
УДК 621.37/39.029.3

А.А. АНДРУСЕВИЧ, И.Ш. НЕВЛЮДОВ, А.Н. ДОНСКОВ

**РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МОНИТОРИНГА
ПРОЦЕССОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, ПРОИЗВОДСТВА И
ЭКСПЛУАТАЦИИ ЖЦ РЭС**

Излагаются результаты усовершенствования методов и средств мониторинга производственной среды при изготовлении РЭС в направлении совершенствования систем технического обслуживания технологического оборудования, использующего цифровые системы управления и контроля. Приводятся основы теории и новая концепция мониторинга жизненного цикла РЭС на этапах проектирования, производства и эксплуатации, в основе которой положено отображение информации на основе визуализации процессов. Показывается, что реализация такой концепции является существенным дополнением информационной поддержки жизненного цикла, обеспечивая решение задач принятия решений в условиях неопределенности и включение человека в управление жизненным циклом.

1. Ведение

Современный уровень развития техники характеризуется повышением сложности, наукоемкости, качества техники и появлением в связи с этим новых проблем. Действенным средством решения подобных проблем в последнее десятилетие выступают новые технологии сквозной информационной поддержки сложной наукоемкой продукции на всех этапах ее жизненного цикла (ЖЦ) от маркетинга до утилизации, базирующиеся на моделировании, электронном представлении и использовании информации для обеспечения ЖЦ. Мониторинг, выполняя по своему определению функции по надзору за состоянием объектов, предполагает сбор и обработку информации о ЖЦ и, следовательно, является частью этих технологий.

К числу наиболее важных функций мониторинга, реализуемых в настоящее время, относится контроль и прогнозирование состояния РЭС и процессов обеспечения ее ЖЦ. Для сложных систем, в том числе и ЖЦ РЭС, возникает необходимость принятия решений в ситуации отсутствия формальных методов постановки и решения задач, возникающих в ЖЦ РЭС. Наиболее эффективными становятся человеко-машинные процедуры, основанные на интеллектуальных возможностях систем, реализующих эти процедуры в «диалоге» человека с ЭВМ. Здесь мониторинг, способный отображать суть происходящих в ЖЦ РЭС процессов, и, следовательно, дающий возможность реализовать интеллектуальные возможности для построения математических и логических моделей, становится действенным инструментом обеспечения ЖЦ РЭС.

Таким образом, разработка теоретических основ мониторинга, дающего возможность оценивать и прогнозировать состояние процессов ЖЦ РЭС в условиях отсутствия формальных методов моделирования для обеспечения возможности принятия эффективных решений при поддержке ЖЦ РЭС, является актуальной научно-технической проблемой.

2. Разработка методов мониторинга технологических процессов (ТП) в производстве РЭС

Контроль (наблюдение изображения) монтажных соединений при мониторинге ЖЦ РЭС на этапе производства можно рассматривать как часть технологического процесса, включающего последовательность операций изменения состояния предмета производства (T_i) и операций технического контроля (K_i). Методы рассматриваемого мониторинга встраиваются в систему межоперационного контроля, получаемая информация может быть использована в системе технического обслуживания и профилактики ТП сборки и монтажа РЭС. Совершенствование такой системы [1,2] является необходимым условием улучшения показателей производства, характеризующих стабильность и надежность ТП, отсутствие простоев. Реальные технологические процессы характеризуются необходимостью постоянной настройки режимов и оборудования ввиду наличия большого количества объективных и субъективных факторов, вызванных изменением характеристик исходных материалов и энергоносителей, износом и нестабильностью работы оборудования, технологической оснастки, инструмента, квалификацией исполнителей и т.д.

Появление изображения соединения, не соответствующего эталонному, можно рассматривать как отказ ТП, вызванный его разладкой, уместно в этом случае рассматривать мониторинг как мероприятие по обеспечению показателей безотказности ТП. Задачей, требующей теоретического обоснования, является определение количества и периодичности проверок соединений в соответствии с ограничениями на технико-экономические показатели ТП.

Основная цель регламентных и других профилактических работ, обеспечивающих настройку ТП, – уменьшение параметров потока отказов до их минимальных значений. Интуитивно должно быть ясно, что если бы регламентные работы не уменьшали параметр потока отказов, то в их проведении не было бы смысла.

Все операции можно разделить на несколько групп в зависимости от скорости изменения параметра потока отказов (рис. 1).

