

УДК 629.7:04

**С.Г. КОЛОМИЙЧУК**

*Институт промышленного производства и автоматизации им. Фраунгофера "Fraunhofer IFF", Германия*

## **РАСЧЕТ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ MATLAB И SIMULINK**

*Рассмотрена методика расчета остаточного ресурса технических систем с помощью методов нечеткой логики. Показаны этапы создания расчетной модели на примере системы с трехступенчатым турбокомпрессором, используемом для подачи сжатого воздуха в печь высокого давления по переплавке стали. Рассмотрены особенности программирования контроллеров и подбора функций принадлежности для определения остаточного ресурса системы. Приведен пример набора последних для одного из компонентов - воздушного фильтра. Показано моделирование системы в среде SIMULINK и описаны преимущества такого метода построения модели. В качестве результатов расчетов приведены графики изменения остаточного ресурса отдельных компонентов системы с течением времени.*

**Ключевые слова:** остаточный ресурс технической системы, износ, надежность, нечеткая логика, Matlab/Simulink.

### **Введение**

Для планирования стратегии современного технического обслуживания и последующего его проведения очень важно знать остаточный ресурс соответствующего технического устройства. Для этого необходимо учитывать множество факторов, влияющих на его надежность, таких как параметры рабочего процесса и окружающей среды, назначенный ресурс, история ремонтов и т.д. Очень часто невозможно точно математически описать влияние того или иного параметра на износ как отдельного компонента, так и всего технического устройства в целом. В этом случае важную роль играет опыт эксплуатации, знание определенных эмпирических зависимостей, таких как: "высокие колебания ротора – плохое техническое состояние", "повышенный шум в районе подшипников – плохое состояние последних и наоборот отсутствие шума или нормальный шумовой фон, подшипники в норме". Конечно такие параметры как колебания, уровень шума, температура, давление можно измерить, но как тот или иной может описать износ компонента системы математически определить сложно. Здесь необходимо использовать методы схожие с человеческим мышлением, известные как методы "нечеткой логики".

### **1. Методика расчетов**

Математическая теория нечетких множеств (fuzzy sets) и нечеткая логика (fuzzy logic) являются

обобщениями классической теории множеств и классической формальной логики. Данные понятия были впервые предложены американским ученым Лотфи Заде (Lotfi Zadeh) в 1965 г. Основной причиной появления новой теории стало наличие нечетких и приближенных рассуждений при описании человеком процессов, систем, объектов [1].

Разработанная в институте промышленного производства и автоматизации им. Фраунгофера "IFF" методика использует для определения износа и остаточного ресурса технической системы нечеткую логику.

Алгоритм этой методики основан на статистической информации о параметрах рабочего процесса, которые обуславливают износ технического объекта и опытных знаниях полученных при его эксплуатации.

Результатом расчетов по этой методике является четкое количественное представление как об актуальном остаточном ресурсе отдельно взятого технического объекта или технической системы в целом, так и его изменение с течением времени [2].

### **2. Этапы создания модели и расчет остаточного ресурса технической системы**

Создание модели для расчетов остаточного ресурса включает в себя три основных этапа.

Первым является определение связей между объектами в сложной технической системе и построение ее структурной схемы с учетом правил

теории надежности (последовательное, параллельное соединение, резервируемый объект и т.д.). Эта структура будет использоваться в дальнейшем для построения расчетной модели в интерактивной среде моделирования Simulink [3].

В качестве примера на рис. 1 показана структурная схема системы подачи сжатого воздуха в печь высокого давления по переплавке стали на предприятии НКМ Hüttenwerke Krupp Mannesmann GmbH [4].

