

Century. – IGI Global. – 2001. – 252 p.

2. Ali Niknafs and Raman Ramsin. Computer-Aided Method Engineering: An Analysis of Existing Environments // LNCS. – Springer. – Volume 5074. – 2008. – 525-540 pp.

3. Jolita Ralyte and Sjaak Brinkkemper. Situational Method Engineering: Fundamentals and Experiences: Proceedings of the IFIP WG 8.1 Working Conference, 12-14 September 2007, Geneva, Switzerland. – Springer US. – 380 p.

4. Steven Kelly and Juha-Pekka Tolvanen. Domain-Specific Modeling: Enabling Full Code Generation. Wiley-IEEE Computer Society Pr. – 2008. – 427 p.

5. Richard C. Gronback. Eclipse Modeling Project: A Domain-Specific Language (DSL) Toolkit. Addison-Wesley Professional. – 2009. – 736 p.

6. Vitaliy Mezhujev, Eric Verhulst, and Bernhard H.C. Spath. Interacting Entities Modelling Methodology for Robust Systems Design // Papers of the Second International Conference on Advances in System Testing and Validation Lifecycle. – CPS publishing. – 2010. – 75– 80 pp.

7. Grady Booch, Robert A. Maksimchuk, Michael W. Engel, and Bobbi J. Young. Object-Oriented Analysis and Design with Applications (3rd Edition). – Addison-Wesley Professional. – 2007. – 720 p.

8. Межуев В. И. Предметно-ориентированное моделирование распределенных параллельных приложений реального времени / В. И. Межуев // Системи обробки інформації. – 2010 – Вип. 5 (86). – С. 98 – 103.

9. Sikha Bagui and Richard Earp. Database Design Using Entity-Relationship Diagrams (Foundations of Database Design). Auerbach Publications. – 2003. – 264 p.

10. B. Thalheim. Entity-Relationship Modeling: Foundations of Database Technology. – Springer Berlin Heidelberg. – 2010. – 640 p.

11. David A. Marca and Clement L. McGowan. IDEF0 and SADT: A Modeler's Guide. – OpenProcess, Inc. – 2005. – 392 p.

12. DiCerto J. J. Planning and preparing data-flow diagrams. Hayden Book Co. – 1964. – 90 p.

13. Russ Miles and Kim Hamilton. Learning UML 2.0. – O'Reilly Media. – 2006. – 288 p.

14. <http://www.idef.com/>

15. <http://www.icam.com>

16. Introduction to Methodologies and SSADM [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.comp.glam.ac.uk/pages/staff/tdhutchings/chapter4.html>

Надійшла 18.9.2010 р.

УДК 389.14: 006.15.7

В.Т. КОНДРАТОВ

Институт кибернетики им. В.М. Глушкова НАН Украины

ТЕОРИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ: ПРИМЕНЕНИЕ НЕЛИНЕЙНОГО РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ НАРАБОТКИ НА МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ ОТКАЗ

В статье впервые показана возможность использования нелинейного регрессионного анализа в теории метрологической надежности. Приведены основные понятия и определения, связанные с нелинейным регрессионным анализом.

In the article possibility of the use of nonlinear regressive analysis is first rotined in the theory of metrology reliability. Basic concepts and determinations, related to the nonlinear regressive analysis, are resulted.

Ключевые слова: надежность, метрология, регрессионный анализ.

Введение

Задача определения значения прогнозного времени наработки на метрологический отказ (МО) была, есть и остается актуальной до тех пор, пока не будут синтезированы вероятностно-физические модели (ВФ-модели) МО для всех типов средств измерений (СИ).

Решение указанной задачи стало возможным благодаря разработке правил синтеза гибких многопараметровых функций распределения (ФР) нормируемых погрешностей в течение времени наработки на МО [1]. Они обуславливают синтез ФР с независимым параметром масштаба и связью его со значениями погрешностей, полученных при аттестации СИ или ввода его в эксплуатацию. Свойства и особенности некоторых ФР описаны в работах [1– 10].

За 2007– 2009 гг. нами синтезировано три вида ФР, характеризующих взаимосвязь метрологических характеристик (МХ), в частности, нормируемых погрешностей, с таким параметром метрологической надежности (МН), как время наработки СИ на МО. Однако эти ФР пока не привязаны к СИ соответствующего типа.

В 2009– 2010 гг. удалось решить метрологическую задачу применения регрессионного анализа для динамического прогнозирования и определения времени наработки на МО и разобраться в тонкостях

использования нелинейного регрессионного анализа для решения этой задачи. Были разработаны методы прогнозирования и определения времени наработки на МО, времени проведения первой поверки и текущего значения коэффициента метрологического запаса. Поданы соответствующие документы на выдачу патентов Украины, которые были получены уже к 09.05.2010 г [11– 13].

В настоящей статье описаны результаты научных исследований по использованию регрессионного анализа для решения задач метрологической надежности СИ.

Объект исследований – процесс регрессионного анализа случайных величин.

Предмет исследований – применение регрессионного анализа для прогнозирования и определения времени наработки СИ на МО.

Целью работы является ознакомление ученых и специалистов с возможностями применения регрессионного анализа для решения задач прогнозирования и определения времени наработки СИ на МО, а также с сущностью предложенного нами *T*-метода динамической нелинейной регрессии.

Результаты исследований

Регрессионный анализ в теории метрологической надежности: сущность и цели

Анализом¹ называют логический прием определения того или иного понятия, путем разложения его по признакам на составные части таким образом, чтобы сделать познание его ясным и в полном объеме. Акт анализа называют анализированием, а способ проведения анализа – аналитическим методом [14].

При доказательствах, опирающихся на ряд умозаключений, в особенности при развитии или постановке какой-либо научной теории, выражение «анализ» имеет несколько иной смысл: оно означает, что доказательства идут регрессивно, от условного к обуславливающему [14], т.е. от выбранной ВФ-модели МО с прогнозными значениями параметров ФР к причинам (погрешностям) их обуславливающим.

Утверждение 1

Теория нелинейного регрессионного анализа включает в себе (с 2010 года) два научных направления, связанных с использованием статистических вероятностных моделей (В-моделей) и ВФ-моделей МО. Первое направление основано на аппроксимации эмпирически полученных данных (случайных по значению однородных физических величин)² однопараметровой ФР, описывающей В-модель МО СИ. Второе направление основано на приближении многопараметровой ФР к базовой функции того же вида по нескольким, но не всем, параметрам данной ФР, описывающей ВФ-модель МО СИ, т.е. в основу второго направления положено параметрическое приближение ФР.

