится и процесс испытаний ГТУ НП.

Для автоматизации процесса испытаний ГТУ НП необходимо провести формализацию данного процесса, эффективными методами которой может служить моделирование.

© Шитикова Е.В., Табунщик Г.В., 2015

Постановка задачи

Испытания реализуются на различных стадиях жизненного цикла сложной технической системы и могут быть описаны строгой структурой [2], основой которой служить модель, характеризующая существенные свойства и состояния данного процесса, а также взаимосвязь с внешним миром [3].

Реализация обмена данными в рамках функциональных задач автоматизированной системы поддержки процесса испытаний ГТУ НП требует формального описания компонентов, позволяющих осуществлять управление результатами испытаний.

Создание такой автоматизированной системы требует построения полной и адекватной модели процесса испытаний ГТУ НП, которая бы опиралась на совокупность информационных параметров, которые ее описывают.

Поэтому целью данной работы является формализация процесса испытаний ГТУ НП.

Традиционной формой представления технологических знаний является словесно-текстовый подход, гибкость которого заключается в выражении любых особенностей процесса речевыми средствами. Отсюда следует и основной недостаток – слабая формализация описаний.

Процедурно-табличный подход (технологические, маршрутные, операционные карты) предоставляет хороший уровень структурированности технологических знаний, но при этом имеет слабые возможности для отражения ветвлений технологических процессов [4].

Блочно-графическое представление (методологии IDEF, EPC (eEPC), UML, BPMN и др.) достаточно наглядно описывает технологические процессы, однако к недостаткам можно отнести высокую долю зависимости от выразительности средств в форме отображения [5]. Данный подход достаточно эффективен на начальном этапе моделирования при декомпозиции исследуемого процесса.

Кибернетический подход рассматривает объект исследования, в нашем случае процесс испытаний, как «черный ящик», где исследователю доступна лишь входная и выходная информация, а внутреннее устройство может быть и неизвестно. Изменяя входные влияния можно наблюдать за изменени-

ем выходов. Данный подход широко используют в тех случаях, когда для исследования важно получить информацию о поведении системы, а не о ее строении [3].

Системная динамика – это сумма принципов и методов анализа динамических управляемых систем, которые предполагают наличие обратной связи. Данный подход предоставляет возможность построения моделей с помощью причинно-следственных диаграмм и схем вида «фонд-поток». Существенное ограничение данного подхода состоит в том, что построенные модели не отражают возможного изменения структуры взаимодействия между ее подсистемами и элементами. Другим ограничением применения системной динамики является представление непрерывных процессов, позволяющих описывать обратные связи с помощью дифференцированных уравнений, что предполагает описание с помощью непрерывных функций. Это не позволяет системной динамике моделировать дискретно-событийные процессы, а в случае применения данной методологии к дискретным системам приводит к неадекватным выводам [6].

Согласно теоретико-множественному подходу [7] формальная модель динамической системы имеет следующий вид:

$$M_{II} = \langle T, X, Y, Z, z(t), P \rangle, \quad (1)$$

где T – модельное время; X, Y – множество соответственно входных и выходных переменных; Z – пространство состояний модели; $z(t)$ – функция состояний, $t \in T$; P – множество процессов, которое задается как множество упорядоченных во времени пар элементов $\langle x, z[\tau, t] \rangle$, где $t \in T$, а τ – начальный момент модельного времени для процесса $p \in P$.

Такое определение задает модель системы в виде схемы процессов, в которой множества процессов могут существовать параллельно в модельном времени T , что делает данный подход наиболее привлекательным для формализации процесса испытаний ГТУ НП.

В данной статье решается задача модификации динамической системы с учетом свойств и ограничений, характерных для процесса испытаний ГТУ НП.

Разработка базовой модели процесса

испытаний ГТУ НП

Для формирования множества параметров была проведена декомпозиция процесса испытаний [8], которая позволила выделить основные этапы испытаний, их участников и потоки данных между ними.

На основании данной декомпозиции формула (1) может быть модифицирована и представлена в следующем виде:

$$M_{II} = \langle T, O, R, X, Y, Z, U, D \rangle \quad (2)$$

где T – множество этапов процесса испытаний, отражающее дискретное изменение модельного времени; O – множество объектов, функционирующих на каждом из этапов испытаний; R – множество связей между объектами; X, Y – множество соответственно входных и выходных параметров; Z – множество состояний объектов, изменение которых происходит по выполнению некоторого условия u из множества U ; U – множество условий, выполнение которых влечет за собой смену состояний объектов; D – множество действий, выполняемых в момент модельного времени t над объектом $o \in O$, находящемся в состоянии $z \in Z$ пока не будет достигнуто условие $u \in U$.