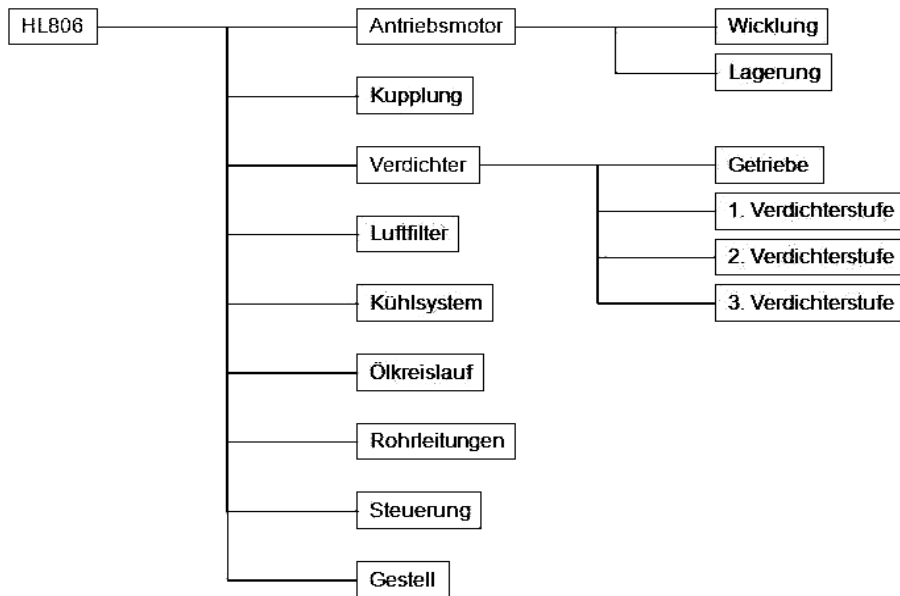


Рис. 1. Структурная схема системы подачи сжатого воздуха в печь высокого давления по переплавке стали

Трехступенчатый турбокомпрессор, входящий в эту систему, представлен на рис. 2.



Рис. 2. Турбокомпрессор серии Н фирмы Atlas Copco [5]

Вторым и основным этапом является подготовка и программирование контроллеров, с помощью которых будет вычисляться влияние поведения того или иного параметра рабочего процесса на износ технической системы и на ее остаточный ресурс соответственно.

Характеристикой нечеткого множества выступает функция принадлежности (Membership Function). Обозначим через  $MF_c(x)$  – степень принадлежности к нечеткому множеству  $C$ , представляющей собой обобщение понятия характеристической функции обычного множества. Тогда нечетким множеством  $C$  называется множество упорядоченных пар вида  $C = \{MF_c(x)/x\}$ ,  $MF_c(x) \in (0,1)$ . Значение

$MF_c(x) = 0$  означает отсутствие принадлежности к множеству, 1 – полную принадлежность [1, 6].

Основой для проведения операции нечеткого логического вывода является база правил, содержащая нечеткие высказывания в форме "Если - то" и функции принадлежности для соответствующих лингвистических термов. При этом должны соблюдаться следующие условия:

- существует хотя бы одно правило для каждого лингвистического термина выходной переменной;
- для любого термина входной переменной имеется хотя бы одно правило, в котором этот терм используется в качестве предпосылки (левая часть правила).

В противном случае имеет место неполная база нечетких правил.

Программирование контроллеров и выбор соответствующих правил происходит с учетом опыта эксплуатации и мнения обслуживающего персонала о том, насколько определенные явления (повышенный шум, повышенные колебания и т.п.) характеризуют износ технической системы. При этом существует возможность учитывать несколько различных мнений относительно одного и того же явления. Средством для создания и программирования является Fuzzy Toolbox – один из компонентов программного комплекса Matlab. [3, 7] Пример набора функций принадлежности для перепада давления на выходе воздушного фильтра в системе подачи сжатого воздуха в печь высокого давления по переплавке стали приведен на рис. 3.

Выходом данного контроллера является воздействие на ресурс, которое описывает в процентах, насколько загружен фильтр и насколько быстро происходит его износ.

На третьем этапе производится построение по составленной как показано раньше схеме блочной модели в среде интерактивного моделирования Simulink, где в качестве компонентов системы применяются запрограммированные контроллеры. Входами последних являются параметры рабочего процесса и характеристики (возраст, время эксплуатации) соответствующего компонента. Выходом таких контроллеров может быть либо сразу остаточный ресурс компонента (контроллеры второго типа, в которых учитывается только возраст компонента и время его эксплуатации), либо величина воздействия на ресурс (контроллеры

первого типа входом которых являются только параметры рабочего процесса). [2] При наличии контроллеров первого типа, для этого же объекта всегда есть еще и контроллер второго типа, который учитывая выход первого, рассчитывает актуальный остаточный ресурс объекта. Таким образом, можно увидеть не только то, насколько более жесткие условия эксплуатации (повышенные нагрузки и т.п.) снижают срок службы компонента, так и наоборот более щадящие режимы продлевают долговечность, как отдельного объекта, так и всей системы в целом.

Остаточный ресурс узлов такой модели рассчитывается по классической теории надежности в зависимости от соединения в нем компонентов (параллельно, последовательно). Фрагмент такой модели можно увидеть на рис. 4.

