



УДК 534:681.5

В.С. Деева, С.М. Слободян
V.S. Deyeva, S.M. Slobodyan

ЭНТРОПИЙНЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ЖИВУЧЕСТИ СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ

EVALUATION OF CONTROL SURVIVABILITY BY ENTROPY METHOD

Ключевые слова: энтропия, оценка, живучесть, хаос, показатель Херста, система.

Установлена связь оценки изменения надёжности отдельных элементов и самой системы или устройства с энтропией как мерой оценки неопределённости состояния систем, вызванных рядом случайных эксплуатационных нарушений их функционирования в процессе практического применения. Интенсивность отказов при эксплуатации оборудования обычно определяется через параметры потока отказов, полученные на основе использования статистической информации фактической работы оборудования и средств контроля и диагностики. Для простейшего пуассоновского потока интенсивность отказов является параметром этого потока и интегральная мера потока изменения свойств оборудования контроля и диагностики как объекта наблюдения на интервале его жизни. Показано, что наиболее полным интегральным отражением зависимости поведения энтропийной, в конечном счёте, энергетической характеристики живучести в принятой системе вероятностных координат может служить площадь, которая ограничена осью абсцисс и кривой распределения вероятности безотказной работы. На ряде примеров, в том числе с привлечением известных в литературе результатов исследований других авторов, показано практическое применение (апробация) рассмотренного в работе подхода формирования энтропийной оценки потенциальных возможностей техники контроля. В работе предположена справедливость показательного (экспоненциального) закона распределения вероятности времени безотказной работы системы. В таком предположении найдено, что диапазон количественных значений энтропийной оценки для разных типов элементов, узлов, устройств и систем лежит в диапазоне интервала изменений значений уровня энтропийного показателя, подобного принятому в оценке особенностей поведения хаотических процессов показателю Херста. Его величина примерно равна величине, которая лежит в интервале значений: $0,1 \leq k_s \leq 0,3$. Конкретное значение энтропийного показателя живучести,

тождественного по смыслу хаотическому показателю Херста, является, хотя и в слабой взаимосвязи, но является функцией условий применения контрольной и диагностической техники в условиях эксплуатации.

Keywords: entropy, evaluation, viability, chaos, Hurst exponent, system.

The connection between the evaluation of changes in the reliability of individual components (or system) with the entropy was revealed. We take entropy as a measure of uncertainty evaluation of the systems states. These states are caused by a number of random operational violations in the practical application. Usually the failure ratio in devices operation is determined by the parameters of the failures flow. They are derived from the statistical information of the actual equipment operation time by control and diagnostics devices. For the simplest Poisson flow the failure ratio is a parameter of this flow and the integral measure of the flow of changing properties of control and diagnostics devices. These devices are targets during their effective life. It is shown that the area bounded by the x-axis and the distribution curve of probability of failure-free operation is the best indicator on the behavior of the entropy (ultimately the energy) characteristics of survivability. It is in the probabilistic system of coordinates. A number of examples, including well-known research results of other authors, the practical applications (testing) of entropy evaluation method on the devices potential is shown. Assuming the validity of an exponential (exponentially) distribution law of failure-free operation probability is expected. Under this assumption, it is found the range of quantitative values of the entropy evaluation for different types of elements, assemblies and devices is in a certain range of the variation interval of the entropy index, such a chaotic Hurst exponent. Its value is approximately equal to the value that is within $0.1 \leq k_s \leq 0.3$. The specific value of the entropy index of vitality is identical to the chaotic Hurst exponent. It is a function of the of use and maintenance conditions although their correlation is weak.

Деева Вера Степановна, к.т.н., доцент, Институт природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет. E-mail: veradee@mail.ru.

Слободян Степан Михайлович, д.т.н., проф., Институт природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет. E-mail: sms_46@ngs.ru.

Deyeva Vera Stepanovna, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Institute of Natural Resources, Natl. Research Tomsk Polytechnic University. E-mail: veradee@mail.ru.

Slobodyan Stepan Mikhaylovich, Dr. Tech. Sci., Prof., Institute of Natural Resources, Natl. Research Tomsk Polytechnic University. E-mail: sms_46@ngs.ru.

