

УДК 004.94:620.1-1/-9

Шитикова Е. В.

Табунщик Г. В., канд. техн. наук

МОДЕЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ИСПЫТАНИЙ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

***Аннотация.** В статье рассмотрено решение научно-практической задачи повышения эффективности управления процессом испытаний ГТУ НП за счет разработки моделей автоматизированного управления процессом испытаний с рациональным использованием привлеченных ресурсов. Предложены модели рисков ГТУ НП и ее процесса испытаний. Проведена формализация процесса испытаний ГТУ НП. Выполнен реинжиниринг процесса исследовательских испытаний, что позволило адаптировать его под постоянно изменяющиеся условия.*

***Ключевые слова:** газотурбинные установки, процесс испытаний, формализация, модель рисков.*

Шитикова О. В.,

Табунщик Г. В., канд. техн. наук

МОДЕЛЬНО-ОРИЄНТОВНІ МЕТОДИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ВИПРОБУВАНЬ СКЛАДНИХ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

***Анотація.** У статті розглянуто вирішення науково-практичної задачі підвищення ефективності управління процесом випробувань ГТУ НВ за рахунок розробки моделей автоматизованого управління процесом випробувань з раціональним використанням залучених ресурсів. Запропоновано моделі ризиків ГТУ НВ і її процесу випробувань. Проведена формалізація процесу випробувань ГТУ НВ. Виконано реінжиніринг процесу дослідних випробувань, що дозволило адаптувати його під постійно мінливі умови.*

***Ключові слова:** газотурбінні установки, процес випробувань, формалізація, модель ризиків.*

Shytikova Y.,

Tabunshchik G., PhD.

MODEL-BASED METHODS FOR TEST PROCESS AUTOMATION OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS

***Abstract.** In the paper there are solved a task of gas turbine unit (GTU) test process efficiency improvement which is extremely important in the limited resources. The authors developed models which describes overall the GTU tests process, including risk models of GTU and its tests process. The authors carried out re-engineering of research test process, allowing adapting it to the ever-changing conditions and experiments results are proposed.*

***Keywords:** gas turbine unit, test process, formalization, risk model.*

Введение

Испытания являются основой объективной оценки технического уровня и качества изготовления продукции, ее прочности, надежности и безопасности на всех режимах работы и на протяжении установленного ресурса, а также принятия соответствующих управленческих решений на всех стадиях жизненного цикла продукции [1].

Обеспечение высокого качества, надежности и безопасности функционирования сложных технических систем является одной из важнейших научно-практических проблем [2].

Риск-ориентированный

подход

позволяет количественно и качественно оценить надежность и безопасность сложных технических систем [3-5], к которым относятся и газотурбинные установки наземного применения (ГТУ НП), а также выработать рекомендации по снижению риска, что приведет к повышению надежности и безопасности как самих ГТУ НП, так и их процесса испытаний. Повышение надежности за счет снижения риска имеет большое значение в производственной практике [6-9].

Процесс испытаний ГТУ НП является достаточно сложным комплексным процессом, которым необходимо управлять посредством автоматизации.

© Шитикова Е.В., Табунщик Г.В., 2016

Однако подавляющее большинство работ в области автоматизации процессов испытаний газотурбинной техники, к сожалению, касаются лишь газотурбинных двигателей [10-13], которые не являются конечным изделием, а только составной частью более сложных технических систем, таких как ГТУ НП. Поэтому в них не учтены все особенности процесса испытаний ГТУ НП, которые бы затрагивали уникальность структур и потоков данных, специфику документооборота и взаимодействующих сторон. С другой стороны, рост сложности проектирования, изготовления и эксплуатации ГТУ НП и, как следствие, повышение требований к процессу испытаний и увеличение расходов, связанных с ними, все больше требуют принятия эффективных решений на всех этапах жизненного цикла ГТУ НП.

