

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИНДИВИДУАЛЬНОГО РЕСУРСА ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**Нагорный В. В.** – канд. техн. наук, ст. пр. кафедры компьютерных наук секции информационных технологий проектирования, Сумский государственный университет, Сумы, Украина.

**Лавров Е. А.** – д-р техн. наук, профессор кафедры компьютерных наук секции информационных технологий проектирования, Сумский государственный университет, Сумы, Украина.

**Чибирик Я. И.** – канд. техн. наук, доцент кафедры компьютерных наук секции информационных технологий проектирования, Сумский государственный университет, Сумы, Украина.

### АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** В статье изложены результаты исследований по разработке новой методологии прогнозирования индивидуального ресурса технических систем, что является злободневной, но так и не решенной до сих пор проблемой, особенно для малосерийных или изготовленных в единичных экземплярах объектов контроля. Данное обстоятельство и определяет актуальность изложенного в статье материала.

**Цель.** Целью работы является разработка новой методологии прогнозирования индивидуального ресурса технических систем, в том числе уникальных и малосерийных.

**Метод.** Предложена новая методология прогнозирования индивидуального ресурса технических систем, основанная на идентификации модели тренда контролируемого параметра, выполняемой по результатам регулярного мониторинга технического состояния разнообразного промышленного оборудования, в том числе мало серийного или изготовленного в единичных экземплярах. Один из определяемых в процессе идентификации коэффициентов модели численно равен искомому ресурсу. По известной величине ресурса и измеренному значению контрольного параметра рассчитывается значение лингвистической переменной, по результатам сопоставления которой со стандартным набором вербальных величин – «термов» принимается решение о степени критичности технического состояния подконтрольного оборудования.

**Результаты.** Методология прогнозирования индивидуального ресурса и оценки на основе этого степени критичности технического состояния промышленного оборудования, в том числе уникального и малосерийного оборудования, была реализована в программном продукте и использована при оценке степени критичности гидротурбины – типичного представителя малосерийных изделий.

**Выводы.** Проведенные эксперименты подтвердили ожидаемую эффективность методологии прогнозирования индивидуального ресурса и работоспособность созданного на ее основе программного обеспечения, что позволяет рекомендовать методологию и программный продукт для практического использования при решении задач прогнозирования ресурса и диагностики технического состояния разнообразного промышленного оборудования. Перспективы дальнейших исследований состоят в аппаратной реализации на базе стационарных, мобильных и встраиваемых системы контроля разработанной методологии прогнозирования индивидуального ресурса механических систем.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** индивидуальный ресурс, критическое состояние, прогноз ресурса, идентификация, тренд контролируемого параметра, модель тренда, состояние поднадзорного оборудования.

### НОМЕНКЛАТУРА

$A(\tau)$  – фактическое значение контролируемого параметра;

$A(\tau_0)$  – фактическое значение контролируемого параметра на момент его первого измерения;

$A_p$  – расчетное значение контролируемого параметра;

$m$  – количество сравниваемых пар расчетных и фактических значений контролируемого параметра;

$\tau$  – наработка технической системы на момент контроля ее технического состояния;

$\tau_0$  – наработка технической системы на момент первоначального контроля ее технического состояния;

$T_{IP}$  – прогнозируемое значение индивидуального ресурса технической системы;

$T_{OCT}$  – индивидуальный остаточный ресурс технической системы;

$T_{\Phi}$  – фактический ресурс гидротурбины;

$T_{OCT}^{\Phi}$  – фактический остаточный ресурс гидротурбины;

$T_{OCT}^{IP}$  – прогноз остаточного ресурса гидротурбины;

$a_{COST}$  – лингвистическая переменная «показатель состояния»;

$\alpha, \beta, \gamma, \lambda$  – показатели степени;

$a_{\text{ЭКС}}$  – параметр, количественно описывающий условия эксплуатации технической системы;

$a_{\text{СВ}}$  – параметр, количественно описывающий свойства (потенциал) технической системы;

$K_A$  – отношение текущего и исходного уровней контролируемого параметра;

$K_T$  – отношение текущей наработки и прогнозируемой наработки технической системы до исчерпания ее ресурса;

$\nu$  – коэффициент вариации.

### ВВЕДЕНИЕ

Проблема предупреждения отказов и снижения техногенных рисков приобретает особую актуальность применительно к техническим объектам ответственного назначения, отказы которых связаны с

большими материальными потерями или катастрофическими последствиями.

Как правило, это сложные системы, изготавливаемые в небольшом количестве, эксплуатируются в отличающихся условиях и реализуют экстремальные технологии. Решение задачи предотвращения отказов подобных систем в значительной степени зависит от возможности мониторинга и прогнозирования их технического состояния или индивидуального ресурса.

Эта задача решается путем мониторинга в процессе эксплуатации величины индивидуального ресурса и прогнозирования на этой основе изменения технического состояния для снижения риска возникновения аварий и катастроф.

**Объектом исследования** является процесс технической диагностики технических систем, изготовленных малыми сериями или в единичных экземплярах, основывающийся на прогнозе их индивидуального ресурса.

Для эффективного прогнозирования необходимо проводить периодический, а в отдельных случаях, и непрерывный мониторинг величины контролируемого параметра. Это объясняется тем, что по мере увеличения объема исходных для прогноза данных увеличивается точность и достоверность прогноза.

**Предметом исследования** являются методы прогнозирования ресурса технических систем, изготовленных малыми сериями или в единичных экземплярах.

Известные методы прогнозирования [1–6] основываются на аппроксимации экспериментальных данных определенной аналитической зависимостью с последующей аппроксимацией до момента пересечения ее графика с предельно допустимым по нормам уровнем контролируемого параметра. Принятие решения осуществляется путем непосредственного сравнения контролируемых параметров с границами области работоспособности. Степень их удаленности от границ допустимых изменений в момент контроля используется для оценки текущего значения индивидуального ресурса. При отсутствии норм подобные оценки невыполнимы.