Введение

Подходы, методы и средства контроля и диагностики промышленных систем и оборудования представляют собой бурно развивающийся сегмент экономики многих стран. Это обусловлено тем, что техногенные аварии, часто приводящие к масштабным катастрофическим событиям, ярчайший пример – Саяно-Шушенская авария на ГЭС, по степени ущерба могут превышать ущерб от событий, которые обычно относят к стихийным природным явлениям. Они способны вызвать гибель людей и причинить значительные разрушения. Большинство средств и устройств контроля, которые служат для оценки начальных стадий отклонения от нормы параметров различных физических процессов и оборудования, обычно и чаще всего, используют вероятностный аппарат для формирования оценок состояния приборов и средств контроля [1-27]. Несмотря на это проблема разработки подходов и методов обобщенной оценки способности средств контроля к надёжному функционированию и исследования методов оценки текущего, в реальном времени меняющегося состояния средств контроля и диагностики явлений очень важна.

Формирование алгоритма управления работой оборудования и принятия решения автоматикой или управленческим персоналом необходимо для быстрого перераспределения режимов работы и ресурсов систем в экстренных ситуациях. Для решения такой задачи, во многих технических приложениях являющейся стохастической [1-27] по природе своего случайного проявления, могут быть использованы энтропийный подход и соответствующие алгоритмы оценки состояния средств диагностики без использования методов оптимизации [4-6, 9-13, 18].

Приоритет внимания к проблеме надёжности оборудования существует на всех этапах их жизненного пути (проектирования, изготовления и эксплуатации). Поэтому решение этих задач являет собой целый комплекс научно-технических проблем. Теоретическая основа подхода – методика, изложенная в [4-6].

Как показывает анализ литературных источников, проблема оценки оптимального состояния средств контроля решается на уровне отдельных задач, таких как экономия

энергоресурсов, проведение диагностики оборудования, сокращение трудоёмкости технического обслуживания любых технических средств, функционирующих часто, если пользоваться понятием термодинамики, как открытые системы, которые находятся в состоянии непрерывного взаимодействия и взаимного обмена (энергией, веществом, информацией) с окружающей средой. В таких случаях наилучшим подходом и, наверное, наиболее качественным для получения всеобщей меры оценки неопределённости, беспорядка, хаоса, неорганизованности подобного рода вероятностных систем и средств любой природы будет являться вероятностный [4-7], в том числе и энтропийный [9-11], подход, рассматриваемый в настоящей работе в приложении к оценке живучести устройств и систем.

Получение рационального результата связано с решением теоретических, методологических и практических задач обеспечения функциональной надёжности оборудования, учитывая тот факт, что как на стадии проектирования, так и на стадиях последующего применения любого оборудования на практике всегда присутствует элемент неопределённости в принятии конкретных решений, конкретных областей и условий эксплуатации. При этом основной упор в направлении решений подобных задач должен быть сделан на определение оптимального, экономически оправданного, достижимого уровня надёжности, с учётом обеспечения безопасности эксплуатации средств контроля, а также оказанию большего внимания разработке вероятностных методов расчётов, основанных на использовании статистического и экспериментального материала, для нахождения оптимальных решений на стадиях проектирования, изготовления и технической эксплуатации этих средств.

Несмотря на значительное число работ по изучению надёжности, проведение исследований применительно к оборудованию контроля и техники диагностики, с учётом её мобильности и подвижности, по-прежнему является актуальным и имеет существенную и практическую значимость. Это объясняется весьма значительными материальными затратами при её отказах, приводящих к снижению

эффективности средств контроля и установок в целом.

Основные положения оценки вероятностных свойств. Для оценки живучести любого оборудования как технического средства, согласно основам теории вероятности [5, 6], можно записать:

$$P_{\Sigma} = \prod_i P_i \left\{ \begin{array}{l} \leq 1 \\ \geq 0 \end{array} \right\},$$

где P_i – уровни запаса надёжности на соответствующих этапах жизни оборудования (проектной $P_{пр}$, технологической $P_{тех}$, эксплуатационной $P_{экс}$).