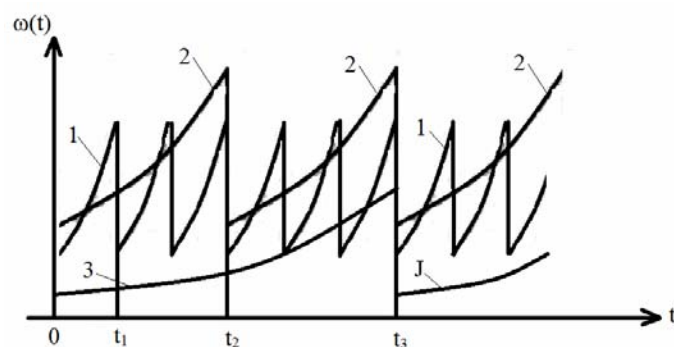


Рис. 1. Изменение параметра потока отказов сгруппированных ТП

К первой группе относятся те ТП, параметр потока отказов которых возрастает до предельно допустимых значений за время наработки t_1 . После выполнения регламентных работ на этих ТП их параметры потока отказов восстанавливаются (кривая 1).

Ко второй группе относятся ТП, параметр потока отказов которых возрастает до предельно допустимых значений за время t_2 (например, $t_2 = 3t_1$, кривая 2). К третьей группе относятся ТП, предельные значения параметра потока отказов которых достигаются за время t_3 , равное, например, $t_3 = 2t_2$ (кривые 3). К нулевой группе можно отнести ТП, параметры потока отказов которых за весь срок эксплуатации остаются постоянными.

Имея данные о характере изменения параметра потока отказов операций (частей) ТП, можно оценить периодичность выполнения регламентных работ (в случае метода техобслуживания по наработке) или работ по контролю состояния ТП. Оценку периодичности выполнения работ целесообразно произвести из условия получения максимального коэффициента работоспособности ТП.

Можно рассмотреть коэффициент работоспособности ТП в виде

$$K_{и} = \frac{t_{н} + t_{пн}}{t_{о}} = 1 - \frac{t_{рр} + t_{в}}{t_{о}}, \quad (1)$$

где $t_{о} = t_{н} + t_{пн} + t_{рр} + t_{в}$; $t_{н}$ – среднее время наработки за время $t_{о}$; $t_{пн}$ – среднее время простоя ТП, сюда входят и подготовительное время; $t_{рр}$, $t_{в}$ – средние времена, затраченные соответственно на регламентные работы и на восстановление ТП; $t_{о}$ – суммарное время (в часах) эксплуатации ТП за рассматриваемый календарный отрезок времени (исключая плановые настройки и восстановление работоспособности ввиду разладки ТП).

Тщательный анализ причин отказов, установление дополнительных операций контроля и соответствующих результатам контроля профилактических операций иногда могут обеспечить снижение уровня параметра потока (интенсивности) отказов. В данном случае речь идет не об оптимальном межрегламентном периоде, а о выполнении профилактических работ в зависимости от состояния ТП.

Для расчета потока отказов (интенсивности) ТП необходимо определить плотность вероятности распределения времени до отказа $f(t)$.

Будем рассматривать процесс изменения состояния ТП (имеется в виду совокупность технологических операций) как однородный, т.е. с постоянной средней скоростью и постоянным средним квадратическим отклонением скорости или постоянным коэффициентом вариации скорости изменения наблюдаемого в процессе мониторинга параметра (особенности геометрии поверхности). В таком случае кинетическое уравнение процесса можно записать в виде

$$dx(t) = adt + bd\eta(t), \quad (2)$$

где a – коэффициент сноса (средняя скорость изменения параметра, наблюдаемого в процессе проверок); b^2 – средняя скорость изменения дисперсии параметра.

Если марковский процесс определяется уравнением вида (2), то условная переходная плотность $w(t_0, x_0; t, x)$ этого процесса описывается уравнением Фоккера-Планка-Колмогорова следующего вида:

$$\frac{\partial w(t_0, x_0; t, x)}{\partial t} + a \frac{\partial w(t_0, x_0; t, x)}{\partial x} - \frac{b^2}{2} \frac{\partial^2 w(t_0, x_0; t, x)}{\partial x^2} = 0. \quad (3)$$

Тогда плотность распределения времени достижения границы изучаемым процессом – плотность распределения времени до отказа имеет следующую связь с условной плотностью перехода процесса из одного состояния в другое:

$$f(t) = - \int_{-\infty}^1 \frac{\partial w(t_0, x_0; t, x)}{\partial t} dx. \quad (4)$$

Чтобы определить плотность вероятности распределения времени до отказа $f(t)$, необходимо получить выражение для $w(t_0, x_0; t, x)$, решив уравнение (3), затем найти частную производную по времени от функции $w(t_0, x_0; t, x)$ и полученное выражение проинтегрировать по параметру x .