Классическая системная инженерия унаследовала от частных инженерных дисциплин документо-ориентированный подход, в котором основной единицей инженерной деятельности считается документ. Однако, рост масштаба и сложности изделий приводит к взрывному увеличению количества документов и затрат труда на документооборот. Иными словами, документо-ориентированный подход очень плохо масштабируется – он приводит к бюрократизации и утрате гибкости [14]. Для решения этих проблем в конце 2000-х годов был предложен новый модельно-ориентированный подход в системной инженерии (Model-Based Systems Engineering, MBSE) [15]. Он основан на использовании наглядной имитационной модели системы, которая является основным носителем информации о ее концепции, особенностях конструкции и реализации [16]. Т.е. предлагается работать не с документами, а с моделями – абстрактными формальными представлениями системных решений, пригодными к автоматической обработке на компьютерах [14].

Таким образом, автоматизация процесса испытаний ГТУ НП с использованием модельно-ориентированных методов является достаточно актуальной проблемой.

Постановка задачи

В статье рассмотрено решение проблемы автоматизации процесса испытаний ГТУ НП. Систематизация различных задач автоматизации данного процесса представлена на рисунке 1 в виде «Пирамиды автоматизации» Эта модель объединяет различные сферы деятельности предприятия в единую информационную среду [17].



Рис.1 «Пирамида автоматизации» процесса испытаний ГТУ НП

Система автоматизированного управления (CAU) осуществляет управление работой ГТУ НП по информации, получаемой от датчиков – первый и второй уровень управления «Пирамиды автоматизации». Органы диспетчерско-оперативного управления технологическим процессом (третий уровень SCADA) позволяют следить за ходом процесса испытаний, получать необходимую информацию о нем и корректировать ход данного процесс. В условиях завода-изготовителя – это CAU испытательного стенда; для испытаний, проводимых в условиях эксплуатации – это диспетчерские системы управления объектовыми системами.

Однако, несмотря на всю сложность и важность систем автоматизированного управления как самой ГТУ НП, так и испытательного стенда, они не решают всех вопросов автоматизации процесса испытаний.

Одной из функций CAU ГТУ НП является регистрация контролируемых

параметров с созданием архивных файлов. При записи архивного файла контролируется свободная память на жестком диске. Для освобождения памяти под новый архивный файл старые архивные файлы могут уничтожаться. Во избежание потери данных о результатах работы ГТУ НП необходимо организовать своевременную передачу архивных файлов в базу данных. Особенно это актуально для длительных испытаний ГТУ НП.

По результатам испытаний помимо архивных файлов с параметрами работы установки, созданных САУ ГТУ НП, формируется много дополнительной информации, которую необходимо также анализировать, систематизировать и обеспечить сохранность в течение всего жизненного цикла ГТУ НП. Автоматизированные системы позволяют ускорить процесс доступа к необходимым источникам, сократить время, необходимое на обработку данных, что позволяет эффективнее принять решение о состоянии объекта испытаний и дальнейшем его управлении. Поэтому на четвертом уровне «Пирамиды автоматизации» (MES-Manufacturing Execution System), расположены информационные системы и системы анализа данных, что обеспечивает централизованный сбор и хранение данных, а также проведение их анализа. Агрегация данных технологического процесса дает возможность отслеживать процессы в течение долгого времени, сравнивая различные условия и их влияние на каждом этапе, а также производительность и качество. Архивные данные позволяют пользователям отслеживать отказы процесса, их источники и контролировать их в будущем [17].

Системы поддержки принятия решений (СППР) являются эффективным средством управления различными технологическими процессами, к которым относится и процесс испытаний ГТУ НП. Реализация обмена данными в рамках функциональных задач СППР процесса испытаний ГТУ НП требует формального описания компонентов, позволяющих осуществлять управление результатами процесса испытаний. Создание

такой автоматизированной системы с точки зрения модельно-ориентированного подхода требует наличие полной и адекватной модели процесса испытаний ГТУ НП, которая бы опиралась на совокупность информационных параметров, которые ее описывают. К сожалению, на сегодня нет моделей, позволяющих автоматизировать процесс управления испытаниями ГТУ НП.