В идеальном случае уровень надёжности $P_{\Sigma} \approx 1$; в реальной практике $P_{пр} > P_{тех} > P_{экс}$ и в результате $P_{\Sigma} < 1$ (т.е. на всех последующих стадиях жизни техники уровень надёжности, по сравнению с теоретически заложенной в проекте, будет ниже). Это практически подтверждает факт неизбежного снижения ресурса запаса надёжности на всех последующих стадиях жизни по сравнению с проектным уровнем.

Анализ многочисленных публикаций и статистических исследований [4-6] говорит о том, что снижение ресурса надёжности оборудования является следствием влияния естественных процессов изнашивания, коррозионных и других процессов с электрохимическими и термическими явлениями, приводящих к постепенным и внезапным отказам элементов в эксплуатации. Данные широко известных статистических исследований говорят о том, что для одиночных, мелких серий и крупносерийного оборудования все отказы по причинам отказов делятся на две устойчивые группы: ~30% отказов вызваны эксплуатационными причинами, ~70% – конструктивными и производственными дефектами.

Для того, чтобы связать оценку изменения надёжности отдельных элементов и самой системы или устройства с мерой неопределённости их состояния, вызванного рядом случайных нарушений их функционирования в процессе практической эксплуатации, кратко рассмотрим понятие энтропии как меры оценки неопределённости состояний систем контроля, вызванных такими эксплуатационными нарушениями.

В настоящее время наибольшее распространение [4-6, 10-13, 18] при исследовании любого типа систем как меры неопределённости их состояния получило понятие энтропии, впервые введённое в 1865 г. немецким физиком (основателем термодинамики и молекулярно-кинетической теории теплоты) Клаузиусом Рудольфом Юлиусом Эмануэлем. Величина энтропии, как меры, является оценкой фундаментальных свойств состояния лю-

бых систем, которым, в большей или меньшей мере, присуще неопределённое, неоднозначное, с точки зрения детерминированного описания, вероятностное, то есть не всегда выполняющееся, поведение наблюдаемой системы.

Так, в статистической физике понятие энтропии трактуется как измеримая мера вероятности возможного пребывания наблюдаемой или исследуемой системы в данном состоянии. Взаимосвязь проста. Чем больше беспорядка, тем больше значение энтропии. Но, как в любой энергетически ограниченной системе, траектория состояния любой системы постепенно с течением времени приходит к своему наиболее вероятному положению, отражающему наиболее устойчивое состояние системы. Если в системе, находящейся в этом, кажущемся устойчивым, состоянии возрастает беспорядок, увеличивается хаотичность траектории смены состояний, это означает – растёт энтропия.

Изменение устойчивого состояния системы не является чем-то особенным, более того, нормальным являются непрерывные вариации состояния систем. Это обусловлено тем, что в любых открытых системах в процессе их существования непрерывно идёт обмен (информацией, энергией, веществом и т.д.) с внешней окружающей их средой. При взаимодействии систем (внешняя среда тоже является открытой системой) по причине взаимного обмена энергией значение энтропии систем может не только расти, но и уменьшаться.

Другими словами, значение энтропии любой открытой системы есть функция. Причём она является аддитивной функцией слагаемых порядка и беспорядка. Одно из слагаемых, увеличивающих порядок, представляет собой изменение энтропии, обуславливаемое необратимыми процессами, протекающими внутри самой системы. Второе слагаемое, увеличивающее порядок, – изменение энтропии, обуславливаемое обратимыми процессами обмена системы веществом, энергией и информацией с внешней, окружающей систему, средой.