**Целью работы** является определение индивидуального ресурса объектов контроля по результатам мониторинга тренда контролируемого параметра.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- определить индивидуальный ресурс технической системы в момент контроля ее состояния;
- оценить техническое состояние системы в заданный момент времени;
- прогнозировать изменения технического состояния до момента достижения его предельно допустимых характеристик;
- выбрать стратегию эксплуатации, гарантирующую сохранение работоспособности в течение заданного срока использования поднадзорного оборудования.

## 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Задача повышения точности и достоверности прогнозирования индивидуального ресурса технических систем решается путем параметрической идентификации модели тренда контролируемого параметра. Тренд, отражая основную тенденцию изменения (динамику) временного ряда, составляется по результатам регулярного измерения величины контролируемого параметра.

Модель тренда разработана таким образом, что значение искомого ресурса численно равно одному из ее коэффициентов, определяемых в процессе указанной идентификации.

Получаемый при этом прогноз обеспечивает в течение всего межремонтного периода заблаговременное определение с высокой точностью и достоверностью индивидуального ресурса технической системы, не используя при этом статистику о пороговых значениях контролируемого параметра.

## 2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Начало решению проблемы прогнозирования индивидуального ресурса разнообразных технических систем, в том числе изготовленных малой серией, положили работы [1–3], согласно которым в процессе эксплуатации подобных по классу объектов контроля осуществляют сбор статистической информации о предельно допустимом интервале изменения контролируемого параметра. Далее в процессе эксплуатации оборудования проверяют принадлежность прогнозируемого значения контролируемого параметра к допустимому интервалу его изменения и в случае его вхождения в допустимый интервал объект считают работоспособным, в противном же случае – фиксируют его будущий отказ.

Недостаток данного способа, особенно по отношению к уникальным изделиям, или изделиям, изготавливаемым малыми сериями, очевиден и заключается в невозможности составить достаточно представительную статистику их отказов, определив на этой основе с необходимой степенью достоверности допустимый интервал изменения контролируемого параметра.

В работе [4], посвященной контролю технического состояния судового оборудования, предложено определять параметры линейного уравнения, описывающего тренд логарифма уровня вибрации оборудования. При этом в качестве искомого ресурса рассматривалась наработка оборудования до момента пересечения тренда с предельно допустимым уровнем вибрации  $A_{\text{пр}}$ .

В случае отсутствия необходимой по объему статистики было предложено применять «правило 6 дБ», согласно которому в качестве предельного принимается уровень вибрации  $A_{\text{пр}}$ , превышающий на 6 дБ исходный  $A(\tau_0)$ , имевший место в момент начала эксплуатации оборудования, когда, как полагается, оно было заведомо исправно. При переходе к абсолютным величинам это означает, что согласно «правилу 6 дБ» между исходным  $A(\tau_0)$  и предельно допустимым  $A_{\text{пр}}$

уровнями вибрації існує наступне співвідношення:  $A_{ПР} \approx 2 \cdot A(\tau_0)$ .

Недостаток даного способу заключається в тому, що «правило 6 дБ», являясь суцільно оціночним, не забезпечує необхідну ступінь достовірності і надійності при визначенні індивідуального предельно допустимого рівня навантаження для конкретного зразка виробу.

Дальніші шляхи рішення даної проблеми на прикладі прогнозування ресурсу центробіжних насосів показані в роботі [5], де результати вимірювання вібрації корпусу насоса представляються в вигляді тренда, описуючого тенденцію зміни амплітуди вібрації за час експлуатації насоса.

Сучасне напрямлення в прогнозуванні ресурсу машин, назване тренд-аналізом [6], дозволяє оцінити ймовірність відхилень контролюваних параметрів від значень, що відповідають справному стану піднаглядного обладнання. При виявленні трендів виконується прогнозування технічного стану з метою оцінки можливого виникнення несправностей на заданому часовому інтервалі. Тренди створюються за допомогою системи комп'ютерного моніторингу, причому попередньо вводяться в неї порогові значення і комбінації діагностичних ознак, а прогнозування ресурсу здійснюється за результатами порівняння поточних і порогових значень контролюваних параметрів.

Недостаток тренд-аналізу заключається в тому, що для технічних систем, виготовлених в окремих екземплярах або малими серіями, де необхідно застосовувати методи прогнозування індивідуального ресурсу, неможливо встановити порогові значення контролюваного параметра через відсутність необхідної за кількістю статистики.

Загальним недоліком діючих методик прогнозування є орієнтація на середнестатистичні за природою нормативні значення контролюваного параметра, що не відображають індивідуальні властивості підконтрольного об'єкта. В результаті прогнозування ресурсу, шляхом визначення моменту досягнення трендом предельно допустимого рівня, призводить до помилок або першого, або другого роду, що в рівній ступені недопустимо.

Рішення проблеми визначення індивідуального ресурсу слід шукати на шляху аналізу характеру поведінки тренда контролюваного параметра. Поведінка цього тренда для кожного з підконтрольних об'єктів неповторимо і суцільно індивідуально.

### 3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Прогноз ресурсу підконтрольного об'єкта здійснюється в процесі параметричної ідентифікації моделі тренда контролюваного параметра шляхом мінімізації невязки (1) розрахункових і фактичних значень тренда контролюваного параметра:

$$U = \sum_i^m (A(\tau) - A_P)^2. \quad (1)$$

Моделю тренда описується наступним виразом [7]:

$$A_P = A(\tau_0) \cdot \left( \frac{T_{ПР} - \tau_0}{T_{ПР} - \tau} \right)^\alpha. \quad (2)$$

Вираз (2) представляє собою дробно-раціональну степенну функцію. В момент виснаження ресурсу підконтрольного об'єкта виконується умова (4), а функція (2) претерпує розрив:

$$\tau = T_{ПР}. \quad (3)$$

Дане обставина забезпечує високу чутливість моделі до поведінки тренда контролюваного параметра, градієнт якого суттєво зростає по мірі виснаження ресурсу підконтрольного об'єкта і наближення моменту його аварії.