Утверждение 2

Особенностью нелинейного регрессионного анализа в ТМН является изучение МХ СИ и их связей с параметрами МН СИ, в частности со временем наработки СИ на МО.

В теорию МН вводятся три понятия: «явление МО», «нелинейная регрессия» и «параметрическое приближение функций». Определения данным понятиям приводятся ниже, по тексту.

Явление МО СИ (СИИ) является внешним выражением сущности процессов, протекающих в измерительных каналах (ИК) СИ или в измерительных системах (ИС), в том числе в ИС типа «объект измерений (ОИ) – средство избыточных измерений (СИИ)», как результат проявления каких-либо сил и процессов, действующих на ИК.

Определение 1

Явление МО СИ – это совокупность процессов материально-информационного изменения и преобразования состояния измерительных каналов (ИК) СИ или ИС «ОИ – СИИ», обусловленные действием внешних и внутренних дестабилизирующих факторов.

Определение 2 (расширенное)

Явление МО СИ – это совокупность процессов материально-информационного изменения и преобразования состояния измерительных каналов (ИК) СИ или ИС «ОИ – СИИ», обусловленные действием внешних и внутренних дестабилизирующих факторов и приводящие к закономерным изменениям значений параметров функции преобразования (ФП) ИК, при которых значения критериальных метрологических характеристик (МХ)³ СИ достигают, со временем, граничных значений.

Явление МО формально описывается ВФ-моделью МО СИ, в основу которой положены многопараметровые ФР критериальных метрологических характеристик (МХ) СИ (ФР нормируемых погрешностей или ФР максимальной чувствительности ИК).

Одна из наиболее распространенных трактовок понятия «регрессия» (лат. *Regressio* – движение назад) состоит в следующем: «это процесс, механизм и результат возвращения объекта⁴ в своей эволюции к ранее пройденным этапам, состояниям, формам и способам функционирования» [15, 16].

Поскольку явление МО формально описывается ВФ-моделью МО, то за основу примем следующее определение регрессии.

Определение

Регрессия – это описываемый прогнозной ВФ-моделью процесс возвращения явления МО в своей

¹ Анализ – от греческого «analysis» – разложение, расчленение).

² например, погрешностей результатов многократных измерений образцовой ФВ заданного размера в разные (календарные) моменты времени

³ нормируемых погрешностей или чувствительности СИ

⁴ СИ или измерительной системы (ИС) «объект измерений (ОИ) – средство избыточных измерений (СИИ)»

эволюции к ранее протекавшим (от настоящего к будущему) процессам материально-информационного изменения и преобразования состояния ИК СИ или ИС, последствия которых определяются по результатам проверок их в течение времени до наступления МО.

Исследования гибких ФР показали, что их кривые могут изменять форму в достаточно широких пределах при изменении значений параметра формы. Поэтому ВФ-модели МО СИ, описывающие регрессионные процессы, называются регрессионными моделями.

В современной математической статистике основным методом анализа является регрессионный анализ, который предполагает широкое использование средств вычислительной техники для автоматизации сложных расчетов, связанных с регрессиями.

Регрессионный анализ – статистический анализ регрессионной модели, т.е. такой модели, в которой зависимая переменная (отклик) является случайной величиной, а независимые переменные (факторы (предикторы)) являются детерминированными величинами [17].

При любом анализе явления МО, в том числе и регрессионном, используется элементарный и причинный анализ. Первый разлагает явление МО на отдельные его части без учета тех отношений, в которых находятся эти части друг к другу и к целому. Причинный анализ дифференцирует явление МО с учетом его причинных отношений.

При анализе МО учитывается, что у СИ, эксплуатируемого в условиях, отличных от нормальных, нарушаются его естественные связи с окружающей средой, что приводит, в конечном счете, к изменению МХ, характеризующих «бытие» СИ.

Различают линейный и нелинейный регрессионный анализ. Один из недостатков линейного регрессионного анализа состоит в том, что он может быть применен только к линейным ФР. Нелинейный регрессионный анализ находится еще в стадии развития.

Нелинейный регрессионный анализ⁵ – статистический метод исследования уравнения нелинейной регрессии⁶, связывающий между собой критериальную МХ СИ, например $\xi_x(t_x, T_{но}, k_{ф}, \xi_{x0}, S_{\xi})$, и параметры (регрессоры) $T_{но}, k_{ф}, \xi_{x0}$ и S_{ξ} ВФ-модели МО.

Регрессионный анализ ставит своей целью [18]:

1. Определение степени детерминированности вариации критериальной (зависимой) переменной параметрами или предикторами (независимыми переменными).
2. Прогнозирование (предсказание) значений зависимой переменной $\xi_x(t_x, T_{но}, k_{ф}, \xi_{x0}, S_{\xi})$ с помощью независимых переменных (параметров – регрессоров) $T_{но}, k_{ф}, \xi_{x0}$ и S_{ξ} .

Определение вклада отдельных параметров (независимых переменных) $T_{но}, k_{ф}, \xi_{x0}$ и S_{ξ} в вариацию зависимой переменной $\xi_x(t_x, T_{но}, k_{ф}, \xi_{x0}, S_{\xi})$.

Нелинейный регрессионный анализ дает ответ на вопрос, насколько точно данный анализ оценивает изменение критериальной ФР $\xi_x(t)$ при вариациях параметров $T_{но}, k_{ф}, \xi_{x0}$ и S_{ξ} . При этом учитывается среднее значение дисперсии функции распределения $\xi_x(t)$ при разных наборах значений $T_{но}, k_{ф}, \xi_{x0}$ и S_{ξ} (фактически речь идет о мере рассеяния зависимой переменной относительно кривой распределения или регрессионной кривой).

Основной недостаток нелинейного регрессионного анализа состоит в том, что его результаты оцениваются с большими затратами времени, чем при линейном регрессионном анализе, особенно в тех случаях, когда приходится оценивать несколько параметров.

Благодаря синтезу и использованию ВФ-моделей МО в теории МН стало возможным рассматривать задачи прогнозирования и определения времени наступления МО СИ как метрологические, связанные с многократными измерениями нормированных по значению (образцовых) физических величин (ФВ) с помощью поверяемого СИ, с определением значений нормируемой погрешности и ее неопределенности (или максимальной чувствительности и ее неопределенности) в моменты времени проведения проверок, прогнозного времени и неопределенности наступления МО и т.д.