Модель оценки вероятностных свойств. Распределение времени безотказной работы какого-либо элемента или устройства технической системы, чаще всего [5, 6], подчиняется показательному закону распределения плотности вероятности, точнее, экспоненциальному закону вероятности распределения событий, в том числе и актов контроля. Основным параметром – характеристикой экспоненциального распределения служит параметр λ , который называют плотностью потока или интенсивностью потока однородных событий с произвольным началом отсчёта момента текущего времени. Экспоненциаль-

ному распределению подчиняется, например, величина интервала времени между двумя смежными событиями простейшего потока. Вместе с λ для оценки распределения часто применяют параметр Δ_t – среднее время между моментами наступления двух смежных событий. Их зависимость взаимосвязи проста:

$$\Delta_t = \lambda^{-1}.$$

Математическое ожидание и дисперсия экспоненциального распределения:

$$\bar{x} = \Delta_t = \lambda^{-1};$$

$$D = \sigma^2 = \Delta_t^2 = \lambda^{-2}.$$

Его плотность распределения вероятности

$$f(\Delta_t, \lambda) = \begin{cases} 0 & \text{при } t \leq 0; \\ \lambda e^{-\lambda t} = \Delta_t^{-1} e^{-t/\Delta_t} & \text{при } t > 0 \end{cases}$$

характеристики потока отказов. Поэтому её часто называют частотой отказов.

Функция распределения

$$F(\Delta_t, \lambda) = \begin{cases} 0 & \text{при } t \leq 0; \\ 1 - \lambda e^{-\lambda t} = 1 - \Delta_t^{-1} e^{-t/\Delta_t} & \text{при } t > 0 \end{cases}$$

отражает вероятность того, что очередное событие – сбой или отказ – наступит в интервале времени $[0, t]$.

Отсюда вероятность отсутствия событий сбоя или отказа (т.е. вероятность безотказной работы) в том же временном интервале $[0, t]$:

$$P = \lambda e^{-\lambda t} = \Delta_t^{-1} e^{-t/\Delta_t} \text{ или при}$$

$$t = \Delta_t : P = e^{-t/\Delta_t} \Big|_{t=\Delta_t} = e^{-1} = 0,3679.$$

Другими словами, вероятность безотказной работы не зависит от того, сколько времени работало устройство до момента его использования в данный момент. Это свойство случайной величины, подчиняющейся экспоненциальному распределению (составной части известных законов распределения, многое обобщающих, марковских случайных процессов), обусловлено отсутствием последствия в простейших потоках событий.

Аналогичным образом можно определить математическое ожидание и дисперсию числа x – применений элемента и прибора контроля многократного действия. Вероятность его отказа при j -м использовании, в предположении, что $(j-1)$ -й раз он применялся успешно, равна

$$p_j = (j - \alpha) / j, \text{ где } 0 < \alpha \leq 1.$$

Вероятность того, что элемент будет применён ровно k раз, составит:

$$P[x = k] = \prod_{j=1}^k (1 - p_j) p_{k+1} = \alpha^k (k + 1 - \alpha) / (k + 1) k!$$

Используя методику производящих функций [5, 6], можно найти основные характеристики случайного процесса, отражающего

изменения закономерности значения надёжности – вероятностной меры живучести: математическое ожидание:

$$M[x] = \gamma(1) = e^\alpha - 1$$

и дисперсию:

$$D[x] = e^\alpha (2\alpha + 1) - e^{2\alpha}.$$

Закономерность изменения надёжности на интервале текущей эксплуатации $[0; t]$ обычно представляют показательной функцией вида:

$$P(t) = \exp \left[- \int_0^t \lambda(t) dt \right],$$

где $P(t)$ – вероятность безотказной работы элемента и $\lambda(t)$ – интенсивность потока отказов.

Тогда функция ресурса живучести на интервале Δ_t примет вид:

$$R_s = \int_0^{\Delta_t} \lambda(t) dt.$$

Другими словами, с увеличением Δ_t – продолжительности жизни элемента контроля функция его ресурса R_s растёт и ко времени завершения жизни элемента принимает некоторое, вполне определённое значение: $R_s \rightarrow \max \leq \alpha_{\text{max}}$.

Если принять во внимание трактовки информационного и термодинамического понятий энтропии H , то функцию ресурса живучести R_s в относительной мере измерения можно принять в качестве энтропийной R_H – меры отражения состояния ресурса оборудования контроля, а также при этом меры соответствия вероятности снижения его ресурса или запаса его живучести. Тогда можно записать соотношение физической тождественности этих понятий:

$$R_s \equiv R_H = \{ \leq 1; \geq 0 \}.$$

Это соотношение отражает реальную сущность состояния любого элемента или комплекса элементов любой техники контроля и диагностики. Максимум величины энтропийной меры ресурса живучести достигается к моменту времени его катастрофы (разрушения, деградации), то есть времени выработки элементом своего ресурса жизни (эксплуатации, старения), значение которого устанавливается на стадии его проектирования, являющейся стадией начала жизни.