Поэтому целью работы является решение проблемы повышения эффективности управления процессом испытаний ГТУ НП путем разработки моделей автоматизированного управления процессом испытаний.

Для достижения этой цели поставлены такие задачи:

- разработать модели оценки рисков в системе надежности ГТУ НП;
- разработать модели процесса испытаний ГТУ НП на основе системного подхода.

Модели рисков для ГТУ НП

Отсутствие единого риск-ориентированного подхода для ГТУ НП обусловила начальное направление работы к разработке моделей рисков для ГТУ НП в целом и процесса испытаний в частности.

Были разработаны базовые макромодель (рисунок 2) и микро модель рисков ГТУ НП.

Макромодель более общая и отражает риски для всего ГТУ НП. Микро модель отражает риски, влияющие на выполнение функций безопасности, которые были реализованы в качестве некоторых контрмер в макромодели [18].

Каждая из разработанных моделей может быть представлена в виде гиперкуба данных (1).

$$M_R = H(D, A), \quad (1)$$

где $D = \{d_1, d_2, \dots, d_i\}$ – множество измерений гиперкуба (для ГТУ НП измерений три, по числу компонентов в каждой из моделей рисков: d_1 – "Опасности", d_2 – "Риски", d_3 – "Контрмеры";

$A = A_{d1} \cup A_{d2} \cup \dots \cup A_{di}$ – множество атрибутов гиперкуба;

$$A_{di} = \{a_1^i, a_2^i, \dots, a_g^i\}, \quad (2)$$

где $i = 1, 2, 3$ – множество атрибутов измерения d_i .



Рис.2 Макромодель рисков ГТУ НП

Интегрированная модель рисков, опираясь на формулу (1), может быть представлена в виде совокупности макро- и микромоделей рисков, как представлено ниже:

$$R = M_{R\ macro} \cup M_{R\ micro},$$

где $M_{R\ macro} = H_{macro}(D_{macro}, A_{macro})$ – макро модель рисков, представленная в виде гиперкуба данных;

$M_{R\ micro} = H_{micro}(D_{micro}, A_{micro})$ – микро модель рисков, представленная в виде гиперкуба данных.

Однако не все риски несут одинаковую угрозу нанесения ущерба. Поэтому в условиях реально имеющихся (ограниченных) ресурсов возникает задача выделить такое отношение R_{crit} , содержащее только те ячейки гиперкубов, которым соответствуют критичные риски. Отношение (3) отражает интегрированную модель критичных рисков:

$$R_{crit} = M'_{R\ macro} \cup M'_{R\ micro}. \quad (3)$$

где R_{crit} – отношение, отражающее интегрированную модель критичных рисков;

$M'_{R\ macro}$ и $M'_{R\ micro}$ – срезы гиперкубов $M_{R\ macro}$ и $M_{R\ micro}$ соответственно, получившиеся в результате фиксации ячеек, содержащих наборы атрибутов измерений, в состав которых входят критичные риски.

Тогда можно определить некоторое множество O'_{risk} , характеризующее объект оценки риска с учетом управления

неопределенностью в условиях ограниченных ресурсов, формула (4):

$$O'_{risk} = \{nO, Asset, R_{crit}\}, \quad (4)$$

где nO – наименование объекта исследований, для которого проводится оценка риска;

$Asset$ – множество активов, представляющих ценность для данного объекта исследований. При этом под активами $Asset$ будем понимать все доступные ресурсы, т.е. не только материальные ценности, но и временные ресурсы, а также нематериальные ресурсы, к которым можно отнести персонал и окружающую среду [19].

Разработанные модели позволили выделить критерии оценки ГТУ НП и ее процесса испытаний с позиции риск-ориентированного подхода и будут использованы далее при моделировании процесса испытаний ГТУ НП.