Метод динамической нелинейной регрессии

МО СИ наступает в неопределенных динамично развивающихся условиях его использования. Поэтому для решения задач прогнозирования и определения времени наработки на МО был разработан метод динамической нелинейной регрессии, использующий гибкие ВФ-модели МО. Теоретико-экспериментальные исследования гибких ВФ-моделей совместно с МХ СИ обеспечивают получение новых знаний (информации) о возможных состояниях СИ (вероятности МО) и его МН в настоящем и будущем.

В математике при регрессионном анализе используется термин «аппроксимация» – синоним термина «приближение функций». В теории МН корректно использовать понятия «приближение многопараметровых функций распределения» и «параметрическое приближение», поскольку они более четко отражают сущность предложенной совокупности приемов по прогнозированию и определению времени наработки на МО. В чистом виде аппроксимация по ряду точек ($n > 3$) нами не используется, а вид

⁵ применительно к метрологии

⁶ уравнения величин или многопараметровой функции распределения

аппроксимирующей функции не меняется.

В основу предложенного метода динамической нелинейной регрессии положена статистическая 3ξ -гипотеза⁷ о параметрическом приближении нелинейных ФР по трем характеристическим результатам измерений (трем значениям погрешностей на графическом портрете ВФ-модели МО), при котором достигается приближение не по виду кривой, а по параметру формы, параметру сдвига⁸, реже – по параметру смещения.

Напомним, что гипотеза – это зафиксированная структура мысли, обеспечивающая достижение «прозрачного» соотношения реальности и языка, как средства выражения мышления [19].

Статистическая 3ξ -гипотеза проф. Кондратова

Определение

При установленном виде ВФ-модели, адекватной исследуемому явлению МО СИ, процесс параметрического приближения двух ФР, направленный на прогнозирование и определение значений времени наработки на МО (параметра сдвига), должен осуществляться на основании «принципа трех точек», разновидностью которого является утверждение, что прогнозную кривую необходимо и достаточно проводить через три средних значения нормируемой погрешности ξ_{xi} многократных измерений образцовой физической величины (ФВ), – в моменты времени t_{x0} ввода СИ в эксплуатацию (или присвоения ему класса точности) и в моменты времени последующей (t_{xi+1} -й) и предыдущей (t_{xi}) поверок ($i \geq 3$).

Статистическим критерием данной гипотезы является случайная величина ξ_x (нормированная погрешность измерения образцовой ФВ заданного размера) с плотностью распределения P_ξ , изменяющейся, в общем случае, от поверки к поверке, которая служит для проверки гипотезы и обуславливает целенаправленную вариацию параметров ФР, параметр сдвига которой является искомым (определяемым). Наблюдаемыми (эмпирическими) значениями ξ_{xi} называют те значения критерия, которые вычислены по результатам n -кратных измерений образцовой ФВ заданного размера (при статистически достоверной выборке). Условие $-\xi_{нд} \leq \xi_{xi} \leq +\xi_{нд}$ (где $i = 0, 1, \dots, n$), определяющее область существования значений нормируемой погрешности, называется областью принятия гипотезы.

Спецификой нелинейного регрессионного анализа является невозможность использования известных критериев согласия (Колмогорова, Смирнова, Смирнова-Крамера-Мизеса и других [20, 21]) для оценки степени параметрического приближения ФР, поскольку для них проверочной статистикой является среднеквадратическая разность между двумя ФР.

При решении задач прогнозирования и определения времени наработки на МО используется $\Delta\xi$ -критерий согласия⁹ проф. Кондратова, согласно которому проверочной статистикой является равенство нулю разности теоретически и практически полученных средних значений погрешности в t_{xi} -е ($i \geq 1$) моменты времени проведения поверки.

$\Delta\xi$ -критерий согласия проф. Кондратова –

$$\Delta\xi_{xTi} = \overline{\xi_{xi}}(t_{xi}) - \xi_{Ti}(t_{xi}) = 0 \pm \Delta\xi,$$

где $\overline{\xi_{xi}}(t_{xi})$ – среднее значение погрешности, полученное в t_{xi} -е моменты времени поверки в результате n -кратных измерений образцовой ФВ с помощью поверяемого СИ; $\xi_{Ti}(t_{xi})$ – среднее значение погрешности, полученное по кривой ФР и соответствующее t_{xi} -му моменту времени поверки СИ; $\pm\Delta\xi$ – допустимая погрешность (неопределенность), характеризует необходимое условие проведения прогнозной кривой ФР через i -ю точку, соответствующую погрешности измерения образцовой ФВ в момент времени t_{xi} .

Необходимым и достаточным условием прогнозирования и определения времени наработки СИ на МО является выполнение $\Delta\xi$ -критерия согласия в моменты времени t_{xi} и t_{xi+1} , соответствующие двум последним поверкам.

Гипотеза о согласии отвергается, если значение практически полученной погрешности находится за пределами области принятия решения, т.е. при $\xi_{xi} > |\pm\xi_{нд}|$ или при $\Delta\xi_{xTi} \neq 0$.

Определение 1

Параметрическое приближение многопараметровых ФР – это итерационный процесс изменения (вариации) нескольких, но не всех, независимых параметров ФР, например, параметра формы и параметра сдвига¹⁰, осуществляемый по полученным значениям погрешностей ξ_{xi} измерений до выполнения $\Delta\xi$ -критерия согласия.

Определение 2

⁷ «(Три кси)-гипотеза» названа в честь автора, ее выдвинувшего.

⁸ Значение параметра сдвига характеризует время наработки СИ на МО.

⁹ «Дельта кси»-критерий согласия также назван в честь его автора.

¹⁰ для четырехпараметровых ФР Кондратова – Вейбулла

Параметрическое приближение – это процесс получения новой прогнозной кривой, приближенной к кривой базовой многопараметровой ФР, но с новыми значениями параметров, полученными в моменты времени проведения i -й и $i+1$ -й поверок СИ при условии выполнения $\Delta\xi$ -критерия согласия.

Метод динамической нелинейной регрессии является эффективным методом прогнозирования МО СИ. Он позволяет учитывать влияние независимых переменных на весь итерационный процесс прогнозирования и определения параметров и показателей МН СИ.

Динамические регрессионные ВФ-модели МО – сочетание регрессионных моделей, использующих гибкие многопараметровые ФР, с возможностью использования динамических (пространственно-временных) условий, охватывающих разные тенденции изменения значений нормируемых погрешностей, полосы их неопределенности, доверительной вероятности, временных рамок, допустимых граничных условий и т.д. В результате достигается более адекватная (точная) регрессионная ВФ-модель МО.