Остаточний ресурс  $T_{ОСТ}$  визначається з наступного вираження:

$$T_{ОСТ} = T_{ПР} - \tau. \quad (4)$$

В процесі виснаження ресурсу виробу він, технічно деградує, поступово проходить ряд все більш погіршуваних технічних станів.

Для формалізації опису цих станів використовуємо основні положення теорії «нечітких множин» [8]. Згідно цієї теорії ступінь критичності технічного стану виробу можна оцінити за допомогою лінгвістическої змінної  $a_{СОСТ}$ , названої «показателем стану» об'єкта контролю.

Даний показник, зокрема, дозволяє компенсувати відсутність достаточної за кількістю статистики по предельно допустимим значенням контролюваних параметрів для малосерійних, а для унікальних (єдиничних) виробів взагалі її відсутність.

«Функція належності», за допомогою якої розраховується цей показник, трансформує значення входних змінних, що характеризують експлуатаційну навантаження і індивідуальні властивості підконтрольного об'єкта в значення лінгвістических змінних. Ці змінні порівнюються з їх стандартними значеннями – «термами», представляючими діагнози поточного стану об'єкта діагностування [7].

Для отримання аналітичного вираження для «функції належності», за допомогою якої визначається лінгвістическа змінна «показатель стану»  $a_{СОСТ}$ , використовуємо методи теорії подоби і розмірності. Згідно цієї теорії вважаємо, що показник  $a_{СОСТ}$  описується наступним

щим набором определяющих параметров: исходным  $A(\tau_0)$  и текущим уровнями вибрации  $A(\tau)$ , текущей наработкой объекта контроля  $\tau$  и численным значением его ресурса  $T_{\text{ПР}}$ .

Полагая без потери общности получаемого выражения, что амплитуда вибрации представляет собой вибросмещение, перейдем к рассмотрению двух размерностей – длины  $L$  ( $[A(\tau_0)] = L$ ,  $[A(\tau)] = L$ ) и времени  $T$  ( $[\tau] = T$ ,  $[T_{\text{ПР}}] = T$ ). Искомый показатель  $a_{\text{СОСТ}}$  представим как функцию произведения этих определяющих параметров, каждый из которых возведен в свою степень:

$$a_{\text{СОСТ}} = f(A(\tau_0), A(\tau), \tau, T_{\text{ПР}}) = A^\alpha(\tau_0) \cdot A^\beta(\tau) \cdot \tau^\gamma \cdot T_{\text{ПР}}^\lambda. \quad (5)$$

Далее определяем значения показателей степени. Для этого заменяем величины, стоящие в выражении, их размерностями и подставляем в формулу (6):

$$1 = L^\alpha L^\beta T^\gamma T^\lambda = L^{\alpha+\beta} T^{\gamma+\lambda}. \quad (6)$$

Поскольку искомый показатель – безразмерная величина, то ее размерность, согласно положениям теории размерностей, равна единице. В соответствии с этим должны выполняться следующие условия для показателей степеней:

$$\alpha + \beta = 0, \gamma + \lambda = 0. \quad (7)$$

Дополняем данную систему двух уравнений с четырьмя неизвестными до 4 уравнений условиями  $\beta = 1$ ,  $\gamma = 1$ . Совместное решение получающихся при этом четырех уравнений приводит к такому результату:  $\alpha = -1$ ,  $\beta = 1$ ,  $\gamma = 1$ ,  $\lambda = -1$ .

С учетом этого формула (6) запишется в следующем виде:

$$a_{\text{СОСТ}} = \frac{A(\tau) \cdot \tau}{A(\tau_0) \cdot T_{\text{ПР}}}. \quad (8)$$

В процессе эксплуатации техническое состояние объекта контроля изменяется, проходя ряд последовательно ухудшающихся технических состояний. Соответственно этому изменяется и фактическая величина лингвистической переменной  $a_{\text{СОСТ}}$ , рассчитываемая по результатам измерений контролируемого параметра и прогноза ресурса подконтрольного объекта.

Постановка диагноза технического состояния должна осуществляться путем сопоставления фактической величины переменной  $a_{\text{СОСТ}}$  с некими наперед назначенными ее нормативными границами, отделяющими один диагноз от другого.

Рассмотрим отдельно числитель и знаменатель «функции принадлежности» (8). Числитель, равный произведению текущего уровня вибрации и текущей наработки (9), характеризует степень нагруженности изделия в условиях его эксплуатации

$$a_{\text{ЭКС}} = A(\tau) \tau. \quad (9)$$

Знаменатель, равный произведению исходного уровня вибрации и ресурса (10), отражает индивидуальные свойства подконтрольного объекта, его несущую способность, потенциал и остается в процессе эксплуатации объекта контроля, практически, неизменным по величине.

$$a_{\text{СВ}} = A(\tau_0) T_{\text{ПР}}. \quad (10)$$

Числитель в процессе эксплуатации объекта контроля, изменяясь от нуля (при  $\tau_0=0$ ), с течением времени сравнивается с величиной знаменателя ( $a_{\text{ЭКС}} = a_{\text{СВ}}$ ). В этот момент лингвистическая переменная  $a_{\text{СОСТ}}$ , изменяясь также от нуля, достигает единицы, а объект исчерпывает свой ресурс, по крайней мере, межремонтный.

Данное значение переменной  $a_{\text{СОСТ}}$  является критическим, т. к. остановка оборудования в момент выполнения равенства числителя и знаменателя «функции принадлежности» (8) позволяет избежать аварии (катастрофы), что как раз и является целью контроля технического состояния поднадзорного оборудования.