Задается как множество упорядоченных элементов:

$$d = \langle t, o, z, \tilde{X}, u, M'_R \rangle \quad (3)$$

где $\tilde{X}, \tilde{X} \in X$ – подмножество, включающее некоторое количество входных параметров x из множества X , необходимых для выполнения действия d ;

M'_R – срез гиперкуба модели рисков ГТУ НП M_R [9], содержащий наборы атрибутов измерений, в состав которых входят критичные риски.

К ним относятся как риски самого действия, приводящие к негативным последствиям, так и риски которые могут влиять на выполнение данного действия.

Включение модели критичных рисков в базовую модель процесса испытаний позволяет управлять рисками данного процесса в условиях ограниченных ресурсов, а также корректировать модель рисков в зависимости от изменяющихся условий.

Модификация базовой модели процес-

са испытаний ГТУ НП для исследовательских испытаний

Среди различных видов испытаний немаловажное значение имеет процесс исследовательских испытаний, основное содержание которого составляют многочисленные и разнообразные испытания работоспособности и взаимодействия новых систем и узлов.

В результате реинжиниринга в процесс исследовательских испытаний было внесено разделение на логические уровни [10], что позволило разбить данный процесс на несколько отдельных процессов (по числу логических уровней) со своими объектами, связями состояниями и действиями над ними. Тогда будет справедлива запись:

$$M_{II} = M_{II1} \cap M_{II2} \cap \dots \cap M_{II_n}, \quad (4)$$

где n – число логических уровней процесса испытаний.

Для определения множества состояний Z и множества условий U , выполнение которых влечет изменение состояний системы, а также множества действий D были построены диаграммы состояний ГТУ НП в процессе испытаний. Некоторые из них представлены на рисунках 1; 2 и 3.

На рис. 2 представлена диаграмма состояний составного состояния «При испытаниях» с двумя вложенными состояниями. Число вложенных состояний было выбрано условно и отражает количество логических уровней процесса исследовательских испытаний. При изменении условий проведения испытаний их количество может быть изменено.

Выделим некое подмножество Z_{\square} , такое что $Z_{\square} \in Z$, которое будет содержать все состояния, отраженные на диаграмме рисунка 3. Тогда подмножество U_{\square} , $U_{\square} \in U$, будет состоять из условий, выполнение которых влечет изменение состояний Z_{\square} или смену действий внутри одного состояния. При этом действия из подмножества D_{\square} , $D_{\square} \in D$, будут отражать деятельность как внутри одного состояния, так и при переходах, что найдет свое отражение в модификации формулы (3), которая примет вид:

$$d = \langle t, o, z, \tilde{X}, u, M'_R, v \rangle, \quad (5)$$

где $v, v \in V$ – элемент множества V , содержащего фиксированные виды действий.

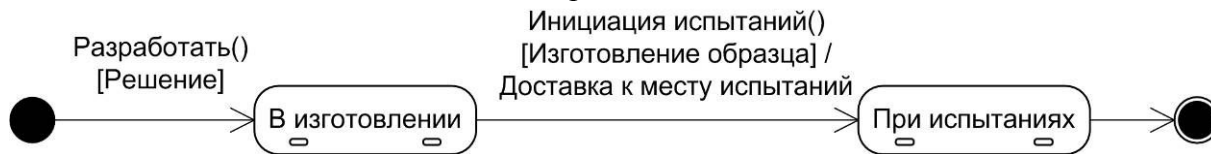


Рис. 1. Главная диаграмма состояний ГТУ НП в процессе испытаний

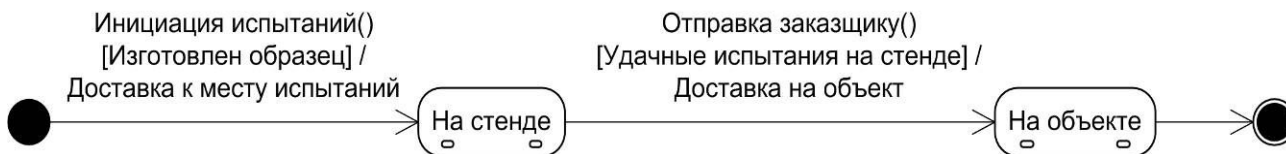


Рис. 2. Диаграмма вложенных состояний составного состояния «При испытаниях»