Данные модели позволяют учитывать разнонаправленные (динамические) действия внешних дестабилизирующих факторов на СИ, приводящие к старению его функциональных блоков и элементов, и, в конечном счете, к изменению МХ СИ в течение времени его использования, хранения и транспортировки.

Динамические регрессионные модели МО СИ устанавливают взаимосвязи между переменными ФР и допускают возможность исследования метрологических задач («сценариев») вида «что, если ...» [15]. В частности, они позволяют создавать и исследовать такие сценарии, как: «что, если изменить условия эксплуатации СИ?», «что, если их ужесточить?», «что, если уменьшить полосу неопределенности погрешности?», «что, если уменьшить время простоя СИ» и т.д. Генерация полного набора таких альтернативных сценариев может помочь метрологам определить эффективную стратегию создания и эксплуатации высоконадежных СИ.

Метрологи всех стран изучают явление МО СИ. Они установили, что истинные законы изучаемого явления обычно неизвестны или известны с некоторой неопределенностью.

Нахождение этих законов связано с характером изменения МХ СИ в течение всего времени его использования, с выбором ВФ-моделей МО СИ с учетом интегральных и дифференциальных вариационных принципов, изучаемых в физике [22, 23].

Применительно к метрологической задаче прогнозирования и определения времени наработки СИ на МО вариационный принцип можно изложить, следуя [22], следующим образом:

Вариационный принцип

Утверждение

Многие законы физики МО могут быть выведены из утверждения, что при истинном развитии исследуемого процесса старения и наработки СИ на МО определенная характеристическая величина (например, погрешность ξ_x) со временем достигает критического (экстремального) значения по сравнению с ее значениями при некоторых других, более ранних, течений процессов наработки СИ на МО. Для математической формулировки этого утверждения вводятся в рассмотрение гибкие многопараметровые функции плотности распределения погрешностей или, например, текущей чувствительности в течение времени наработки СИ на МО, описывающие данные процессы.

Характерной особенностью ФР является то, что они, путем вариации значений параметров формы и сдвига, при неизменных значениях параметров масштаба и смещения, обеспечивают прогнозирование и определение времени наработки СИ на МО, соответствующему критическому значению характеристической величины ξ_x . Те многопараметровые ФР погрешностей в течение времени наработки СИ на МО с установленными значениями параметров ФР, при которых экстремальное значение погрешности достигается и соответствует критическому времени наступления МО, и выражают истинные законы изучаемого явления. Согласно [22], данное утверждение принимается за исходное и названо нами вариационным началом или вариационным принципом МН.

Признавая универсальность вариационных принципов физики и сущность понятия «регрессия», предложенный нами метод назван « T -методом динамической нелинейной регрессии», по определяемому параметру. Дадим несколько определений этому методу.

Определение 1

T -метод динамической нелинейной регрессии – это теоретико-экспериментальный метод исследования состояния СИ и его ВФ-модели МО по МХ, полученным при вводе СИ в эксплуатацию и его поверках, основанный на возвратно-поступательном параметрическом приближении ВФ-модели, соответствующей виртуальному будущему*¹¹, к модели настоящего времени (поверок) и от ВФ-модели, соответствующей текущей поверки в настоящем времени, к реальной модели наработки на МО в будущем.

Определение 2

T -метод динамической регрессии – это совокупность приемов возвратно-поступательного приближения значений параметров формы и сдвига динамической ВФ-модели, характеризующей явление МО СИ, к соответствующим значениям параметров формы и сдвига базовой ВФ-модели, а также приемов оценки достоверности и точности прогнозирования и определения времени наработки на МО по соответствующим уравнениям измерений и уравнениям погрешностей.

Определение 3

¹¹ т.е. значению прогнозного времени наработки СИ на МО

T-метод динамической регрессии – это совокупность приемов возвратно-поступательного приближения к кривой базовой многопараметровой ФР, являющейся ВФ-моделью МО, кривой новой прогнозной ФР с тем же значениями параметров масштаба и смещения¹², полученных на момент времени присвоения класса точности и ввода СИ в эксплуатацию (первая точка), но с изменяемыми (варьируемыми) при каждой поверке значениями параметров формы и сдвига, обеспечивающая выполнение условия прохождения данной кривой еще через две точки, соответствующие двум значениям погрешности, полученным по результатам текущих (последующей и предыдущей) поверок СИ, а также оценку достоверности и точности прогнозирования и определения времени наработки на МО по соответствующим уравнениям измерений и уравнениям погрешности.

Определение 4 (расширенное)

T-метод динамической регрессии – это совокупность приемов возвратно-поступательного приближения друг к другу прогнозных кривых многопараметровой ФР установленного аналитического вида с неизменными и одинаковыми значениями параметра масштаба и параметра смещения, установленными на момент времени ввода СИ в эксплуатацию (первая характеристическая точка начала кривых)) и обеспечивающая: 1) прохождение базовой кривой прогнозной ФР через ранее экспериментально полученные значения погрешности (точки прогнозной или регрессионной кривой) до априори установленного значения прогнозного времени наработки на МО (последняя критическая точка); 2) прохождение каждой последующей прогнозной кривой ФР того же вида только через три известные характеристические точки: первую и две последующие соседние точки, соответствующие результатам текущих (предыдущей и последующей) поверок СИ; 3) оценку достоверности и точности прогнозирования времени наработки на МО по соответствующим уравнениям измерений и уравнениям погрешностей.

Определение 5 (усеченное)

T-метод динамической регрессии – это совокупность приемов возвратно-поступательного приближения (от будущего к настоящему и опять к будущему) значений параметра сдвига прогнозной многопараметровой ФР к его критическому прогнозируемому значению, заложенному в базовой ФР того же вида, а также приемов оценки достоверности и точности прогнозирования времени наработки на МО по соответствующим уравнениям измерений и уравнениям погрешностей.

Определение 6

T-метод динамической регрессии – это совокупность приемов возвратно-поступательного приближения к значению параметра сдвига базовой ФР с установленными значениями параметров значения параметра сдвига аналогичной прогнозной ФР с поочередно изменяемыми значениями параметров формы и сдвига до выполнения условия прохождения кривой через три характеристические точки, – фиксированную (базовую), соответствующую значению нормируемой погрешности, полученному при присвоении СИ класса точности или ввода его в эксплуатацию, и две текущие прогнозные точки, соответствующих значениям нормируемой погрешности, полученным по результатам предыдущей и последующей поверок, а также совокупность приемов, обеспечивающая оценку достоверности и точности прогнозирования времени наработки на МО по соответствующим уравнениям измерений и уравнениям погрешностей.