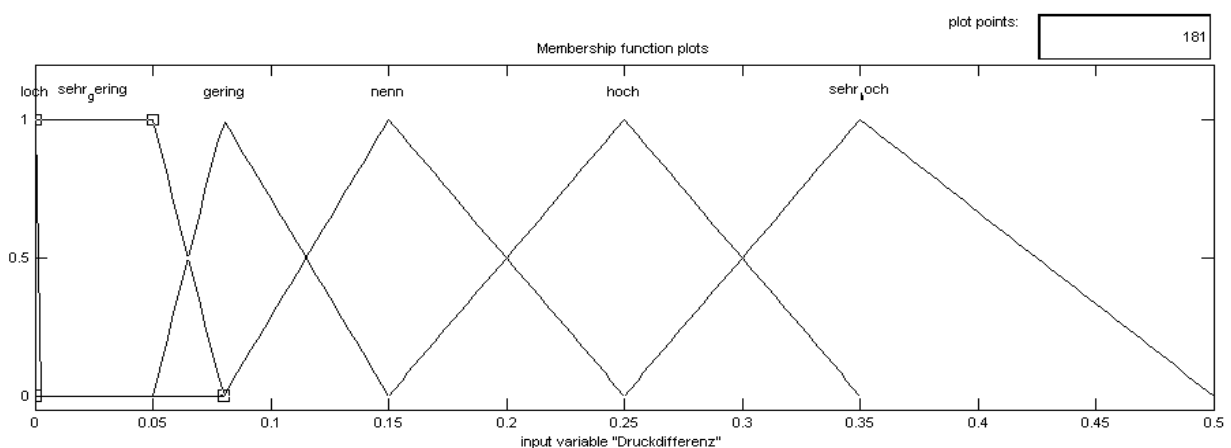


Рис. 3. Функции принадлежности для перепада давления на выходе воздушного фильтра

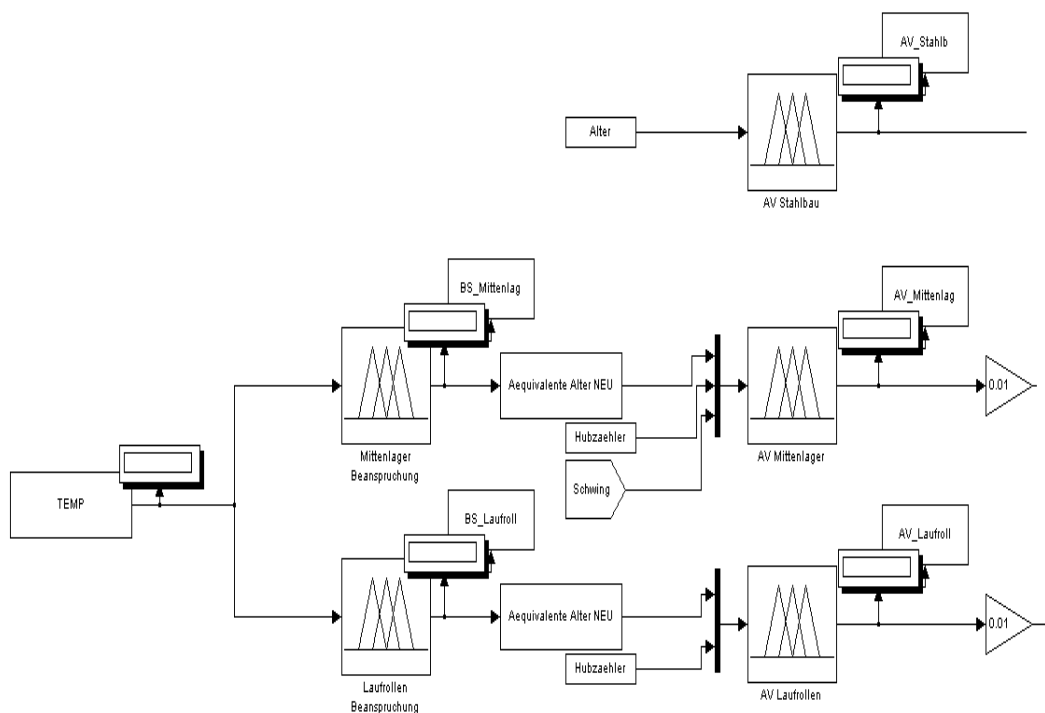


Рис. 4. Фрагмент модели системы подачи сжатого воздуха в печь высокого давления по переплавке стали, созданной с помощью Simulink