Для доказательства этого утверждения представим выражение (8) в виде произведения двух дробей:

$$a_{\text{СОСТ}} = \frac{A(\tau)}{A(\tau_0)} \cdot \frac{\tau}{T_{\text{ПР}}}. \quad (11)$$

Первая дробь представляет собой отношение текущего и исходного уровней вибрации

$$K_A = \frac{A(\tau)}{A(\tau_0)}. \quad (12)$$

Вторая – отношение текущей наработки и прогноза ресурса

$$K_T = \frac{\tau}{T_{\text{ПР}}}. \quad (13)$$

При равенстве лингвистической переменной  $a_{\text{СОСТ}}$  единице, выражение (11) с учетом (12) и (13) можно представить в следующем виде

$$\frac{a_{\text{СОСТ}}}{K_A} = \frac{1}{K_A} = K_T. \quad (14)$$

Параметр  $K_A$ , как правило, больше единицы (что соответствует выполнению условия  $A(\tau) > A(\tau_0)$ ), согласно этому параметр  $K_T$  будет меньше единицы (что соответствует выполнению условия  $\tau < T_{\text{ПР}}$ ). Последнее означает, что остановка в момент достижения параметром  $a_{\text{СОСТ}}$  единицы исключит аварию изделия.

В случаях, когда величина контрольного параметра по мере приближения критического состояния изделия уменьшается, следует контролировать непо-

средственно величину параметра  $K_T$ , останавливая объект контроля при величине этого параметра, превышающей пороговое значение 0,9.

Диапазон изменения переменной  $a_{\text{СОСТ}}$  0...1 по аналогии с нормами виброактивности [9] разбит на 4-ре поддиапазона [7]. Границы поддиапазонов так же по аналогии с нормами виброактивности [9] представляют нормализованный ряд предпочтительных чисел  $R5$ . Этот ряд является геометрической прогрессией с корнем  $q = \sqrt[5]{10} \approx 1,56$  [10]. Поддиапазоны характеризуют постепенно ухудшающийся диагноз состояния объекта контроля и описываются стандартным набором вербальных величин – «термов» (табл. 1).

#### 4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Целью эксперимента была демонстрация рассматриваемой методологии прогнозирования ресурса и оценки на этой основе характера изменения с течением времени степени критичности технического состояния подконтрольного объекта.

Предметом исследований являлась гидротурбина ГТ-2 Саяно-Шушенской ГЭС (рис. 1), относящаяся к категории малосерийных изделий. Турбина претерпела катастрофическое разрушение 18 августа 2009 года.

Методика эксперимента заключалась в ретроспективном прогнозировании ресурса турбины и оценке на основе этого последовательного изменения в период с 21 апреля по 18 августа 2009 года степени критичности ее технического состояния. В качестве контрольного параметра в данном случае рассматривался уровень вибрации.

Методика предусматривала:

- построение тренда уровня вибрации;
- прогнозирование ресурса турбины, осуществляемого в процессе идентификации модели тренда (2), путем минимизации функционала (3);
- вычисление посредством «функции принадлежности» (9) величины лингвистической переменной  $a_{\text{СОСТ}}$ ;
- оценка степени критичности текущего состояния турбины, осуществляемая по результатам сопоставления лингвистической переменной  $a_{\text{СОСТ}}$  с ее эталонными интервалами («термами») (табл. 1).

В качестве исходных для прогнозирования ресурса турбины данных использовались результаты измерений вибрации корпуса гидротурбины (табл. 2) в рай-

оне турбинного подшипника 2 (датчик 4, рис. 1). Измерения проводились в период с 21 апреля по 17 августа 2009 года [11]. При этом под ресурсом понималась наработка турбины в сутках, отсчитываемая от 21 апреля 2009 года. От этой же даты отсчитывался и остаточный ресурс турбины.

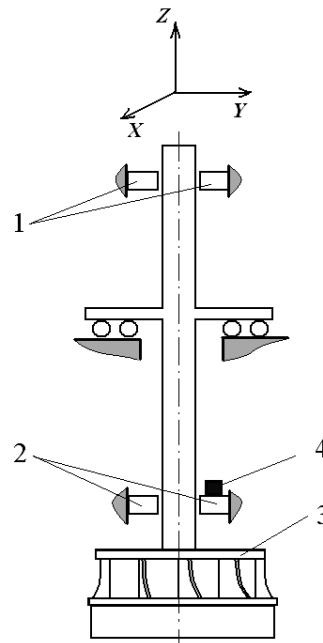


Рисунок 1 – Схема гидротурбины с указанием точки контроля ее вибрации: 1 – генераторный подшипник; 2 – турбинный подшипник; 3 – рабочее колесо турбины; 4 – датчик вибрации турбинного подшипника

#### 5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты расчетов, приведенные на рис. 2–5, содержат:

- тренд контрольного параметра и его модель (рис. 2);
- сравнение фактического ресурса турбины  $T_{\text{Ф}}$  и его прогноза  $T_{\text{ТР}}$  (рис. 3);
- сравнение фактического остаточного ресурса турбины  $T_{\text{ОСТ}}^{\text{Ф}}$  и его прогноза  $T_{\text{ОСТ}}^{\text{ТР}}$  (рис. 4);
- изменение величины лингвистической переменной  $a_{\text{СОСТ}}$  до момента достижения ею своего критического значения, равного единице (рис. 5).