Определение 7

T-метод динамической регрессии – это совокупность приемов возвратно-поступательного приближения (от поверки к поверке) к местоположению вершины¹³ кривой базовой прогнозной ФР вершин последующих кривых прогнозной ФР, за счет вариации значений параметров формы и сдвига и выполнения $\Delta\xi$ -критерия согласия или условия прохождения прогнозных кривых через три точки, соответствующие, с некоторой неопределенностью, значениям погрешности измерения образцовой ФВ, полученным при присвоении СИ класса точности или ввода его в эксплуатацию и по результатам текущих (предыдущей и последующей) поверок, а также приемов оценки достоверности и точности прогнозирования времени наработки на МО по полученным уравнениям измерений и уравнениям погрешностей.

Определение 8 (лаконичное)

T-метод динамической регрессии – это совокупность приемов, направленная на реализацию 3ξ -гипотезы и $\Delta\xi$ -критерия согласия проф. Кондратова, а также приемов оценки достоверности и точности прогнозирования времени наработки на МО по полученным уравнениям измерений и уравнениям погрешностей.

T-метод динамической регрессии включает в себя ряд этапов (шагов) прогнозирования (по числу поверок), представляющие определенные части итерационного процесса разработки прогнозов о МО СИ и их вероятности. Они характеризуются своими задачами, целями и результатами. Деление на этапы (шаги) связано со спецификой описания объекта прогнозирования (СИ) посредством ВФ-модели МО, обоснованностью прогнозов, дискретностью операций сбора данных, особенностями построения ВФ-модели, с оценкой достоверности и точности определения значений их параметров и т.д.

Отметим, что решение задач динамического прогнозирования и определения времени наработки на

¹² Параметр смещения – это погрешность измерения на момент времени ввода СИ в эксплуатацию или присвоения ему класса точности.

¹³ Вершина – экстремальная точка кривой, соответствующей моменту времени МО СИ. Она соответствует точки касания или пересечения кривой ФР с прямой, характеризующей верхнюю или нижнюю границу допустимой погрешности измерения.

МО может быть поручено некоторой экспертной системе (ЭС). На нее могут быть возложены функции накопления, анализа и обработки различных статистических данных поверок, выбора и построения ВФ-модели МО СИ, составление графических портретов и т.д. ЭС может содержать полный спектр самостоятельной интерпретации гипотез, форм изменений погрешностей от поверки к поверке, исследовать сценарии вида “что, если ...” и выполнять другие функции.

Основные операции T-метода динамической нелинейной регрессии

В основу T-метода динамической нелинейной регрессии положено выполнение следующей совокупности операций или приемов:

1. Определение характера изменения МХ СИ при нелинейной ФП ИК в течение времени наработки на МО с целью определения вида ФР по статистическим данным поверок СИ;
2. Выбор адекватной ФР (базовой или статической ВФ-модели МО) нормируемых погрешностей для каждого СИ или для группы однотипных СИ.
3. Данная ВФ-модель создается априори по прошлым, давно полученным результатам многократных поверок СИ в течении времени наработки на МО или по результатам теоретических расчетов.
4. Создание графического портрета ВФ-модели МО СИ путем построение кривой ФР в объединенной системе шкал: со шкалами «вероятность метрологического отказа» и «нормированная погрешность» и отдельных или совмещенных шкал – «интервальной шкалы времени» и «шкалы календарного времени».
5. Измерение не установленных, а реальных интервалов времени Δt_{pi} между поверками с учетом возможных погрешностей их определения;
6. n -кратные измерения нормированной по значению ФВ x_0 определенного размера в установленные моменты t_{xi} времени очередных поверок. Постоянство числа n измерений является важным аспектом статистического анализа данных;
7. Статистическая обработка результатов измерений с целью определения изменения во времени, например, нормируемой погрешности СИ или чувствительности ФП ИК в течение всего времени наработки СИ на МО;
8. Приближение значений параметра сдвига ФР к прогнозному значению при определенных условиях прохождения кривой прогнозной ФР через три характеристические точки, соответствующие дискретным значениям погрешности в моменты времени t_{x0} , t_{xi} и t_{xi+1} поверок СИ.

Здесь речь идет о ФР, как о непрерывной функции с дискретно задаваемыми значениями аргумента. Осуществляется параметрическое приближение прогнозной кривой ФР $\xi_x(t_x, T_{но}, k_{\phi}, S_{\xi}, \xi_{x0})$ с одними значениями параметров к ФР того же вида, но с другими значениями параметров, – прежде всего за счет вариации значений $T_{но}$ и k_{ϕ} . Прогнозная кривая проходит наиболее близко не ко всем полученным дискретным точкам (т.е. значениям погрешностей в моменты времени t_{xi} проведения поверок СИ), а преимущественно только к первой («начальной») и к последующим двум соседним (смежным) точкам кривой, исключая «критическую» точку в момент времени $t_{xn} = T_{но}$.

9. Проверка выполнения $\Delta \xi$ -критерия согласия проф. Кондратова;

10. Принятие решения по изменению и окончательному установлению новых значений параметров формы и/или сдвига (времени наработки на МО) при выполнении $\Delta \xi$ -критерия согласия для обеих последних точек, – обеспечение нулевого или близкого к нему значения разности погрешностей, практически и теоретически полученной при значениях параметров ФР, установленных при предыдущей поверке. Другими словами осуществляется возвратно-поступательное параметрическое приближение функций;

11. определение скорости изменения нормируемой погрешности (или суммарной чувствительности) за межповерочный интервал $\Delta t_{pi} = t_{x(i+1)} - t_{xi}$. Скорость изменения нормируемой погрешности определяется по уравнению измерений:

$$v(t_{x(i+1)}) = (\xi_x(t_{x(i+1)}) - \xi_x(t_{xi})) / (t_{x(i+1)} - t_{xi}).$$

Определение скорости необходимо для изучения динамики процесса старения СИ поверяемой группы до момента времени наступления МО;

1. Определение динамики значений скоростей изменения погрешностей, практически полученных по результатам предыдущей и последующей поверок;
2. Принятие решения по построению новой прогнозной ВФ-модели МО по результатам очередной поверки;
3. Определение времени наработки на МО и его неопределенности по соответствующим уравнениям измерений и уравнениям погрешностей.
4. Оценка достоверности, точности и эффективности прогнозирования и определения времени наработки на МО и других показателей МН СИ.
5. Составление полного графического портрета ВФ-модели МО и документирование полученных данных по результатам поверок.