Моделирование процесса испытаний ГТУ НП

На основе декомпозиции процесса испытаний ГТУ НП была получена базовая модель процесса испытаний ГТУ НП (5). Она получена за счет модификации теоретико-множественной модели динамических систем [20].

$$M_R = \langle T, O, R, X, Y, Z, U, D, O'_{risk} \rangle, \quad (5)$$

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:

$$d = \langle t, o, z, \tilde{X}, u \rangle \quad (6)$$

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

Особенность данной модели состоит в том, что в нее включено множество O'_{risk} , содержащее модель критичных рисков R_{crit} . Включение модели критичных рисков в формулу (5) позволяет управлять рисками данного процесса в условиях ограниченных ресурсов, а также корректировать модель рисков в зависимости от изменяющихся условий [21].

На основании модели (5) был проведен реинжиниринг процесса исследовательских испытаний, в результате чего в модель испытаний внесены внутренний и внешний циклы, что позволило рационализировать процесс за счет разделения информационных потоков.

Таким образом, разделение испытаний на логические уровни разбивает процесс исследовательских испытаний на несколько подпроцессов (по числу логических уровней) со своими объектами, связями состояниями и действиями над ними [22]. Тогда будет справедлива запись формулы (7):

$$M_R = M_{R1} \cup M_{R2} \cup \dots \cup M_{Rn} \quad (7)$$

где n – число логических уровней процесса испытаний.

Для определения множества состояний Z , множества условий U и множества действий D были построены диаграммы состояний ГТУ НП в процессе испытаний, на основе которых формула (6) была модифицирована, внесением множества фиксированных видов действий, как показано в формуле (8).

$$d = \langle t, o, z, \tilde{X}, u, v \rangle \quad (8)$$

где v – элемент множества V , содержащего фиксированные виды действий [21].

Предложенный подход реинжиниринга процесса исследовательских испытаний был опробован на комплексных исследовательских испытаниях нового проекта - газоперекачивающего агрегата

(ГПА), разработки и производства АО «Мотор Сич», Украина, предназначенного для транспортирования природного газа по магистральным газопроводам и для установки на дожимных компрессорных станциях и станциях подземных хранилищ газа.

Особенность данных исследовательских испытаний состояла в том, что это была первая разработка установок подомного типа, а также в том, что в условиях предприятия не было возможности полностью испытать ГПА из-за отсутствия поблизости газовой магистрали высокого давления (абсолютное давление газа на входе ГПА составляет 3,79 МПа, на выходе ГПА – 5,49 МПа).

Была выполнена декомпозиция работ, после чего процесс исследовательских испытаний был разбит на два подпроцесса: 1) проведение исследовательских испытаний на испытательном стенде завода без подвода магистрального газа высокого давления к ГПА; 2) проведение исследовательских испытаний на месте эксплуатации ГПА в составе компрессорной станции.

На основании декомпозиции работ были сформированы две программы исследовательских испытаний ГПА. Такая декомпозиция позволила уменьшить время на доработку за счет исключения времени и затрат на перевозку образца с места эксплуатации на завод и обратно [22].

Разработанные модели позволили определить способ и формат хранения необходимой информации об испытаниях ГТУ НП.

Динамическая модель передачи данных результатов испытаний ГТУ НП

Для обеспечения целостности результатов испытаний необходимо организовать передачу архивных файлов из САУ в базу данных с оптимальной периодичностью. Поэтому была разработана динамическая модель передачи данных результатов испытаний ГТУ НП.

$$M_{storage} = \langle Obj_i, Y'_i, Z'_i, U'_i, D'_i, \eta'_i \rangle, \quad (9)$$

где $i = 1, 2, \dots$ i – число установок, проходящих испытания;

$$Obj_i = \langle Obj_{type}, S_{numb} \rangle \quad - \quad \text{кортеж,}$$

однозначно определяющий i -ый объект испытаний, для которого будет осуществляться передача данных;