Таблица 1 – Граничные значения лингвистической переменной «показатель состояния»  $a_{\text{СОСТ}}$  и соответствующие ей «термы»

«хорошее состояние»	«приемлемое состояние»	«допустимое состояние»	«недопустимое состояние»
$0 < a_{\text{СОСТ}} < 0,41$	$0,41 < a_{\text{СОСТ}} < 0,63$	$0,63 < a_{\text{СОСТ}} < 1,0$	$a_{\text{СОСТ}} > 1,0$

Таблица 2 – Амплитуда вибрации турбинного подшипника  $A(\tau)^*$ , мкм

Точка и направление контроля вибрации	Дата измерения (наработка $\tau$ , сут, отсчитываемая от 21.04.09 г.)					
	21.04.09 г. (0)	23.06.09 г. (63)	7.07.09 г. (75)	24.07.09 г. (91)	11.08.09 г. (111)	17.08.09 г. (118)
4y	90	250	500	700	800	1500

\* Для повышения наглядности демонстрируемой методологии результаты измерений были проинтеполированы для увеличения объема исходных данных (рис. 2).

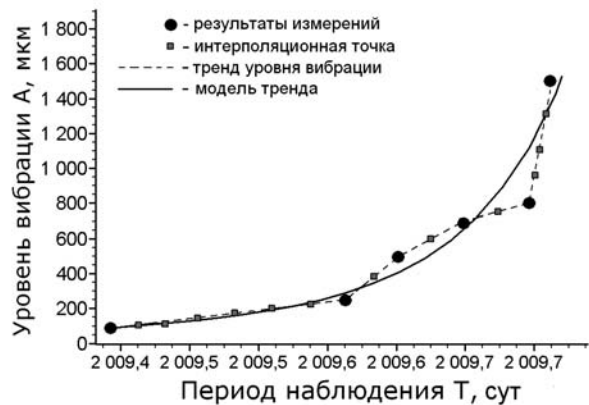


Рисунок 2 – Тренд контролируемого параметра (уровня вибрации) и его модель

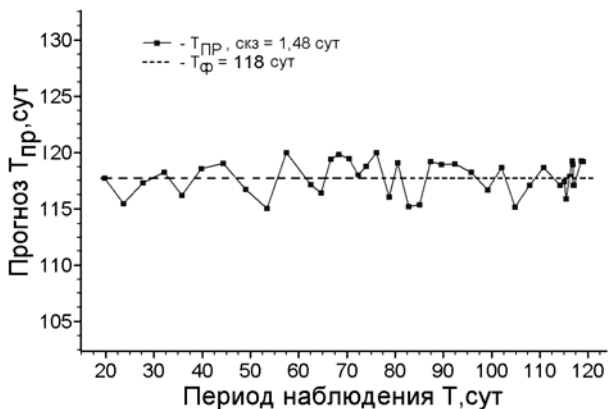


Рисунок 3 – Прогноз ресурса турбины  $T_{\text{ПР}}$  и его фактическое значение  $T_{\text{Ф}}$

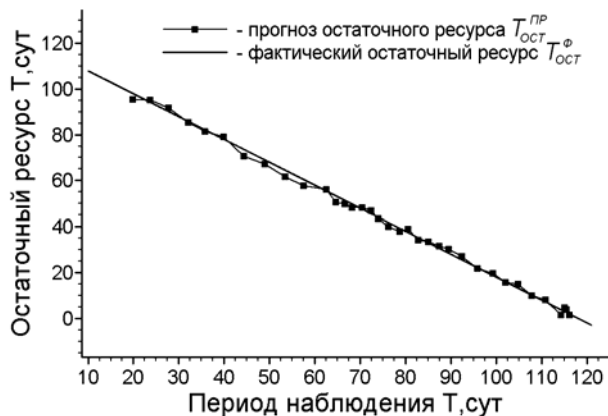


Рисунок 4 – Прогноз остаточного ресурса  $T_{\text{ОСТ}}^{\text{ПР}}$  и его фактическое значение  $T_{\text{ОСТ}}^{\text{Ф}}$

Графики, приведенные на рис. 2, свидетельствуют о значительном положительном градиенте уровня вибрации в предкатастрофический период работы турбины, что уже само по себе является надежным предвестником надвигающейся катастрофы.

Как следует из рис. 3 прогноз ресурса  $T_{\text{ПР}}$ , начиная с 20 суток от начала наблюдения за вибросостоянием турбины, колеблется относительно фактической наработки турбины до катастрофы со среднеквадратической величиной  $\text{с.к.з.} = 1,48$  сут ( $\nu = 0,0125$ ).

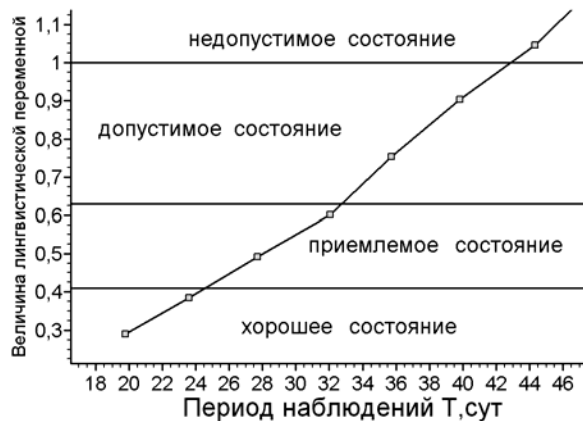


Рисунок 5 – Изменение лингвистической переменной «показатель состояния»  $a_{\text{СОСТ}}$  в процессе наблюдения за состоянием турбины

Соответственно, приведенное на рис. 4 сравнение фактического  $T_{\text{ОСТ}}^{\text{Ф}}$  и прогнозируемого  $T_{\text{ОСТ}}^{\text{ПР}}$  остаточных ресурсов показывает, что они, практически, совпадают.

Из рис. 5 следует, что в процессе наблюдения лингвистическая переменная  $a_{\text{СОСТ}}$  возрастает по величине, проходя ряд своих нормируемых значений, и на 44 сутки после начала регулярного контроля вибрации турбины достигает своего критического значения – единицы.

## 6 ОБСУЖДЕНИЕ

Ретроспективное прогнозирование наработки турбины до катастрофы наглядно свидетельствует о том, что применение рассматриваемой методологии прогнозирования ресурса технических систем в данном случае позволило бы избежать катастрофы.