Составление графического портрета ВФ-модели МО СИ и определение времени проведения первой поверки

Как отмечалось в [24], для решения задач МН паспорт на СИ должен содержать документ, представляющий собой графический портрет регрессионной ВФ-модели МО СИ. В нем должны быть указаны аналитическое выражение и кривые прогнозных ФР, основное и соответствующие каждой поверке, значения параметров ФР, календарное время проведения первой поверки, рекомендации по проведению последующих поверок (с указанием или без указания календарного времени), значения интервалов времени между поверками, вероятность МО с указанием доверительных границ и другая информация.

Допустим, что для прогнозирования и определения времени наработки СИ на МО используется регрессионная ВФ-модели МО на основе ФР Кондратова – Вейбулла. Ее разновидности, свойства и функциональные возможности описаны в работах [1-4].

Время наработки на МО СИ определенного типа и класса точности отсчитывается с момента времени t_{x0} ($\{t_{xi}\}_{при i=0} = \{t_{x0}\}$) начала использования СИ до момента времени t_{x+T} наступления (наработки) МО. Подчеркнем, что t_x – это интервальное время, отсчитываемое от момента времени ввода СИ в эксплуатацию или присвоения ему класса точности.

Если время t_{x+T} – прогнозируемая величина, то разница между значениями времени t_{x+T} и t_{x0} , т.е. $\{T_{ноп}\} = \{t_{x+T}\} - \{t_{x0}\}$, представляет собой прогнозируемое значение времени наработки на МО.

Предположим, что в результате теоретических исследований на этапе проектирования СИ и прогнозирования показателей МН СИ установлены следующие прогнозные значения параметров ФР: параметр сдвига (время наработки на МО) $T_{но} = 30$ лет, параметр формы $k_{\phi} = 6$, параметр масштаба $S_{\xi} = 1,5$. По результатам присвоения класса точности и начала эксплуатации СИ на момент времени t_{x0} экспериментально было получено отрицательное значение нормируемой погрешности измерения образцовой ФВ, т.е. $\xi_{x0} = -0,25 \pm 0,015$ (с равноудаленной полосой неопределенности $\pm \Delta_{\xi} = \pm 0,15$), установлены верхняя и нижняя границы симметричных доверительных интервалов $\pm \xi_{нд} = \pm 1,25$, нормированных для данного СИ, при заданном значении коэффициента метрологического запаса $k_{мз} = 6$ (обычно $1 \leq k_{мз} \leq 10$) и значение интервала времени между поверками $\Delta t_{п} = 2,5$ года.

На рисунке приведен индивидуальный графический портрет ВФ-модели МО некоторого СИ, в основу которого положена кривая, описываемая метрологической многопараметровой ФР Кондратова – Вейбулла с указанными прогнозными значениями параметров.

Дополнительно отмечено значение момента времени $t_x = 26,7$ лет опасного для дальнейшего использования СИ (рис. 1, точка T на шкале интервального времени, заштрихованная область в окрестности точки $R1$ на кривой 1 и точку U на шкале вероятностных значений меры, соответствующая значению погрешности

$\xi_{x0} = -1,1 \pm 0,15$ и вероятности МО $P_{мо} = 0,9 \pm 0,1$).

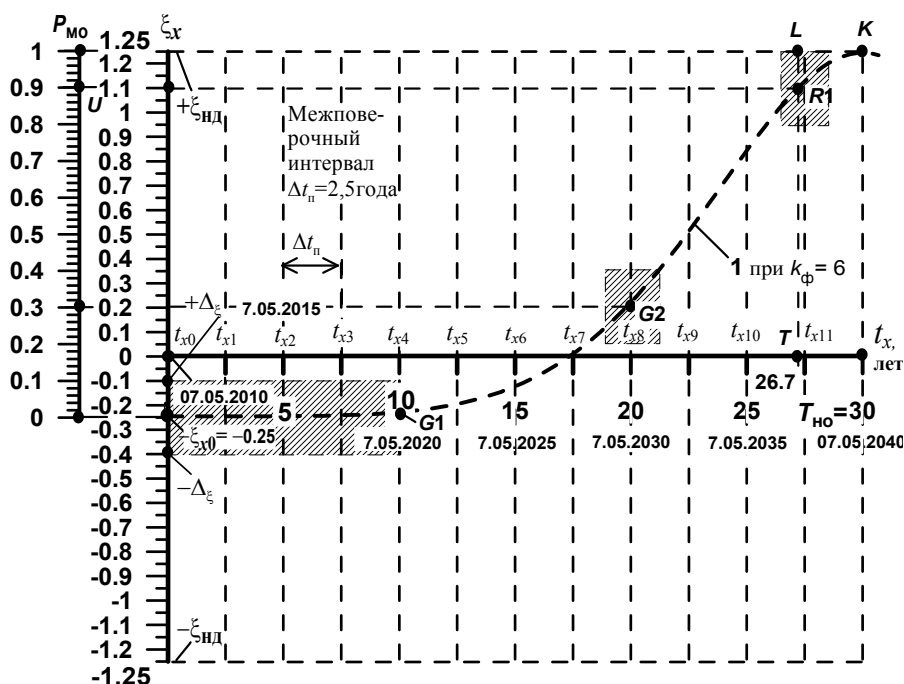


Рис. 1. Графический портрет ВФ-модели МО СИ с использованием ФР Кондратова – Вейбулла

Из приведенной метрологической кривой 1 видно, что в результате получения в момент времени t_{x0} значения погрешности $\xi_{x0} = -0,25 \pm 0,15$ с полосой неопределенности $\pm \Delta_{\xi_0} = \pm 0,15$, МО может наступить уже через 26,7 лет после начала эксплуатации СИ, точнее в интервале времени $\Delta t_{MO} = 30 \text{ лет} - 26,7 \text{ лет} = 3,3 \text{ года}$.

Отметим, что на рисунке приведены все необходимые обозначения в объединенной системе шкал (координат), – со шкалами «вероятность метрологического отказа P_{MO} » и «нормируемая погрешность ξ_x » и отдельными или совмещенными шкалами – «интервальной шкалой времени t_x » и «шкалой календарного времени».