Если реализации имеют немонотонный характер, то после первого достижения границы заданной области (физически это соответствует отказу и снятию наблюдения) немонотонная реализация может снова возвратиться в заданную область и участвовать в наблюдаемом процессе.

Для того чтобы первое достижение границы немонотонной реализацией моделировало отказ и дальнейшая реализация не участвовала в наблюдаемом процессе и не влияла на $w(t, x)$, необходимо на границе заданной области поставить граничное условие типа «поглощающий экран». В таком случае любая реализация, впервые достигнув его, навсегда остается на границе, вне заданной области.

Поскольку выше было установлено, что реализации процесса могут иметь немонотонный характер, в качестве граничных условий при решении уравнения (3) принимаются условия

$$w(t, x) \Big|_{x=-\infty} = 0, \quad (5)$$

$$w(t, x) \Big|_{x=1} = 0. \quad (6)$$

Первое граничное условие (5) чисто формально. Поскольку изучаемый процесс (определяющий параметр изделий) не может принимать отрицательных значений, установленная левая граница является недостижимой (естественной) и никак не влияет на процесс в заданной области. Принятие формального условия (5) необходимо для решения уравнения (3). Граничное условие (6) вытекает из приведенных соображений и соответствует поглощающему экрану в точке $x=1$.

Решение уравнения (3) для краевых условий (4) – (6) и последующие оценки распределения параметров отказов и расстроек ТП можно найти в

$$w(t, x) = \frac{1}{b\sqrt{2\pi t}} \left[e^{-\frac{(x-at)^2}{2b^2 t}} - e^{-\frac{(x-at-2)^2 - 4at}{2b^2 t}} \right]. \quad (7)$$

Вычислим производную

$$\begin{aligned} \frac{\partial w(t, x)}{\partial t} &= \frac{(x^2 - a^2 t^2 - b^2 t)}{2b^3 t^2 \sqrt{2\pi t}} e^{-\frac{(x-at)^2}{2b^2 t}} - \\ &- \frac{[(x-2)^2 - a^2 t^2 - b^2 t]}{2b^3 t^2 \sqrt{2\pi t}} e^{-\frac{(x-at-2)^2 - 4at}{2b^2 t}}. \end{aligned}$$

Подставив последнее выражение в (5), проинтегрируем и получим выражение для плотности распределения времени до первого отказа:

$$f(t) = - \int_{-\infty}^1 \left\{ \frac{(x^2 - a^2 t^2 - b^2 t)}{2b^3 t^2 \sqrt{2\pi t}} e^{-\frac{(x-at)}{2b^2 t}} - \frac{[(x-2)^2 - a^2 t^2 - b^2 t]}{2b^3 t^2 \sqrt{2\pi t}} e^{-\frac{(x-at-2)}{2b^2 t}} \right\} dx.$$

Окончательно выражение для плотности распределения времени до отказа ТП

$$f(t) = \frac{1}{bt\sqrt{2\pi t}} e^{-\frac{(1-at)^2}{2b^2 t}}. \quad (8)$$

Полученное распределение может быть использовано для описания расстройки ТП при нелинейном изменении среднего значения параметра. При этом неоднородный процесс квантуется на однородные участки и время выхода за предельный уровень получается в результате свертки времени наработки на линеаризованных участках.

Например, процесс расстройки позволяет выделить два однородных участка. На первом участке до наработки некоторого условного значения параметра процесс протекает со средней скоростью a_1 и коэффициентом вариации v_1 . При этом время наработки на первом участке имеет некоторую случайную величину T_1 . Далее, до разрушения процесс имеет характеристики a_2 и v_2 . Время наработки на втором участке составляет случайную величину T_2 . Тогда, при условии независимости времени наработки на линеаризованных участках, распределение времени общей наработки $t = T_1 + T_2$ примет следующий вид:

$$f^*(t) = \int_0^{\infty} f(t-T_1)f(T_1)dT_1, \quad (9)$$

где $f(T_1) = \frac{1}{v_1 T_1 \sqrt{2\pi a_1 T_1}} e^{-\frac{(1-a_1 T_1)^2}{2v_1^2 a_1 T_1}}$ – плотность распределения наработки T_1 на первом

участке; $f(T_2) = f(t-T_1) = \frac{1}{v_2 T_2 \sqrt{2\pi a_2 T_2}} e^{-\frac{(1-a_2 T_2)^2}{2v_2^2 a_2 T_2}}$ – плотность распределения наработки

T_2 на втором участке.