Другими словами, энтропийная мера ресурса живучести как любая обобщённая вероятностная мера какого-либо устройства будет являться результирующей мерой живучести комплекса элементов и узлов, составляющих это устройство. В конечном счёте,

можно утверждать и энтропийной мерой живучести самого устройства и самой системы.

На начальном этапе эксплуатации элемент обладает наибольшим ресурсом живучести. Степень надежности его высока, потому мера стохастичности – энтропия минимальна или близка к нулевому уровню. Затем, по мере его использования в работе (эксплуатации), ресурс надёжности как меры живучести понижается, при этом вполне естественно, что уровень энтропии повышается в обратной пропорции к понижению степени надёжности. В конечном итоге, к моменту завершения гарантированного эксплуатационного периода (срок службы) надёжность элемента снижается до минимального уровня, что обуславливает резкое снижение вероятности безотказной работы до предельно минимальных значений. Таким образом, мера стохастичности состояния элемента – энтропия – при этом стремится к максимально возможному значению, отражающему завершение эксплуатационного цикла жизни элемента, то есть:

$$H_{s \min} \leq H \leq H_{s \max}.$$

Приняв за основу производную, то получим соотношение

$$dH / dt = \alpha_H \lambda(t).$$

Если считать, что α_H – нормирующий безразмерный коэффициент, то тогда интенсивность потока – параметр изменения свойств наблюдаемого объекта – $\lambda(t)$ является функциональной мерой изменения значения энтропии, отражающей скорость потери живучести элементом.

При этом $\lambda(t)$ – показатель надёжности функционирования элемента, предельное значение которого

$$\lambda(t) \leq \lambda_{np} \quad (t \in [0; T]),$$

есть не что иное, как предельно допустимая интенсивность отказов этого класса элементов, а ΔT – срок функционирования элемента (гарантированное время $T_{ж}$ его жизни).

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ при эксплуатации оборудования обычно определяется через параметры потока отказов, полученные на основе статистической информации фактической работы оборудования. Для простейшего пуассоновского потока отказов $\lambda(t) = \lambda_0(t)$ является параметром этого потока и интегральная мера потока изменения свойств оборудования как объекта наблюдения на интервале его жизни

$$R_s = \int_0^{\Delta T} \lambda_0(t) dt.$$

Решение этого интеграла осуществляется привлечением методов численного интегрирования (например, по формуле трапеций или Симпсона) или упрощёнными методами – путём аппроксимации функции при сложном задании функционала или табличным заданием функции по имеющимся данным об эксплуатации оборудования. Таким образом, результаты реальной эксплуатации, являющиеся ничем иным, как данными статистического эксперимента живучести оборудования, позволяют определить функцию под интегралом, служащую основой отображения параметра потока $\lambda_0(t)$ – зависимости изменения отказоустойчивого поведения оборудования контроля.

Наиболее полным интегральным отражением закономерности поведения энтропийной (энергетической) характеристики живучести в принятой системе вероятностных координат может служить площадь, ограничиваемая кривой распределения вероятности безотказной работы, которую можно обозначить через – $P_{\zeta}(t)$.

В идеальной, безотказной работе оборудования контроля вероятность его безотказной работы равна единице (как максимально возможному значению относительной живучести) на всём интервале времени жизни $T_{ж}$ оборудования. В условиях реальной эксплуатации средств контроля закон распределения плотности вероятности безотказной их работы в большей степени соответствует показательному закону распределения актов отказа. Поведение вероятности безотказной работы является наглядной иллюстрацией того, как широко могут изменяться характеристики типового оборудования или отдельного элемента систем контроля в любой момент времени из-за наличия технологических производственных погрешностей и в течение всего срока эксплуатации (времени жизни прибора) ввиду постепенного износа. Поведение кривой распределения $P(t)$ в начале жизни (эксплуатации прибора) является ярким отражением влияния производственных погрешностей свойственных конструкции системы, оборудования или его элементов. Тренд постепенного износа показывает постепенное ухудшение номинальных характеристик в течение эксплуатации – времени жизни прибора.