Рис. 3. Диаграмма вложенных состояний составного состояния «На стенде»

При конкретизации подмножества условий U_{\square} было отмечено, что для состояний «Испытания» и «Сдача» данное множество будет содержать допустимые значения параметров работы объекта испытаний. Тогда как подмножество Y_{\square} , $Y_{\square} \in Y$, фактические значения параметров работы, получаемые в ходе испытаний. Поэтому $y_{\square_i} \in u_{\square_i}$ будет свидетельствовать об успешном ведении процесса испытаний и служить сигналом для смены состояния.

Как видно на рис. 3 все вложенные состояния содержат действия по сохранению результатов работы объекта испытаний, что

подтверждает необходимость, а главное актуальность, сбора и накопления информации на протяжении всего процесса испытаний. Поэтому Y_{\square} будет подмножеством результатов испытаний, которое подлежит обработке, анализу и учету. А U_{\square} – подмножество условий, служащее основой для принятия решений на каждом из этапов испытаний.

Данный подход подтвердил свою эффективность при проведении комплексных исследовательских испытаний газоперекачивающего агрегата производства АО «Мотор Сич», что позволило уменьшить время и затраты на доработку за счет исключения вре-

мени и затрат на перевозку образца с места эксплуатации на завод и обратно [10].

Выводы

В ходе работы была получена базовая модель процесса испытаний ГТУ НП, в которую, в отличие от существующей модели динамических систем, введены объекты испытаний и отношения между ними, а также множество действий, содержащее вложенную модель критичных рисков, что позволяет описать процесс испытаний ГТУ НП и выделить подмножество результатов испытаний.

Для процесса исследовательских испытаний ГТУ НП базовая модель была расширена за счет введения логических уровней, что позволило описать данный процесс при постоянно изменяющихся условиях.

Для определения составляющих модели разработаны диаграммы состояний процесса исследовательских испытаний, на основе которых базовая модель была модифицирована введением множества видов действий.

Практическая ценность данной работы заключается в том, что полученные модели лягут в основу представления данных процесса испытаний ГТУ НП при разработке системы поддержки принятия решений.

Список использованной литературы

1. Марчуков Е. Ю. Испытания и обеспечение надежности авиационных двигателей и энергетических установок: Учебник для вузов / Е. Ю. Марчуков, И. И. Онищик, В. Б. Рувовский и др.: под ред. И. И. Онищика. – Изд. 2-е, исп. и доп. – М.: Изд-во МАИ. – 2004. – 336 с.

2. Александровская Л. Н. Теоретические основы испытаний и экспериментальная отработка сложных технических систем: учеб. пособие / Л. Н. Александровская, В. И. Круглов, А. Г. Кузнецов и др. – М.: Логос. – 2003. – 736 с.

3. Томашевский В. М. Моделирование систем / В. М. Томашевский. – К.: Видавнича група ВНУ. – 2005. – 352 с.

4. Андреев Д. А. Способы формализованного описания технологий: попытка обзора / Д. А. Андреев // Труды Псковского политехнического института. Сер. Машино-

строение. *Электротехника*. – 2011. – № 15.3. – С. 291 – 297.

5. Самуйлов К. Е. Основы формальных методов описания бизнес-процессов / К. Е. Самуйлов, Н. В. Серебренникова, А. В. Чукарин и др. – М.: РУДН. – 2008. – 130 с.

6. Ярыгин О. Н. Системная динамика как основа современной управленческой компетентности / О. Н. Ярыгин, А. А. Коростелев // *Актуальные проблемы экономики и права*. – 2014. – 4 (32). – С. 196 – 205.

7. Томашевський В. М. Імітаційне моделювання систем та процесів / В. М. Томашевський. – К.: ІСДО. – 1994. – 124 с.

8. Шитикова Е. В. Информационная модель процесса испытаний газотурбинных установок наземного применения / Е. В. Шитикова, Г. В. Табунщик // *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. – 2013. – № 1(28). – С. 101 – 108.