Математическое ожидание распределения (9)

$$M[T] = \frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} = \frac{a_1 + a_2}{a_1 a_2}. \quad (10)$$

Дисперсия искомого распределения (9)

$$D[T] = \frac{v_1^2}{a_1^2} + \frac{v_2^2}{a_2^2}. \quad (11)$$

Можно рассмотреть монотонное течение процесса расстройки. Если процесс имеет монотонные реализации, то первое пересечение границы любой реализацией будет одновременно и последним, т.е. реализация в дальнейшем уже больше никогда и никак не будет влиять на наблюдаемый процесс. Это означает, что нет необходимости в установлении каких-либо условий на границе заданной области. В связи с последним в качестве граничных условий принимаются

$$w(t, x) \Big|_{x=-\infty} = w(t, x) \Big|_{x=+\infty} = 0. \quad (12)$$

Границы (12) являются недостижимыми для изучаемого процесса и никак не влияют на процесс в заданной области. Это чисто формальные граничные условия, необходимые для решения уравнения (3).

В качестве начального условия используется (4). Аналогично без потери общности приняты нулевые начальные условия ($t_0 = 0, x_0 = 0$).

Решение уравнения (3) с краевыми условиями (12) записывается в виде

$$w(t, x) = \frac{1}{b\sqrt{2\pi t}} e^{-\frac{(x-at)^2}{2b^2 t}}. \quad (13)$$

Математическое ожидание

$$M\{T\} = (1/a)(1 + v^2/2). \quad (14)$$

Дисперсия

$$D\{T\} = (v^2/a^2)(1 + 5v^2/4). \quad (15)$$

Полученные распределения позволяют вычислить зависимость интенсивности отказов от времени. Кривые интенсивностей монотонных $\lambda_1(t)$ и немонотонных распределений $\lambda_2(t)$ начинаются с нуля, т.е. $\lambda_1(0) = \lambda_2(0) = 0$. Определим поведение интенсивностей при $t \rightarrow \infty$:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \lambda_1(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \lim_{t \rightarrow \infty} \left[\frac{\partial \ln f(t)}{\partial t} \right] = \frac{a}{2v^2}.$$

Основным вопросом, возникающим при обработке опытных данных, является оценка параметров распределений. Они могут быть вычислены как на основе статистики отказов, так и на основе физических характеристик процессов расстройки ТП, а также путем совместного использования обоих типов информации.

3. Практические приложения результатов исследований

Унифицированный комплекс мониторинга цифровых модулей систем ЧПУ.

Были апробированы в производстве РЭС разработанные средства мониторинга технологической среды, которые позволяют наблюдать состояния систем ЧПУ. Основными характеристиками средств мониторинга являются: использование усовершенствованных устройств предварительной обработки информации; применение устройств сжатия диагностической информации; модификация алгоритмов обработки диагностической информации на основе идей последовательного анализа; построение гибких автоматизированных систем диагностики и контроля на основе мультипроцессорных систем с развитыми интерактивными средствами и возможностью модификации.

В связи с этим апробация проведена в направлении проверки информационного, математического и программного обеспечения комплекса диагностики и контроля, обеспечивающего оптимизацию процесса поиска дефектов. Выполненное при этом моделирование необходимо, так как фактически ни одна микропроцессорная система ЧПУ, применяемая в технологическом оборудовании, не имеет исчерпывающего математического описания.

При моделировании микропроцессорных систем использовалось три уровня описания: алгоритмический; функциональный; вентильный.

Такая последовательность, как показала практика, является наиболее оптимальной с точки зрения снижения трудоемкости и уменьшения временных характеристик процесса мониторинга систем ЧПУ.

Для мониторинга таких систем апробировано создание целостного технологического процесса контроля и прогнозирования цифровых систем технологического оборудования. При таком подходе значительно (в 10-12 раз) снижается трудоемкость мониторинга, уменьшается вероятность появления ошибок, существенно снижается стоимость аппаратных средств диагностики, понижается себестоимость процесса контроля. Определена возможность реализации процесса мониторинга цифровых модулей систем СУТО в условиях полной или частичной неопределенности при высокой сложности объекта мониторинга.