На ряде примеров, в том числе и с привлечением известных результатов исследований других авторов [4-27], практического применения (апробации) представленного выше подхода формирования энтропийной оценки потенциальных возможностей техники, найдено, что диапазон количественных значений энтропийной оценки для различных

типов элементов, узлов, устройств и систем лежит в диапазоне интервала изменений уровня энтропийного показателя, подобного хаотическому показателю Херста, примерно равного по величине, лежащей в интервале изменений: $0,1 \leq k_s \leq 0,3$. Величина конкретного значения энтропийного показателя живучести, тождественного по смыслу хаотическому показателю Херста, является, хотя и в слабой взаимосвязи, но является, функцией условий эксплуатации [4-6, 19-20].

Конструктивные и технологические погрешности в каждый конкретный момент времени распределены с определённой плотностью вероятности относительно номинальных значений параметров и отражают особенности характера изменения их как статистических характеристик на интервале времени жизни элемента, прибора и средств контроля.

Заключение

Учитывая проведенный численный анализ и обобщение обширных теоретических и экспериментальных данных, опубликованных в работах разных авторов, по исследованию надёжности широкого спектра отдельных элементов, средств и комплексов оборудования, можно сделать следующее заключение.

На ряде примеров, в том числе и с привлечением известных результатов исследований других авторов, практического применения (апробации) представленного выше подхода формирования энтропийной оценки потенциальных возможностей техники контроля, найдено, что диапазон количественных значений энтропийной оценки для различных типов элементов, узлов, устройств лежит в диапазоне интервала изменений уровня энтропийного показателя, подобного хаотическому показателю Херста, примерно равного по величине значениям, лежащим в интервале изменений: $0,1 \leq k_s \leq 0,3$. Стоит отметить, что результаты расчетов на основании построенной модели достаточно хорошо согласуются с практическими данными, полученными в экспериментах [4, 7-14, 21-27].

Библиографический список

1. Куц В.П., Слободян С.М. Оценка улавливания пыли составной системой // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2014. – № 3 (113). – С. 54-58.
2. Елгина Г.А., Ивойлов Е.В., Слободян С.М. Оценка влияния замыканий в резонансном шунте электрической сети // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2014. – № 10 (120). – С. 119-126.
3. Ивойлов Е.В., Слободян С.М. Принцип золотого сечения в контроле состояния ин-

дуктивности // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2015. – № 1 (123). – С. 142-149.

4. Слободян С.М. Телевизионная диагностика лазерных пучков: монография. – Барнаул: Азбука, 2006. – 224 с. (ISBN 5-93957-161-1).

5. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и её инженерные приложения. – М.: Академия, 2009. – 384 с.

6. Вероятность и математическая статистика: энциклопедия / гл. ред. Ю.В. Прохоров. – М.: Большая российская энциклопедия, 1999. – 910 с.

7. Слободян С.М. Статистически обусловленная пороговая чувствительность сканирующих средств оптического контроля // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307. – № 2. – С. 41-44.

8. Слободян С.М. Следящий оптический фазометр // Известия Томского политехнического университета. – 2003. – Т. 306. – № 6. – С. 101-106.

9. Слободян С.М. Изменение фрактальной размерности при деградации изображения // Измерительная техника. – 2004. – № 8. – С. 56-61.

10. Слободян С.М. Оценка фрактальности отношения сигнал/шум // Измерительная техника. – 2008. – № 1. – С. 3-5.

11. Слободян С.М. Динамика Ферхюльста-парадигма устойчивости телевизионных средств слежения // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 2. – С. 23-27.

12. Слободян С.М. Оптимизация сканирования фазового пространства динамической системой контроля хаотических сред // Измерительная техника. – 2006. – № 1. – С. 3-8.

13. Слободян С.М. Диффузия координат изображения в средствах видеонаблюдения // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 1. – С. 47-50.