После установления доверительных интервалов $\pm \xi_{нд} = \pm 1,25$ при заданном значении параметра метрологического запаса $k_{M3} = 6$ и определения значения и знака относительной погрешности измерения $\xi_{x0} = -0,25 \pm 0,15$ и одним из известных методов определяется момент времени t_{x1} (при $i = 1$) проведения первой поверки:

$$\{t_{xi}\}_{i=1} = \{t_{x1}\} = \{t_{x(i-1)}\} + \{t_{pi}\}_{\text{при } i=1} = \{t_{x0}\} + \{\Delta t_{п1}\},$$

где $\Delta t_{п1}$ – интервал времени между началом (моментом времени) ввода в эксплуатацию СИ и его первой поверкой.

Различают два подхода к проведению поверок:

- 1) с равными между собой межповерочными интервалами ($\{\Delta t_{п1}\} = \{\Delta t_{п2}\} = \dots = \{\Delta t_{пи}\} = \dots = \{\Delta t_{пn1}\} = \{\Delta t_{п}\}$), где n_1 – число поверок при первом подходе;
- 2) с неравными между собой межповерочными интервалами, т.е. при $\{\Delta t_{п1}\} \neq \{\Delta t_{п2}\} \neq \dots \neq \{\Delta t_{пи}\} \neq \dots \neq \{\Delta t_{пn2}\}$, где n_2 – число поверок при втором подходе.

Первый подход используется в тех случаях, когда необходимо определять темп изменения (показатель сравнительной динамики) и скорость изменения нормируемой погрешности. В работе рассматривается первый подход при $\Delta t_{п} = 2,5$ года, хотя целесообразнее использовать межповерочные интервалы, кратные году [24]. Как рекомендуется в [24], поверки целесообразно проводить в одно и то же время года, в один и тот же день и месяц года. Этим учитывается усредненный по году полный природный цикл влияния внешних дестабилизирующих факторов на СИ.

Перед поверителями всегда стоит выбор – сэкономить затраты на поверку или обеспечить высокую точность определения времени наработки на МО и других показателей МН СИ.

Второй подход предусматривает экономию затрат на проведение поверок в целом при разработанных критериях и методов определения первой и последующих поверок. В этом случае устанавливается оптимальное количество поверок $n_2 < n_1$, не снижающих их качество.

Как видно из приведенного выше графического портрета ВФ-модели МО, при указанной прогнозной ФР проведение первой поверки может быть осуществлено не в запланированный момент времени t_{x1} , а, например, в момент времени t_{x4} , т.е. через 10 лет или даже через 20 лет после ввода СИ в эксплуатацию (см. рисунок, точки $G1$ и $G2$ на кривой). В первом случае вероятность МО $P_{MO1} \leq 0,1$, а во втором – $P_{MO2} = 0,3 \pm 0,1$ (см. рис. 1, заштрихованные фрагменты полосы неопределенности значений погрешностей).

Предположим, что эксплуатация СИ началась 7.05.2010 года в 12 час. 00 мин. (рис. 1). Следовательно, первая поверка будет осуществлена 7.11.2012 года в 12 час. 00 мин., т.е. через 2,5 года.

Межповерочный интервал времени $\Delta t_{п}$ устанавливается, как правило, с погрешностями:

$$\{\Delta t_{пв}\} = \{\Delta t_{п}\} + \{\Delta t_{пв}\}$$

или

$$\{\Delta t_{пн}\} = \{\Delta t_{п}\} - \{\Delta t_{пн}\},$$

где $\{\Delta t_{пв}\}$ – значение погрешности определения межповерочного интервала времени, характеризующее значение верхней (индекс «в») полуширины полосы неопределенности; $\{\Delta t_{пн}\}$ – значение погрешности, характеризующее нижнее (индекс «н») значение полуширины полосы неопределенности.

Говорить о равенстве значений указанных погрешностей не приходится.

Погрешности измерения времени весьма малы и составляют доли секунды. Запланированное календарное время t_{x1} проведения первой поверки, определяемое в годах или часах, зачастую нарушается по производственным причинам или по халатности поверителей (субъективные составляющие погрешности). Другими словами, поверка может быть проведена позже ($\{t_{xi2}\}_{\text{при } i=1} = \{t_{x12}\} = \{t_{x1}\} + \{\Delta t_{пв}\}$) или раньше ($\{t_{xi1}\}_{\text{при } i=1} = \{t_{x11}\} = \{t_{x1}\} - \{\Delta t_{пн}\}$) запланированного времени, например, до или после майских праздников. В этой связи, под погрешностями $\Delta t_{пв}$ и $\Delta t_{пн}$ будем понимать суммарные погрешности определения интервала времени $\Delta t_{п1}$ до начала проведения первой поверки. В общем случае

они не равны между собой и составляют единицы, десятки и сотни часов или $(0,01-10) \%$ от $\Delta t_{\text{п}}$.

Таким образом, вышеизложенное позволяет сделать вывод о возможности определения времени наработки на МО по результатам нелинейного регрессионного анализа МХ СИ.

Подробное описание T -метода динамической нелинейной регрессии приводится в последующих сообщениях.

Выводы

Теория нелинейного регрессионного анализа включает в себя (с 2010 года) два научных направления, связанных с корректным использованием В-моделей и ВФ-моделей исследуемых явлений или процессов.

Положено начало новому научному направлению в регрессионном анализе, основанному на параметрическом приближении функций распределения нормируемых погрешностей, составляющих основу ВФ-моделей явления метрологического отказа.

Впервые показана возможность использования регрессионного анализа в теории метрологической надежности. Приведены основные понятия и определения, связанные с нелинейным регрессионным анализом.

Сформулирована статистическая 3ξ -гипотеза проф. Кондратова, на основе которой разработан T -метод динамической нелинейной регрессии.

Установлен $\Delta\xi$ -критерий согласия, согласно которому в задачах прогнозирования и определения времени наработки на метрологический отказ проверочной статистикой является равенство нулю разности теоретически и практически полученных средних значений погрешности в моменты времени проведения проверок, обеспечивающее проведение прогнозной кривой через три значения погрешностей, полученных в моменты времени t_{x0} , t_{xi} и t_{xi+1} .

Сформулирован вариационный принцип применительно к метрологической задаче прогнозирования и определения времени наработки средства измерения на метрологический отказ, благодаря которому устанавливаются истинные законы изучаемого явления – явления метрологического отказа средства измерений.