В результате расчетов получены изменения значений остаточного ресурса всех компонентов системы. Это дает возможность своевременно выявить неисправные или близкие к выходу из строя элементы, и принять необходимые меры по предотвращению поломки всей системы, что в значительной мере может облегчить принятие решений при разработке стратегии дальнейшей эксплуатации и графика проведения

возможных работ по обслуживанию и ремонту. Примеры результатов расчетов приведены в виде кривых изменения остаточного ресурса на графиках (рис. 5 и 6). По оси абсцисс отложено время эксплуатации в часах, а по оси ординат – остаточный ресурс компонента в процентах. На одном из графиков (рис. 5) можно увидеть скачок, обусловленный заменой износившегося воздушного фильтра на новый.

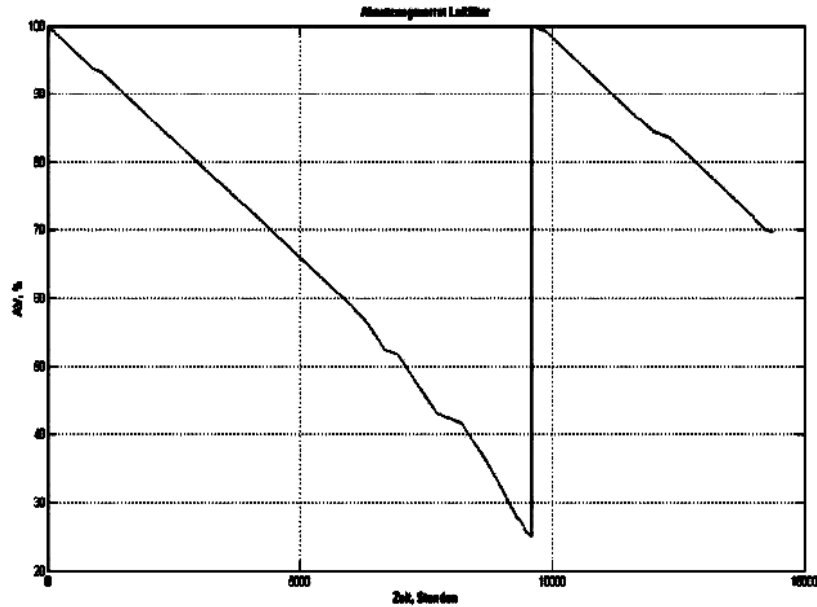


Рис. 5. Изменение остаточного ресурса воздушного фильтра с течением времени

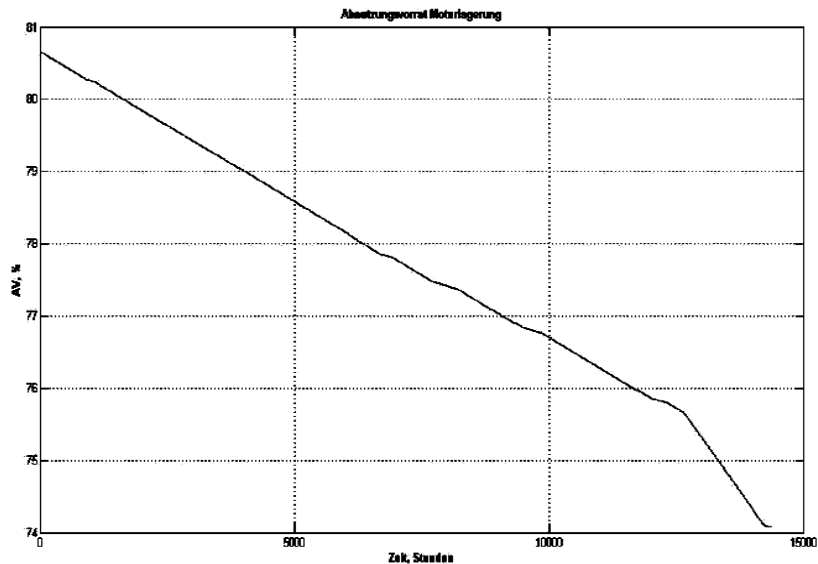


Рис. 6. Изменение остаточного ресурса крепления электродвигателя с течением времени

## Выводы

Предложенная модель позволяет эффективно определять остаточный ресурс, как отдельных компонентов системы, так и ее узлов. А построение с помощью Simulink облегчает процесс отладки, путем наглядного представления всех частей системы, а также дает воз-

можность компилировать модель в независимую от приложений Matlab библиотеку и использовать ее для последующих расчетов без наличия вышеописанного программного комплекса на компьютере. Примером применения независимых от Matlab моделей служит программный комплекс, разработанный в институте Фраунгофера – Statellogger [8].