Апробация проводилась на цифровых модулях следующих систем УЧПУ: 2C42, НЦ-31, BOSCH CC-300, CNC-600, ELSA-1000, SINUMERIC-8.5M, SIMATIC-S5. Она показала существенное увеличение эффективности процесса обнаружения неработоспособного состояния цифровых модулей с применением разработанных методов. При этом трудоем-

кость процесса с применением разработанного унифицированного комплекса диагностики и контроля снизилась в 3,6 раза.

Разработанные теоретические основы мониторинга позволили создать новые эффективные технологии производства и контроля РЭС [3-7], усовершенствовать систему технического обслуживания и профилактики ТП, которая обеспечивает своевременную настройку ТП, уменьшая тем самым простои и количество брака. Усовершенствование осуществлено в направлении создания аппаратного, математического и программного обеспечения приведенных ниже подсистем.

Подсистема повышения надежности ТП. Основные функции подсистемы: обработка статистической информации о расстройках и отказах; оценка реального технического состояния и надежности ТП; выбор теоретической модели надежности и системы на основе информации, получаемой в процессе функционирования ТП.

Подсистема первичной обработки статистической информации для сортировки и накопления статистических данных о работе ТП. Входными данными подсистемы являются компоненты информационного вектора, поступающего из диагностической зоны мониторинга ТП, а именно: технологическая операция и связанные с ней оперативные характеристики. Разработанное математическое и программное обеспечение осуществляет формирование общих данных о расстройках режимов, отказах и сбоях оборудования и оснастки. Граф-схема алгоритма программы представлена на рис. 2.

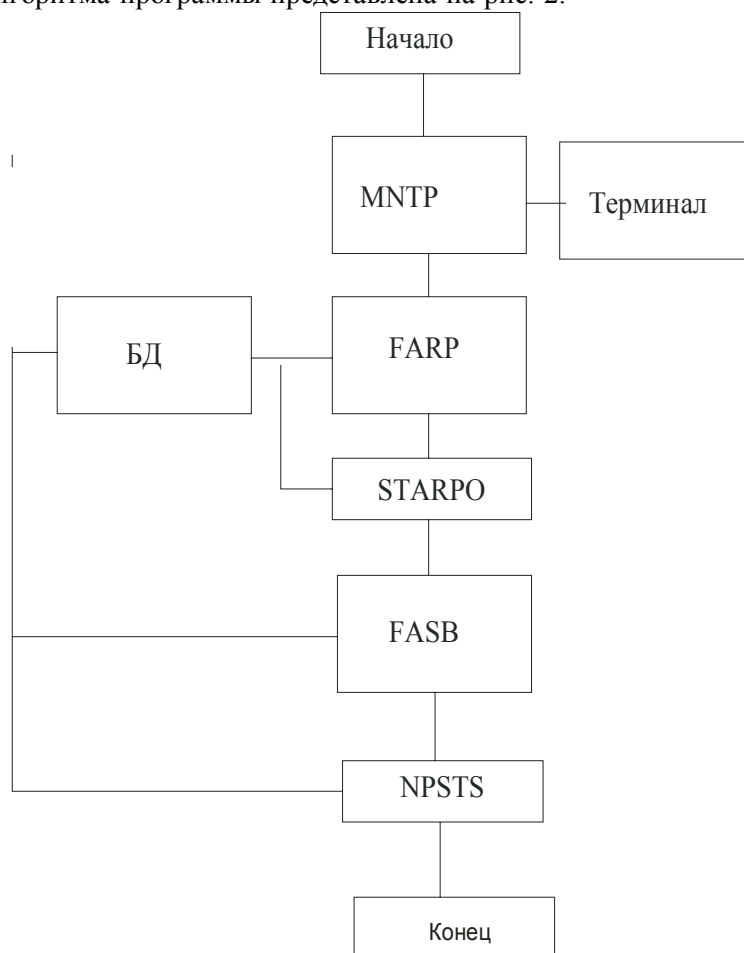


Рис. 2. Граф-схема алгоритма программы обработки статистической информации

В подсистеме выбора модели и прогнозирования расстройк ТП осуществляется анализ наиболее адекватной теоретической модели, описывающей изменение характеристик ТП. В качестве исходных данных используется информация, содержащаяся в БД, созданных предыдущими подсистемами. Здесь решаются следующие задачи: оценка характеристик выборочного распределения отказов (расстройк); оценка параметров и характеристик

конкурирующих теоретических моделей; вычисление обобщенного критерия согласия теоретической модели с эмпирическими данными; выбор наиболее адекватной теоретической модели. Работа программы начинается с ввода номера ТП, статистика отказов (расстроек) которого будет подвергнута анализу. Если имеется состоятельная статистика ($n > 15$), то для оценки характеристик выборочного распределения оцениваются параметры эмпирической функции изменения и прогнозирования характеристик ТП.