где Obj_{type} – тип объекта испытаний;

S_{numb} – серийный номер объекта испытаний;

Y_i' – подмножество результатов испытаний, принадлежащее множеству Y выходных параметров базовой модели процесса испытаний (5);

Z_i' – подмножество состояний i -го объекта при передаче данных: считывание архивных данных с жесткого диска панельного компьютера шкафа управления САУ, оперирование этими данными в компьютере, ожидание ответа при передаче архивных данных и их записи на сервер БД и т.д. $Z_i' \in Z$ базовой модели процесса испытаний (5);

U_i' – подмножество условий, принадлежащее множеству U базовой модели процесса испытаний (5). Выполнение данных условий влечет за собой смену состояний Z_i' i -го объекта;

D_i' – подмножество, определяющее работы, проводимые при испытаниях i -го объекта, и принадлежащее множеству D базовой модели процесса испытаний (5);

$$\eta' = (1 + \omega)(\tau B + \sigma C) \left(\frac{\tau}{S_{hd}} - \frac{1}{v_{net}} \right) \quad -$$

период передачи архивных файлов из САУ i -го объекта испытаний в БД,

где ω – коэффициент запаса свободного места на жестком диске панельного компьютера шкафа управления САУ;

τ – предполагаемое время наработки ГТУ НП при запланированных работах;

σ – допустимое нормативной документацией количество аварийных остановов;

B – размер файла САУ с секундным архивом за час работы ГТУ НП;

C – размер аварийного файла САУ с десяти минутной записью;

S_{hd} – объем пространства на жестком диске панельного компьютера САУ, выделенного под хранение архивных файлов;

v_{net} – средняя скорость передачи данных по сети.

Данная модель включает расчетный параметр η' период передачи архивных файлов из САУ i -го объекта испытаний на хранение в БД, что позволяет избежать потери данных и обеспечить их адекватность и актуальность

Выводы

В работе решена актуальная научно-техническая задача по разработке моделей для автоматизации процесса испытаний ГТУ НП.

Показано, что автоматизация является средством повышения эффективности управления процессом испытаний ГТУ НП. При этом система автоматического управления, которая является составной частью ГТУ НП, позволяет автоматизировать процесс управления самой установкой, но не решает проблем автоматизации процесса испытаний ГТУ НП.

Были разработаны модели рисков как самой ГТУ НП, так и ее процесса испытаний, которые основаны на представлении данных в виде гиперкуба, что позволяет сделать качественную и количественную оценку рисков ГТУ НП и являются показателем надежности и безопасности ГТУ НП.

Также были разработаны модели процесса испытаний ГТУ НП и динамическая модель передачи данных результатов испытаний, которые будут использованы при создании СППР процесса испытаний ГТУ НП.

На основании моделей процесса испытаний был выполнен реинжиниринг процесса исследовательских испытаний ГТУ НП, который позволил адаптировать процесс исследовательских испытаний под постоянно изменяющиеся условия, выделить основные задачи и планировать порядок работ, сроки их выполнения, а также необходимые ресурсы.

Результаты теоретических исследований данной работы использованы на практике для комплексных исследовательских испытаний газоперекачивающего агрегата производства АО «МОТОР СИЧ», что позволило уменьшить время и расходы на доработку за счет исключения времени и

расходов на перевозку образца с места эксплуатации на предприятие и обратно.

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.

Направление дальнейшей работы состоит в решении задачи оптимизации управления обменом данными для распределенной сети ГТУ НП.