В реальности в предкатастрофический период, использовали принцип дихотомии «годен – не годен», руководствуясь при этом действующими до сих пор нормами [12] ( $A_{\text{ПР}} = 180$  мкм на оборотной частоте). Эти нормы не предусматривают градацию степени критичности технического состояния турбины наподобие, приведенной в табл. 1.

В случае же применения предлагаемой методологии устойчивое повторение прогноза наработки турбины до момента достижения ее критического состояния и факт изменения за короткий период (44 суток) лингвистической переменной  $a_{\text{СОСТ}}$  от исходного значения до единицы, несомненно, послужило бы основанием для остановки турбины на выяснение причин столь необычного ее поведения.

Рассмотренное на примере гидротурбины разительное отличие действующих и предлагаемой методологии контроля состояния технических систем свидетельствует о давно назревшей необходимости ее внедрения в практику прогнозирования индивидуального ресурса разнообразных технических систем, включая уникальные и малосерийные.

Анализ текущего состояния проблемы контроля технических систем [13] свидетельствует, что по-

прежнему игнорируется динамика изменения контролируемого параметра, его тренд, а контроль сводится к сравнению контролируемого параметра с неким его наперед заданным эталонным значением, который, как известно [7], не существует.

Следует отметить, что рассмотренная в статье методология прогнозирования индивидуального ресурса технических систем была использована при разработке системы контроля, а затем и адаптивного управления процессом обработки материалов резанием, где впервые в истории металлообработки позволила исключить появление брака обрабатываемой детали, за счет прогнозирования фактической, а не среднестатистической длительности ее бездефектной обработки [14–16].

### ВЫВОДЫ

Предложено решение злободневной и давно стоящей на повестке дня проблемы прогнозирования индивидуального ресурса и оценки на этой основе фактического технического состояния разнообразного промышленного оборудования, включая изготовленного малыми сериями или в единичных экземплярах.

**Научная новизна** полученных результатов заключается в том, что впервые прогноз ресурса не использует статистические данные о предельно допустимых значениях контролируемого параметра, а определяется по результатам параметрической идентификации модели тренда контролируемого параметра, на основе коэффициентов которой рассчитывается искомый ресурс, в том числе технических систем, изготовленных малыми сериями или в единичных экземплярах.

**Практическая значимость** полученных результатов заключается в том, что предложенная методология реализована в виде программного продукта, предназначенного для разнообразных стационарных и мобильных компьютерных устройств, что обеспечивает внедрение методологии в широкую практику эксплуатации разнообразного промышленного оборудования, включая малосерийные и уникальные изделия.

**Перспективы дальнейших исследований** состоят в создании универсальной системы контроля любой технической системы, работа которой сопровождается генерированием различных по физической природе контрольных параметров, объективно отражающих степень критичности технического состояния поднадзорного оборудования и служащих основой для прогнозирования согласно рассмотренной в статье новой методологии их индивидуального ресурса, отвечающего фактически складывающимся условиям их эксплуатации.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работу выполнено в рамках госбюджетной научно-исследовательской темы Сумского государственного университета «Модели и информационные технологии проектирования и управления в сложных

системах» (номер государственной регистрации 0115U001569).

### ЛИТЕРАТУРА / ЛІТЕРАТУРА

1. Кудрицкий В. Д. Прогнозирование надежности радиоэлектронных устройств / В. Д. Кудрицкий. – К. : Техника, 1982. – 168 с.
2. Давыдов П. С. Техническая диагностика радиоэлектронных устройств и систем / П. С. Давыдов. – М. : Радио и связь, 1988. – 256 с.
3. Давыдов П. С. Эксплуатация авиационного радиоэлектронного оборудования. Справочник / П. С. Давыдов, П. А. Иванов. – М. : Транспорт, 1990. – 240 с.
4. Попков В. И. Виброакустическая диагностика в судостроении / В. И. Попков, Э. Л. Мышинский, О. И. Попков. – Л. : Судостроение, 1983. – 256 с.
5. Пат. Российская Федерация, МПК G01M 15/00. Способ повышения надежности работы центробежного перекачивающего агрегата углеводородного сырья и система диагностирования его технического состояния / Л. С. Щепин, Р. М. Зарипов ; заявитель Закрытое акционерное общество Холдинговая компания «Транссервис». – № 2068553 ; заявл. 12.11.07 ; опубл. 27.06.09.
6. Жернаков С. В. Тренд-анализ параметров авиационного ГТД на основе технологии нейронных сетей / С. В. Жернаков // Вестник УГАТУ «Тепловые, электродвигатели и энергоустановки ЛА». – 2011. – Т. 15, № 4 (44). – С. 25–32.
7. Залого В. О. Контроль динамического состояния металлообрабатывающей технологической системы и прогнозирование ее ресурса : монография / В. О. Залого, В. М. Нагорный, В. В. Нагорный. – Сумы : СумГУ, 2016. – 242 с.
8. Заде Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л. А. Заде. – М. : Мир, 1976. – 165 с.
9. ГОСТ Р ИСО 10816-3-99. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений на невращающихся частях. Часть 3. Промышленные машины номинальной мощностью более 15кВт и номинальной скоростью от 120 до 15000 об/мин. Введен впервые. Введ. 22.12.1999. – М. : Изд-во стандартов, 2000. – 11 с. УДК 621.9 : 534.1.08:006.354. Группа Т34.
10. Косилова А. Г. Справочник технолога-машиностроителя / А. Г. Косилова, Р. П. Мещеряков. – М. : Том 2, Машиностроение, 1986. – 496 с.
11. Акт технического расследования причин аварии, произошедшей 17 августа 2009 года в филиале Открытого Акционерного Общества «РусГидро» – «Саяно-Шушенская ГЭС имени П. С. Непорожного» [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: [http://www.gosnadzor.ru/news/aktSSG\\_bak.doc](http://www.gosnadzor.ru/news/aktSSG_bak.doc).
12. СТО 70238424.27.140.001-2011. Гидроэлектростанции. Методики оценки технического состояния основного оборудования. Введен впервые. Введ. 25.04.2011. – М. : Изд-во стандартов, 2011. – 15 с. УДК 621.9 : 534.1.08:006.354. Группа Т34.
13. Васильев Ю. С. О ресурсах гидротурбин: обзор зарубежной литературы / Ю. С. Васильев, Ю. К. Петреня, Е. В. Георгиевская // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. – 2017. – Т. 23, № 2. – С. 184–204.
14. Нагорный В. В. Прогнозирование момента замены режущего инструмента по уровню звука, генерируемого процессом резания / В. В. Нагорный // Инновации, каче-