Показано, что динамические регрессионные ВФ-модели метрологического отказа представляют собой сочетание возможностей регрессионных моделей, использующих гибкие многопараметровые функции распределения, с возможностью использования динамических (пространственно-временных) условий использования средства измерений, охватывающих разные тенденции изменения значений нормируемых погрешностей и полосы их неопределенности, доверительной вероятности, временных рамок, допустимых граничных условий и т.д.

Динамические регрессионные модели метрологических отказов средств измерений устанавливают взаимосвязи между переменными функции распределения и допускают возможность исследования метрологических задач («сценариев») вида «что, если ...».

Утверждается, что генерация полного набора альтернативных сценариев может помочь метрологам определить эффективную стратегию создания и эксплуатации высоконадежных средств измерений.

В работе представлено восемь определений T -метода динамической регрессии с акцентом на разные его аспекты. Показано, что T -метод динамической регрессии состоит из пятнадцати последовательно выполняемых этапов или шагов.

Утверждается, что решение задач динамического прогнозирования и определения времени наработки на метрологический отказ может быть поручено некоторой экспертной системе, на которую могут быть возложены функции накопления, анализа и обработки различных статистических данных проверок, выбора и построения ВФ-моделей метрологических отказов средств измерений, создание графических моделей и т.д.

Впервые приведена совокупность операций или приемов, положенных в основу метода динамической нелинейной регрессии.

Установлены некоторые особенности выбора времени проведения первой поверки.

Работа представляет интерес для метрологов, ученых и аспирантов, изучающих и решающих проблемы и задачи прогнозирования и определения значений параметров и показателей МН СИ.

Литература

1. Кондратов В. Т. Теория метрологической надежности: функция распределения Кондратова – Вейбулла / В. Т. Кондратов // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2008. – № 3. – С. 101–113.
2. Кондратов В. Т. Теория метрологической надежности: функция распределения Кондратова – Вейбулла и ее основные разновидности / В. Т. Кондратов // Приборостроение: научные труды XI-й Международной научно-технической конференции [«Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики и экономики»]. – М.: МГУ ПИ, 2008. – С. 124–131.
3. Кондратов В. Т. Новая эра развития теории метрологической надежности – функция распределения Кондратова – Вейбулла, ее разновидности, свойства и функциональные возможности / В. Т.

Кондратов // Законодательная и прикладная метрология. – 2009. – № 3. – С. 15– 27.

4. Кондратов В. Т. Расширение функциональных возможностей функции распределения Кондратова-Вейбулла / В. Т. Кондратов // Приборостроение: научные труды XI-й Международной научно-технической конференции [«Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики и экономики»]. – М.: МГУ ПИ, 2008. – С. 138– 145.

5. Кондратов В. Т. Теория метрологической надежности: экспоненциальная функция распределения В.Т. Кондратова и функция распределения Кондратова – Лапласа / В. Т. Кондратов // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2008. – № 6. – С. 43– 55.

6. Кондратов В. Т. Функции распределения погрешностей в течение времени наработки на метрологический отказ и их свойства / В. Т. Кондратов // Сборник докладов V-й международной научно-технической конференции / [под ред. А. А. Данилова]. – Пенза, 2008. – С. 10– 22.

7. Кондратов В. Т. Теория метрологической надежности: функция распределения Кондратова – Коши / В. Т. Кондратов // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2007. – № 2. – С. 23– 31.

8. Кондратов В. Т. Функция распределения Кондратова – Коши и ее свойства / В. Т. Кондратов // Приборостроение: научные труды XI-й Международной научно-технической конференции [«Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики и экономики»]. – М.: МГУ ПИ, 2008. – С. 145– 154.

9. Кондратов В. Т. Расширение функциональных возможностей функции распределения Кондратова – Коши / В. Т. Кондратов // Приборостроение: научные труды XI-й Международной научно-технической конференции [«Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики и экономики»]. – М.: МГУ ПИ, 2008. – С. 154– 160.

10. Кондратов В. Т. Свойства и функциональные возможности экспоненциальных функций распределения нормируемых погрешностей в течение времени наработки на метрологический отказ / В. Т. Кондратов // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2009. – № 1. – С. 57– 65.

11. Пат. 90122 С2. Спосіб визначення часу наробітку на метрологічну відмову засобу вимірювання / Кондратов В. Т. – Бюл. № 7, 2010.

12. Пат. 90129 С2. Спосіб визначення калентарного часу проведення першої повірки засобів вимірювання / Кондратов В. Т. – Бюл. № 7, 2010.

13. Пат. 89519 С2. Спосіб визначення коефіцієнта метрологічного запасу та його поточних прогнозних значень / Кондратов В. Т. – Бюл. № 3, 2010.

14. <http://www.wikiznanie.ru/ru-wz/index.php/>

15. [http://www.machinelearning.ru/wiki/index.php?title= %D0 %A0 %D0 % B5 %D0 %B3 % D1 % 8 % D0 %B5 %D1 %81 %D1 %8 %](http://www.machinelearning.ru/wiki/index.php?title=%D0%A0%D0%B5%D0%B3%D1%8%D0%B5%D1%81%D1%8).

16. <http://dic.academic.ru/dic.nsf/business/11315>.

17. Живописцев Ф. А. Регрессионный анализ в экспериментальной физике / Ф. А. Живописцев, В. А. Иванов. – М.: Изд-во МГУ, 1995. – 208 с.

18. [http://ru.wikipedia.org/wiki/ %D0 %A0 %D0 %B5 %D0 %B3 %D1 %80 %D0 %B5 %](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%B5%D0%B3%D1%80%D0%B5)

19. <http://www.eunnet.net/sofia/07-2005/text/0721.html>.

20. Критерий ω^2 Крамера-Мизеса-Смирнова при простой гипотезе [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://ami.nstu.ru/~headrd/seminar/ non-parametric/2_1_3.htm](http://ami.nstu.ru/~headrd/seminar/non-parametric/2_1_3.htm)

21. Орлов А.И. О критериях согласия с параметрическим семейством [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.newtech.ru/ ~orlov/krit-sogl.htm](http://www.newtech.ru/~orlov/krit-sogl.htm).

22. Трифонов Е. Д. Вариационные принципы в физике [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.astronet.ru/db/msg/1176656/index.html>.

23. Вариационные принципы механики [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.astronet.ru/db/msg/1172894>

24. Кондратов В. Т. Метроника, вероятностно-физические модели метрологических отказов средств измерений и их графические портреты / В. Т. Кондратов // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2010. – № 1. – С. 7– 19.

Надійшла 17.9.2010 р.