Список использованной литературы

1. Шишкин И.Ф. Испытания и испытательное оборудование; Учебное пособие / И.Ф. Шишкин, Г.Ф. Сергушев. – СПб.: СЗТУ. – 1999. – 37 с.
2. Henley E.J. Designing for reliability and safety control / E.J. Henley, H. Kumamoto. – Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall Inc. – 1985. – 527 p.
3. Andrews J.D. Reliability and Risk Assessment / J.D. Andrews, T.R. Moss. – 2nd edition. – London and Bury St Edmunds: Professional Engineering Publishing. – 2002. – 540 p.
4. Solojontsev Evgueni D. Scenario Logic and Probabilistic Management of Risk in Business and Engineering / Evgueni D. Solojontsev. – Springer. – 2009. – 450 p. DOI: 10.1007/978-0-387-77946-1.
5. Wenyuan Li. Risk Assessment Of Power Systems: Models, Methods, and Applications / L. Wenyuan. - New York: Wiley-IEEE Press. – 2005. – 325p.
6. Kołowrocki K. Reliability and Safety of Complex Technical Systems and Processes: Modeling-Identification-Prediction-Optimization / K. Kołowrocki, J. Soszyńska-Budny. - London: Springer. – 2011. - 405 p. DOI:10.1007/978-0-85729-694-8, 2011.
7. Kuo W. An annotated overview of system-reliability optimization / W. Kuo, V.R. Prasad // IEEE Transactions on Reliability. 2000. Vol. 49(2). – P. 176-187. DOI: 10.1109/24.877336.
8. Kuo W. Optimal Reliability Modeling: Principles and Applications. / W. Kuo, M.J. Zuo. - Hoboken: John Wiley & Sons. - 2003. – 559 p.
9. Vercellis S. Business Intelligence: Data Mining and optimization for decision making / S. Vercellis. - Hoboken: John Wiley & Sons. - 2009. – 417 p. DOI: 10.1002/9780470753866.
10. Зеленков Ю.А. Комплексная автоматизация испытаний газотурбинных двигателей. Часть 1: Управление стендом и сбор данных / Ю.А. Зеленков, В.Ю. Чувилин, В.Е. Журавлев // Вестник УГАТУ: науч. журн. Уфимск. гос. авиац. техн. ун-та. Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2011. – Т.15, №2(42). – С. 119-125.
11. Погорелов Г.И. Информационная поддержка управления жизненным циклом испытаний ГТД на основе CALS-технологий / Г.И. Погорелов, Б.К. Галимханов, К.А. Ризванов // Вестник УГАТУ: науч. журн. Уфимск. гос. авиац. техн. ун-та. Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2007. – Т.9, № 4 (22). – С. 57-63.
12. Куликов Г.Г. Архитектура интегрированной информационной модели для разработки, производства и эксплуатации ГТД совместно с его системой автоматического управления, контроля и диагностики / Г.Г. Куликов, К.А. Ризванов, С.С. Денисова // Вестник Самарского государственного аэрокосмического Университета. – 2009. - №3(19). – С. 244-252.
13. Salar A. Improving Model-Based Gas Turbine Fault Diagnosis Using Multi-Operating Point Method / A. Salar, S. M. Hosseini, B. R. Zangmolk, A. K. Sedigh // Fourth UKSim European Symposium on Computer Modeling and Simulation, ems. – 2010. – pp.240-247.
14. Ковалев С.П. Модельно-ориентированный подход к управлению жизненным циклом сложных технических изделий / С.П. Ковалев, А.В. Толоч / XIV – междунар. науч.-практ. конф. «Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта CAD/CAM/PDM - 2014». URL: <http://lab18.ipu.ru/projects/conf2014/0/2.htm>. (Дата обращения 10.04.2016).
15. Long D. A Primer for Model Based Systems Engineering / D. Long, Z. Scott. - 2nd

edition. - Blacksburg: Vitech Corp. - 2012. - 124 p.

16. Herniter M.E. Introduction to Model-Based System Design. Rose Hulman Institute of Technology. 2010. URL: http://wiki.ece.rose-hulman.edu/herniter/images/8/8d/MBSD1_Lecture_Notes_Complete_Winter09-10.pdf. (Дата обращения 10.04.2016).