- ство и сервис в технике и технологиях : III научно-практическая конференция, Курск, 17–19 мая 2012 г. : тезисы докладов. – Курск : ЮЗГУ, 2012. – С. 107–111.
15. Нагорный В. В. Расчет индикаторов разрушения режущего инструмента / В. В. Нагорный, В. А. Залого // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Машинобудування. – 2012. – № 66. – С. 96–102.
16. Нагорный В. В. Использование вибродиагностики для прогноза стойкости инструмента / В. В. Нагорный, В. А. Залого // Известия ЮЗГУ. Серия Техника и технология. – 2012. – № 2, Часть 1. – С. 30–38.  
Статья поступила в редакцию 25.06.2018.  
После доработки 07.08.2018.

УДК 67.05

## ПРОГНОЗУВАННЯ ІНДИВІДУАЛЬНОГО РЕСУРСУ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

**Нагорний В. В.** – канд. техн. наук, ст. викл. кафедри комп'ютерних наук секції інформаційних технологій проектування, Сумський державний університет, Суми, Україна.

**Лавров Є. А.** – д-р техн. наук, професор кафедри комп'ютерних наук секції інформаційних технологій проектування, Сумський державний університет, Суми, Україна.

**Чибіряк Я. І.** – канд. техн. наук, доцент кафедри комп'ютерних наук секції інформаційних технологій проектування, Сумський державний університет, Суми, Україна.

### АНОТАЦІЯ

**Актуальність.** У статті викладені результати досліджень по розробці нової методології прогнозування індивідуального ресурсу технічних систем, що є злободенною, але так і не вирішеною до сих пір проблемою, особливо для малосерійних або виготовлених в одиничних екземплярах об'єктів контролю. Дана обставина і визначає актуальність викладеного в статті матеріалу.

**Мета.** Метою роботи є розробка нової методології прогнозування індивідуального ресурсу технічних систем, в тому числі унікальних і малосерійних.

**Метод.** Запропоновано нову методологію прогнозування індивідуального ресурсу технічних систем, яка заснована на ідентифікації моделі тренда контрольованого параметра, що виконується за результатами регулярного моніторингу технічного стану різноманітного промислового обладнання, в тому числі малосерійного або виготовленого в одиничних екземплярах. Один з коефіцієнтів моделі, який визначається в процесі ідентифікації, чисельно дорівнює прогнозованому ресурсу. За відомою величиною ресурсу і вимірним значенням контрольованого параметра розраховується значення лінгвістичної змінної, за результатами зіставлення якої зі стандартним набором вербальних величин – «термів» приймається рішення про ступінь критичності технічного стану підконтрольного обладнання.

**Результати.** Методологія прогнозування індивідуального ресурсу і оцінки на основі цього ступеня критичності технічного стану промислового устаткування, в тому числі унікального і малосерійного обладнання, була реалізована в програмному продукті і використана при оцінці ступеня критичності гідротурбіни – типового представника малосерійних виробів.

**Висновки.** Проведені експерименти підтвердили очікувану ефективність методології прогнозування індивідуального ресурсу і працездатність створеного на її основі програмного забезпечення, що дозволяє рекомендувати методологію і програмний продукт для практичного використання при вирішенні завдань прогнозування ресурсу і діагностики технічного стану різноманітного промислового обладнання. Перспективи подальших досліджень полягають в апаратній реалізації на базі стаціонарних, мобільних та вбудованих систем контролю розробленої методології прогнозування індивідуального ресурсу механічних систем.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** індивідуальний ресурс, критичний стан, прогноз ресурсу, ідентифікація, тренд контрольованого параметра, модель тренда, стан піднаглядного обладнання.

UDC 67.05

## FORECASTING INDIVIDUAL RESOURCE OF TECHNICAL SYSTEMS

**Nahorny V. V.** – PhD, Senior Lecturer of the Computer Science Department, Section of the Information Technologies, Sumy State University, Sumy, Ukraine.

**Lavrov E. A.** – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Computer Science Department, Section of the Information Technologies, Sumy State University, Sumy, Ukraine.

**Chybiyak Y. I.** – PhD, Associate Professor of the Computer Science Department, Section of the Information Technologies, Sumy State University, Sumy, Ukraine.

### ABSTRACT

**Context.** The article describes the results of research into the development of a new methodology for forecasting the individual resource of technical systems, which is a topical, but still not solved, problem, especially for small-series or single objects of control. This circumstance determines the relevance of the material presented in the article.

**Objective.** The goal of the work is the development of a new methodology for forecasting the individual resource of technical systems, including unique and small-series ones.

**Method.** A new methodology for forecasting the individual resource of technical systems is proposed, which is based on the identification of the trend model of the monitored parameter, performed on the basis of the results of regular monitoring of the tech-



nical condition of various industrial equipment, including small-series or manufactured in single copies. One of the coefficients of the model, which is determined in the identification process, is numerically equal to the predicted resource. Based on the known value of the resource and the measured value of the control parameter, the value of the linguistic variable is calculated, the results of comparison of which with the standard set of verbal quantities – “terms” – determine the degree of criticality of the technical condition of the equipment under control.