14. Деева В.С. Траекторное рассеяние фракций скользящего контакта // Доклады ТУСУРа. – 2010. – № 2 (22). – Ч. 1. – С. 249-254.

15. Деева В.С., Слободян С.М. Динамика изоморфного разрушения скользящего токо-съёма // Энергетик. – 2011. – № 9. – С. 36-38.

16. Слободян М.С., Слободян С.М. Марковская модель живучести подвижного контакта // Контроль. Диагностика. – 2011. – № 2. – С. 61-66.

17. Слободян М.С., Слободян С.М. Марковские модели живучести контактной пары // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2012. – Т. 78. – № 3. – С. 74-78.

18. Деева В.С., Романишина С.А., Слободян С.М. Устойчивость энтропийной оценки живучести систем // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 2. – С. 67-72.
19. Deeva Vera, Slobodyan Stepan. Dynamics of electrical conduction field of the sliding current collector // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 698. – P. 258-263.
20. Elgina Galina, Ivoylov Evgeny, Slobodyan Stepan. Physical modeling of induction internal fault // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 698. – P. 46-1.
21. Букатый В.И., Мищенко Н.И., Слободян С.М., Чапоров Д.П. Измерение распределения интенсивности в поперечном сечении лазерного пучка // Приборы и техника эксперимента. – 1976. – № 2. – С. 166-168.
22. Слободян С.М., Галахов В.Н., Сазанович В.М. Следящая система с диссектором для измерения угловых флуктуаций оптического пучка // Приборы и техника эксперимента. – 1980. – № 4. – С. 192-194.
23. Лукин В.П., Сазанович В.М., Слободян С.М. Случайные смещения изображения при локации в турбулентной атмосфере // Изв. вузов. Радиофизика. – 1980. – № 6. – С. 721-729.
24. Волков В.Ф., Пешель А.К., Слободян С.М., Тырышкин И.С. Регистрация импульсного лазерного излучения фотоприемником на основе матрицы ПЗС // Приборы и техника эксперимента. – 1981. – № 6. – С. 176-178.
25. Слободян М.С., Слободян С.М. Модель динамики электрического контакта // Приборы и системы: управление, контроль, диагностика. – 2010. – № 2. – С. 42-47.
26. Слободян М.С., Слободян С.М. Деструкция тел скользящего контакта // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 318. – № 2. – С. 20-25.
27. Слободян С.М. Смещение изображения в телевизионной динамической системе // Известия вузов. Приборостроение. – 2005. – Т. 48. – № 11. – С. 32-36.
4. Slobodyan S.M. Televizionnaya diagnostika lazernykh puchkov: monografiya. – Barnaul: Azbuka, 2006. – 224 s. (ISBN 5-93957-161-1).
5. Venttsel' E.S., Ovcharov L.A. Teoriya sluchainykh protsessov i ee inzhenernye prilozheniya. – M.: Akademiya, 2009. – 384 s.
6. Veroyatnost' i matematicheskaya statistika: entsiklopediya / gl. red. Prokhorov Yu.V. – M.: Bol'shaya rossiiskaya entsiklopediya, 1999. – 910 s.
7. Slobodyan S.M. Statisticheski obuslovlennaya porogovaya chuvstvitel'nost' skaniruyushchikh sredstv opticheskogo kontrolya // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. – 2004. – Т. 307. – № 2. – С. 41-44.
8. Slobodyan S.M. Sledyashchii opticheskii fazometr // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. – 2003. – Т. 306. – № 6. – С. 101-106.
9. Slobodyan S.M. Izmenenie fraktal'noi razmernosti pri degradatsii izobrazheniya // Izmeritel'naya tekhnika. – 2004. – № 8. – С. 56-61.
10. Slobodyan S.M. Otsenka fraktal'nosti otnosheniya isignal/shum // Izmeritel'naya tekhnika. – 2008. – № 1. – С. 3-5.
11. Slobodyan S.M. Dinamika Ferkhyul'sta – paradigma ustoichivosti televizionnykh sredstv slezheniya // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. – 2006. – Т. 309. – № 2. – С. 23-27.
12. Slobodyan S.M. Optimizatsiya skanirovaniya fazovogo prostranstva dinamicheskoi sistemoi kontrolya khaoticheskikh sred' // Izmeritel'naya tekhnika. – 2006. – № 1. – С. 3-8.
13. Slobodyan S.M. Diffuziya koordinat izobrazheniya v sredstvakh videonablyudeniya // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. – 2006. – Т. 309. – №1. – С. 47-50.
14. Deeva V.S. Traektornoe rasseyanie fraktsii skol'zyashchego kontakta // Doklady TUSURa. – 2010. – № 2 (22). – Chast' 1. – С. 249-254.
15. Deeva V.S., Slobodyan S.M. Dinamika izomorfного razrusheniya skol'zyashchego tokos'ema // Energetik. – 2011. – № 9. – С. 36-38.
16. Slobodyan M.S., Slobodyan S.M. Markovskaya model' zhivuchesti podvizhnogo kontakta // Kontrol'. Diagnostika. – 2011. – № 2. – С. 61-66.
17. Slobodyan M.S., Slobodyan S.M. Markovskie modeli zhivuchesti kontaktnoi pary // Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov. – 2012. – Т. 78. – № 3. – С. 74-78.
18. Deeva V.S., Romanishina S.A., Slobodyan S.M. Ustoichivost' entropiinoi otsenki zhivuchesti sistem // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. – 2013. – Т. 322. – № 2. – С. 67-72.
19. Deeva Vera, Slobodyan Stepan. Dynamics of electrical conduction field of the sliding