9. Шитикова Е. В. Моделирование рисков процесса испытаний газотурбинных установок наземного применения / Е. В. Шитикова, Г. В. Табунщик // *Наукові праці Донецького національного технічного університету, серія: «Проблеми моделювання та автоматизації проектування»*. – 2012. – № 1 (10) – 2 (11). – С. 79 – 89.

10. Шитикова Е. В. Инновационные методы управления процессом исследовательских испытаний ГТУ НП / Е. В. Шитикова, Г. В. Табунщик, В. Н. Разношинский // *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. – 2012. – № 3/10 (57). – С. 27 – 32.

Получено 30.03.2015

References

1. Marchukov E.Ju., Onishhik I.I., Rutovskij V.B. Ispytanija i obespechenie nadezhnosti aviacionnyh dvigatelej i jenergeticheskijh ustanovok [Testing and Reliability of Aircraft Engines and Power Plants], (2004), Moscow, Russian Federation, *MAI Publ.*, 336 p. (In Russian).

2. Aleksandrovskaia L.N., Kругlov V.I., and Kuznecov A.G. Teoreticheskie osnovy ispytanij i jeksperimental'naja otrabotka slozhnyh tehniceskijh sistem [Theoretical Foundations of Tests and Experimental Development of Complex Technical Systems],

(2003), Moscow, Russian Federation, *Logos Publ.*, 736 p. (In Russian).

3. Tomashevskij V.M. Modeljuvannja system [Simulation Systems], (2005), Kiev, Ukraina, *BHV Publ.*, 352 p. (In Ukrainian).

4. Andreev D.A., Sposoby formalizovannogo opisanija tehnologij: popytka obzora [Methods Formalized Description of Technology: an Attempt to Review], (2011), *Trudy Pskovskogo Politehnicheskogo Instituta. Ser. Mashinostroenie. Jelektrotehnika Publ.*, Vol. 15.3, pp. 291 – 297 (In Russian).

5. Samujlov K.E., Serebrennikova N.V., and Chukarin A.V. Osnovy formal'nyh metodov opisanija biznes-processov [Based on Formal Methods of Describing Business Processes], (2008), Moscow, Russian Federation, *RUDN Publ.*, 130 p. (In Russian).

6. Jarygin O.N., and Korostelev A.A. Sistemnaja dinamika kak osnova sovremennoj upravlencheskoj kompetentnosti [Systemic Dynamics as the Basis of Modern Managerial Competence], (2014), *Aktual'nye Problemy Jekonomiki i Prava Publ.*, Vol. 4 (32), pp. 196 – 205 (In Russian).

7. Tomashevskij V.M. Imitacijne modeljuvannja system ta procesiv [Simulation Systems and Processes], (1994), Kiev, Ukraine, *ISDO Publ.*, 124 p. (In Ukrainian).

8. Shitikova E.V., and Tabunshhik G.V. Informacionnaja model' processa ispytanij gazoturbinyh ustanovok nazemnogo primenenija [Information Model of Test Process of Gas Turbine unit for Terrestrial Usage], (2013), *Radio-Elektronika, Informatyka, Upravlinnja Publ.*, Vol. 1(28), pp. 101 – 108 (In Russian).

9. Shitikova E.V., and Tabunshhik G.V. Modelirovanie riskov processa ispytanij gazoturbinyh ustanovok nazemnogo primenenija [Risk Model of the Gas Turbine units for Terrestrial usage Testing Process], (2012), *Naukovi Praci Donec'kogo Nacional'nogo Tehnichnogo Universytetu, Serija: "Problemy Modeljuvannja ta Avtomatyzacii' Proektuvannja" Publ.*, Vol. 1 (10) – 2(11), pp. 79 – 89 (In Russian).

10. Shitikova E.V., and Tabunshhik G.V. Innovacionnye metody upravlenija processom issledovatel'skih ispytanij GTU NP [Innovation Approaches for Research Test Process Management of Gas Turbine Units], (2012), *Vostochno-evropejskij Zhurnal Peredovyh*

Tehnologij Publ., Vol. 3/10 (57). pp. 27 – 32 (In Russian).



Шитикова
Елена Викторовна,
аспирант каф.
программных средств
Запорожского нац. техни-
ческого ун-та,
+38 (095) 405-60-41.
E-mail:
helenshitikova@gmail.com



Табунщик
Галина Владимировна,
канд. техн. наук, доцент
каф. программных средств
Запорожского нац. техни-
ческого ун-та.
E-mail:
galina.tabunshchik@gmail.com