Дальнейшими задачами исследования является разработка методики компенсации возможных ошибок при программировании контроллеров, при помощи создания так называемых гибридных: нечетких нейронных сетей (ANFIS). С одной стороны, они позволяют разрабатывать и представлять модели систем в форме правил нечетких продукций, которые обладают наглядностью и простотой содержательной интерпретации. С другой стороны, для построения правил нечетких продукций будут использоваться методы нейронных сетей, что является более удобным и менее трудоемким процессом для системных аналитиков, что особенно актуально для решения слабо или плохо структурированных задач прикладного системного анализа.

### Литература

1. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А.В. Леоненков. – СПб., 2005. – 719 с.
2. Ryll Frank. Gestaltung einer zustandsorientier-

ten Instandhaltungsstrategie auf der Grundlage einer erfahrungsbasierten Bewertung von Abnutzungsvorräten in technischen Anlagen Zugl / Frank Ryll: Magdeburg, Univ., Fak. für Maschinenbau, Diss., 2008; Stuttgart: Fraunhofer IRB Verl.; XXII, 255 S.

3. MatLab, The MathWorks Inc., Natick (USA) [Электронный ресурс]. – Режим доступа к документу: <http://www.mathworks.com>.

4. НКМ Hüttenwerke Krupp Mannesmann GmbH [Электронный ресурс]. – Режим доступа к документу: <http://www.hkm.de>.

5. Atlas Copco Kompressoren und Drucklufttechnik GmbH, Essen [Электронный ресурс]. – Режим доступа к документу: <http://www.atlascopco.com>.

6. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л. Заде. – М.: Мир, 1976. – 165 с.

7. Дьяконов В.П. Математические пакеты расширения Matlab. Специальный справочник / В.П. Дьяконов, В.П. Круглов. – СПб.: Питер, 2001. – 467 с.

8. Statelogger [Электронный ресурс]. – Режим доступа к документу: <http://www.statelogger.de>.

Поступила в редакцию 21.05.2009

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. С.В. Елифанов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского. "ХАИ", Харьков, Украина.

## РОЗРАХУНОК ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ТЕХНІЧНОЇ СИСТЕМИ ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДІВ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОГРАМНИХ КОМПЛЕКСІВ MATLAB ТА SIMULINK

С.Г. Коломійчук

Розглянута методика розрахунку залишкового ресурсу технічних систем за допомогою методів нечіткої логіки. Показані етапи створення розрахункової моделі на прикладі системи з тріступеневим турбокомпресором, який використовується для подачі стислого повітря в піч високого тиску по перелавці сталі. Розглянуті особливості програмування контролерів і підбору функцій приналежності для визначення залишкового ресурсу системи. Наведений приклад набору останніх для одного з компонентів - повітряного фільтру. Показано моделювання системи в середовищі SIMULINK і описані переваги такого методу побудови моделі. Як результати розрахунків приведені графіки зміни залишкового ресурсу окремих компонентів системи протягом часу.

**Ключові слова:** залишковий ресурс технічної системи, знос, надійність, нечітка логіка, Matlab/Simulink.

## CALCULATION OF A RESIDUAL LIFE OF TECHNICAL SYSTEM BY MEANS OF FUZZY LOGIC METHODS USING MATLAB AND SIMULINK

S.G. Kolomiichuk

The design procedure of a residual life of technical systems by means of fuzzy logic methods is considered. Stages of settlement model creation on an example of system with three-stage turbocompressor, used for giving of compressed air in the high pressure furnace on a steel meltdown are shown. Features of controllers programming and selection of membership functions to definition of a residual life of system are considered. The example of those functions for one of components - the air filter is resulted. Modeling of system in SIMULINK is shown and advantages of such method of construction of a model are described. As results of calculations schedules of residual life changes of separate components of the system in the course of time are shown.

**Key words:** residual life of technical system, wear, reliability, Fuzzy-Logic, Matlab/Simulink.

**Коломійчук Сергей Геннадьевич** – н.с. Института промышленного производства и автоматизации им. Фраунгофера "Fraunhofer IFF", Магдебург, Германия, e-mail: [Sergii.Kolomiichuk@iff.fraunhofer.de](mailto:Sergii.Kolomiichuk@iff.fraunhofer.de).