**Results.** The methodology of forecasting an individual resource and evaluating the technical condition of industrial equipment, including unique and small-series equipment based on this degree of criticality, was implemented in the software product and used in assessing the degree of criticality of a hydro turbine – a typical representative of small-series products.

**Conclusions.** The conducted experiments confirmed the expected effectiveness of the methodology for forecasting the individual resource and the efficiency of the software created on its basis, which makes it possible to recommend the methodology and software product for practical use in solving problems of forecasting the resource and diagnosing the technical condition of various industrial equipment. Prospects for further research consist in the hardware implementation based on stationary, mobile and embedded control systems developed methodology for forecasting the individual resource of mechanical systems.

**KEYWORDS:** individual resource, critical state, resource forecast, identification, trend of the controlled parameter, trend model, state of the supervised equipment.

#### REFERENCES

1. Kudrickij V. D. Prognozirovanie nadezhnosti radioe'lektronnykh ustrojstv. Kiev, Tekhnika, 1982, 168 p.
2. Davydov P. S. Texnicheskaya diagnostika radioe'lektronnykh ustrojstv i sistem. Moscow, Radio i svyaz', 1988, 256 p.
3. Davydov P. S., Ivanov P. A. E'kspluatatsiya aviacionnogo radioe'lektronnoho oborudovaniya. Moscow, Spravochnik, Transport, 1990, 240 p.
4. Popkov V. I., Myshinskij E'. L., Popkov O. I. Vibroakusticheskaya diagnostika v sudostroenii. Leningrad, Sudostroenie, 1983, 256 p.
5. Shhepin L. S., Zariyov R. M. Pat. Rossijskaya Federatsiya, MPK G01M 15/00. Sposob povysheniya nadezhnosti raboty centrobezhnogo perekachivayushhego agregata uglevodorodnogo syr'ya i sistema diagnostirovaniya ego texnicheskogo sostoyaniya; zayavitel' Zakrytoe akcionerhoe obshchestvo Xoldingovaya kompaniya "Transservis". № 2068553 ; zayavl. 12.11.07 ; opubl. 27.06.09.
6. Zhernakov S. V. Trend-analiz parametrov aviacionnogo GTD na osnove texnologii nejronnykh setej, *Vestnik UGATU «Teplovye, e'lektroaktyvnyye dvigateli i e'nergostanovki LA»*, 2011, Vol. 15, No. 4 (44), pp. 25–32.
7. Zaloga V. O., Nagornyy V. M., Nagornyy V. V. Kontrol' dinamicheskogo sostoyaniya metalloobrabatyvayushhej texnologicheskoy sistemy i prognostirovanie ee resursa. Monografiya. Sumy, SumGU, 2016, 242 p.
8. Zade L. A. Ponyatie lingvisticheskoy peremennoj i ego primenenie k prinyatiyu priblizitel'nykh reshenij. Moscow, Mir, 1976, 165 p.
9. GOST R ISO 10816-3-99. Vibratsiya. Kontrol' sostoyaniya mashin po rezul'tatam izmerenij na nevrashhayushhixsya chastyax. Chast' 3. Promyshlennyye mashiny nominal'noj moshhnost'yu bolee 15kVt i nominal'noj skorost'yu ot 120 do 15000 ob/min. Vveden v pervyye. Vved. 22.12.1999. Moscow, Izd-vo standartov, 2000, 11 p. UDK 621.9 : 534.1.08:006.354. Gruppy T34.
10. Kosilova A. G., Meshcheryakov R. P. Spravochnik texnologa-mashinostroitelya. Moscow, Tom 2, Mashinostroenie, 1986, 496 p.
11. Akt texnicheskogo rassledovaniya prichin avarii, proizoshedshej 17 avgusta 2009 goda v filiale Otkrytogo Akcionernogo Obshchestva «RusGidro» – «Sayano-Shushenskaya GE'S imeni P. S. Neporozhnogo» [E'lektron. resurs]. Rezhim dostupa: [http://www.gosnadzor.ru/news/aktSSG\\_bak.doc](http://www.gosnadzor.ru/news/aktSSG_bak.doc).
12. STO 70238424.27.140.001-2011. Gidroe'lektrostantsii. Metodiki ocenki texnicheskogo sostoyaniya osnovnogo oborudovaniya. Vveden v pervyye. Vved. 25.04.2011. Moscow, Izd-vo standartov, 2011, 15 p. UDK 621.9 : 534.1.08:006.354. Gruppy T34.
13. Vasil'ev Yu. S., Petrenya Yu. K., Georgievskaya E. V. O resursax gidroturbin: obzor zarubezhnoj literatury, *Nauchno-texnicheskie vedomosti SPbPU. Estestvennye i inzhenernye nauki*, 2017, t. 23, № 2, pp. 184–204.
14. Nagornyy V. V. Prognostirovanie momenta zameny rezhushhego instrumenta po urovnyu zvuka, generiruемого procesom rezaniya, *Innovatsii, kachestvo i servis v tekhnike i texnologiyax : III nauchno-prakticheskaya konferentsiya, Kursk, 17–19 maya 2012 g. : tezisy dokladov*. Kursk, YuZGU, 2012, pp. 107–111.
15. Nagornyy V. V., Zaloga V. A. Raschyot indikatorov razrusheniya rezhushhego instrumenta, *Visnik NTUU «KPI». Seriya Mashinobudovaniya*, 2012, No. 66, pp. 96–102.
16. Nagornyy V. V., Zaloga V. A. Ispol'zovanie vibrodiagnostiki dlya prognoza stojkosti instrumenta, *Izvestiya YuZGU. Seriya Tekhnika i tekhnologiya*, 2012, No. 2, Chast' 1, pp. 30–38.