17. Marcy A. Intelligent automation series part 1: Introducing the intelligent automation pyramid. Control Engineering. 2015. URL: <http://www.controleng.com/single-article/intelligent-automation-series-part-1-introducing-the-intelligent-automation-pyramid/109d090cec56a8e0b858cf1f7d866b3a.html>. (Дата обращения 10.04.2016).

18. Шитикова Е.В. Анализ рисков газотурбинных установок наземного применения / Е.В. Шитикова, Г.В. Табунщик // *Вісник двигунобудування*. – 2012. - №1. – С. 54-59.

19. Шитикова Е.В. Метод управления неопределенностью в условиях ограниченных ресурсов / Шитикова Е.В., Табунщик Г.В // *Радиоелектроніка, інформатика, управління*. – 2015. – № 2(33). – С. 87-95. DOI: 10.15588/1607-3274-2015-2-1.

20. Томашевський В.М. Моделювання систем / В.М. Томашевський. – К.: Видавнича група ВНУ. - 2005. – 352 с.

21. Шитикова Е.В. Формализация процесса испытаний ГТУ НП / Е.В. Шитикова, Г.В. Табунщик // *Электротехнические и компьютерные системы*. – 2015. – № 18(94). – С.75-80. DOI: 10.15276/etks.18.94.2015.14.

22. 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 30.04.2016

References

1. Shishkin I.F., Sergushev G.F. Ispytaniya i ispytatel'noe oborudovanie [Test and Test Equipment], (1999), St.Petersburg, Russian

Federation, *North Western Customs Directorate Publ.*, 37 p. (In Russian).

2. Henley E.J., Kumamoto H. Designing for reliability and safety control, (1985), Englewood Cliffs, New Jersey, *Prentice-Hall Inc. Publ.*, 527p. (In English).

3. Andrews J.D., Moss T.R. Reliability and Risk Assessment, (2002), London and Bury St Edmunds, *Professional Engineering Publ.*, 540p. (In English).

4. Solojntsev E.D. Scenario Logic and Probabilistic Management of Risk in Business and Engineering, (2009), *Springer Publ.*, doi: 10.1007/978-0-387-77946-1. (In English).

5. Wenyuan Li Risk Assessment Of Power Systems: Models, Methods, and Applications, (2005), New York, *Wiley-IEEE Press*, 325p. (In English).

6. Kołowrocki K., Soszyńska-Budny J. Reliability and Safety of Complex Technical Systems and Processes: Modeling-Identification-Prediction-Optimization, (2011), London, *Springer Publ.*, doi:10.1007/978-0-85729-694-8. (In English).

7. Kuo W., Prasad V.R. An annotated overview of system-reliability optimization, (2000), *IEEE T. Reliab Publ.*, vol. 49(2), pp. 176-187, doi:10.1109/24.877336. (In English).

8. Kuo W., Zuo M.J. Optimal Reliability Modeling: Principles and Applications, (2003), *John Wiley&Sons Publ.*, Hoboken. (In English).

9. Vercellis S. Business Intelligence: Data Mining and optimization for decision making, (2009), *John Wiley&Sons Publ.*, Hoboken, doi: 10.1002/9780470753866. (In English).

10. Zelenkov Yu.A., Chuvilin V.Yu., Zhuravlev V.E. Kompleksnaja avtomatizacija ispytanij gazoturbinyh dvigatelej. Chast' 1: Upravlenie stendom i sbor dannyh, [Complex automation of gas turbine engine tests. Part 1: test cell management and data acquisition], (2011), Ufa, Russia, *Vestnik UGATU Publ.*, vol. 15/2(42), pp. 119-125. (in Russian).

11. Pogorelov G.I., Galimhanov B.K., Rizvanov K.A. Informacionnaja podderzhka upravlenija zhiznennym ciklom ispytanij GTD na osnove CALS-tehnologij [Information support of management by life cycle of GTE tests on the basis of CALS-technologies], (2007), Ufa, Russia, *Vestnik UGATU Publ.*, vol. 9/4(22), pp. 57-63. (in Russian).