4. Выводы

Усовершенствованы методы и средства мониторинга производственной среды при изготовлении РЭС в направлении совершенствования систем технического обслуживания технологического оборудования, использующего цифровые системы управления и контроля. Приведены основы теории и новая концепция мониторинга жизненного цикла РЭС на этапах проектирования, производства и эксплуатации, в основе которой положено отображение информации на основе визуализации процессов. Показано, что реализация такой концепции является существенным дополнением информационной поддержки жизненного цикла, обеспечивая решение задач принятия решений в условиях неопределенности и включением человека в управление жизненным циклом.

Апробация показала существенное увеличение эффективности процесса обнаружения неработоспособного состояния цифровых модулей с применением разработанных методов. При этом трудоемкость процесса с применением разработанного унифицированного комплекса диагностики и контроля снизилась в 3,6 раза. Разработанные теоретические основы мониторинга позволили создать новые эффективные технологии производства и контроля РЭС, усовершенствовать систему технического обслуживания и профилактики ТП, которая обеспечивает своевременную настройку ТП, уменьшая тем самым простои и количество брака.

Список литературы: 1. Андрианов А.С. Ремонтное обслуживание промышленного оборудования на основе корпоративной информационной системы // Вестник саратовского государственного технического университета. 2009. Вып. 1, №2 (38). С. 187-192. 2. Андрианов А.С. Процессный подход к управлению техническим обслуживанием и ремонтом промышленного оборудования // Сб. научных трудов «Труды соискателей и аспирантов». Саратов. Научная книга. 2008. С. 19-35. 3. Андрусевич А.А., Невлюдов И.Ш. Оценка технологических свойств основных и вспомогательных материалов в производстве электронной техники / Вісті Академії інженерних наук України. Харків: «ХАИ», 2004. №4(24). С. 120-124. 4. Андрусевич А.А., Невлюдов И.Ш., Второв Е.П. Оценка физико-химической активности материалов для монтажа электронной техники. Науч.-техн. журнал. «Технология приборостроения» 2004. № 1. С. 32-37. 5. Андрусевич А.А., Невлюдов И.Ш., Жупинский В.А. Исследование показателей качества монтажных материалов // Технология приборостроения. 2004. №2. С. 24-29. 6. Андрусевич А.А., Невлюдов И.Ш., Роздоловский Ю.М., Второв Е.П., Сотник С.В. Оценка свойств материалов, образующих монтажные соединения электронной техники // Технология приборостроения. 2005. №2. С. 51-59. 7. Андрусевич А.А., Невлюдов И.Ш., Стародубцев Н.Г., Роздоловський Ю.М. Залучення засобів технічного зору для технологічного моніторингу монтажних з'єднань у виробництві електронної техніки // Науково-технічний та громадянський часопис Президії Академії інженерних наук України Вісті Академії інженерних наук України. Харків: «ХАИ», 2006. № 3(30). С. 167-172.

Поступила в редколлегию 02.09.2011

Андрусевич Анатолий Александрович, директор Криворожского авиационного колледжа. Научные интересы: технология приборостроения, мониторинг процессов изготовления радиоэлектронных систем, проблемы повышения надежности функционирования радиоэлектронных систем. Адрес: Украина, 50045, Кривой Рог, ул. Туполева, 1, тел. (0564) 27-56-79. E-mail: uchebotdel@kk.nau.edu.ua

Невлюдов Игорь Шакирович, д-р техн. наук, проф., зав. каф. ТАПР ХНУРЭ. Научные интересы: технология приборостроения, гибкие производственные системы, робототехника. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (057) 702-14-86. E-mail: tapr@khture.kharkov.ua

Донсков Александр Николаевич, аспирант каф. ТАПР ХНУРЭ. Научные интересы: технология приборостроения, технология микроструктурированных оптических волокон. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (057) 702-14-86. E-mail: tapr@khture.kharkov.ua