References

1. Kuts V.P., Slobodyan S.M. Otsenka ulavlivaniya pyli sostavnoi sistemoi // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2014. – № 3 (113). – С. 54-58.
2. Elgina G.A., Ivoylov E.V., Slobodyan S.M. Otsenka vliyaniya zamykanii v rezonansnom shunte elektricheskoi seti // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2014. – №10 (120). – С. 119-126.
3. Ivoylov E.V., Slobodyan S.M. Printsip zolotogo secheniya v kontrole sostoyaniya induktivnosti // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2015. – №1 (123). – С. 142-149.

current collector // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 698. – P. 258-263.

20. Elgina Galina, Ivoylov Evgeny, Slobodyan Stepan. Physical modeling of induction internal fault // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 698. – P. 46-51.

21. Bukatyi V.I., Mishchenko N.I., Slobodyan S.M., Chaporov D.P. Izmerenie raspredeleniya intensivnosti v poperechnom sechenii lazernogo puchka // Pribory i tekhnika eksperimenta. – 1976. – № 2. – S. 166-168.

22. Slobodyan S.M., Galakhov V.N., Sazanovich V.M. Sledyashchaya sistema s dissektorom dlya izmereniya uglovykh fluktuatsii opticheskogo puchka // Pribory i tekhnika eksperimenta. – 1980. – № 4. – S. 192-194.

23. Lukin V.P., Sazanovich V.M., Slobodyan S.M. Sluchainye smeshcheniya izobrazheniya pri lokatsii v turbulentnoi atmosfere //

Izv. vuzov. Radiofizika. – 1980. – № 6. – S. 721-729.

24. Volkov V.F., Peshel' A.K., Slobodyan S.M., Tyryshkin I.S. Registratsiya impul'snogo lazernogo izlucheniya fotopriemnikom na osnove matritsy PZS // Pribory i tekhnika eksperimenta. – 1981. – № 6. – С. 176-178.

25. Slobodyan M.S., Slobodyan S.M. Model' dinamiki elektricheskogo kontakta // Pribory i sistemy: Upravlenie, kontrol', diagnostika. – 2010. – № 2. – S. 42-47.

26. Slobodyan M.S., Slobodyan S.M. Destruktsiya tel skol'zyashchego kontakta // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. – 2011. – Т. 318. – № 2. – S. 20-25.

27. Slobodyan S.M. Smeshchenie izobrazheniya v televizionnoi dinamicheskoi sisteme // Izvestiya vuzov. Priborostroenie. – 2005. – Т. 48. – № 11. – S. 32-36.