12. Kulikov G.G., Rizvanov K.A., Denisova S.S. Arhitektura integrirovanoj informacionnoj modeli dlja razrabotki, proizvodstva i jekspluatacii GTD sovместno s ego sistemoj avtomaticheskogo upravlenija, kontrolja i diagnostiki [The integrated information model architecture for working out, manufacture and operation GTE together with its system of automatic control, the control and diagnostics], (2009), Samara, Russia, *Vestnik of the Samara State Aerospace University Publ.*, vol. 3(19), pp. 244-250. (in Russian).
13. Salar A., Hosseini S.M., Zangmolk B.R., Sedigh A.K. Improving Model-Based Gas Turbine Fault Diagnosis Using Multi-Operating Point Method. Proceedings of Fourth UKSim European Symposium on Computer Modeling and Simulation, 17-19 November 2010. Pisa, Italy, pp 240-247. (In English).
14. Kovalev S.P., Tolok A.V. Model'no-orientirovannyj podhod k upravleniju zhiznennym ciklom slozhnyh tehničeskij izdelij [Model-based approach to lifecycle management of complex technical products], (2014), V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, url: <http://lab18.ipu.ru/projects/conf2014/0/2.htm>. Accessed 10 April 2016. (in Russian).
15. Long D., Scott Z.A. Primer for Model Based Systems Engineering, 2nd edn., (2012), Blacksburg, *Vitech Corp Publ.*, 124 p. (In English).
16. Herniter M.E. Introduction to Model-Based System Design, Rose Hulman Institute of Technology, (2010), url: http://wiki.ece.rose-hulman.edu/herniter/images/8/8d/MBSD1_Lecture_Notes_Complete_Winter09-10.pdf. Accessed 10 April 2016. (In English).
17. Marcy A. Intelligent automation series part 1: Introducing the intelligent automation pyramid. Control Engineering, (2015), url: <http://www.controleng.com/single-article/intelligent-automation-series-part-1-introducing-the-intelligent-automation-pyramid/109d090cec56a8e0b858cf1f7d866b3a.html>. Accessed 10 April 2016. (In English).
18. Shitikova E.V., Tabunshhik G.V. Analiz riskov gazoturbinnyh ustanovok nazemnogo primenenija [Risks analysis of the gas turbine units for terrestrial usage], (2012), *Visnyk dvygunobuduvannja Publ.*, vol. 1, pp. 54-58. (in Russian).
19. Shitikova E.V., Tabunshhik G.V. Metod upravlenija neopredelennost'ju v uslovijah ogranichennyh resursov [Method of uncertainty managing in resource-limited settings], (2015), *Radio Electronics, Computer Science, Control Publ.*, vol. 2(33), pp. 87-95. doi: 10.15588/1607-3274-2015-2-11. (in Russian).
20. Tomashevs'kyj V.M. Imitacijne modeljuvannja system ta procesiv [Simulation systems and processes], (1994), Kyi'v, Ukrai'na, *ISDO Publ.*, 124 p. (In Ukrainian).
21. Shitikova E.V., Tabunshhik G.V. Formalizacija processa ispytanij GTU NP [Formalization of the GTU tests process], (2015), *Electrotechnic and Computer Systems Publ.*, vol. 18(94), pp. 75-80. doi: 10.15276/etks.18.94.2015.14. (in Russian)
22. Shitikova E.V., Tabunshhik G.V. Innovacionnye metody upravlenija processom issledovatel'skij 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,
мл. науч. сотрудник
кафедры программных
средств ЗНТУ,
+38 (095) 405-60-41
helenshitikova@gmail.com



Табунщик
Галина Владимировна
к.т.н., профессор кафедры
программных средств
ЗНТУ,
galina.tabunshchik@gmail.com