

18. Protege. Available at: <http://www.protege.stanford.edu/download/registered.html> (Accessed 14 May 2015).
19. WebOnto. Available at: <http://webonto.open.ac.uk> (Accessed 14.05.2015).
20. Noy N., Musen M. The PROMPT Suite: Interactive Tools For Ontology Merging And Mapping, *Stanford Medical Informatics, Stanford Univ.*

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор М.М. Ошхунов.

**Кравченко Юрий Алексеевич** – Южный федеральный университет; e-mail: [krav-jura@yandex.ru](mailto:krav-jura@yandex.ru); 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371651; кафедра систем автоматизированного проектирования; доцент.

**Новиков Антон Александрович** – e-mail: [anton.a.novikov@gmail.com](mailto:anton.a.novikov@gmail.com); кафедра систем автоматизированного проектирования; аспирант.

**Марков Владимир Васильевич** – e-mail: [v\\_v\\_mar@mail.ru](mailto:v_v_mar@mail.ru); кафедра систем автоматизированного проектирования; доцент.

**Kravchenko Yury Alekseevich** – Southern Federal University; e-mail: [krav-jura@yandex.ru](mailto:krav-jura@yandex.ru); 44, Nekrasovskiy lane, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371651; the department of computer aided design; associate professor.

**Novikov Anton Alexandrovich** – e-mail: [anton.a.novikov@gmail.com](mailto:anton.a.novikov@gmail.com); the department of computer aided design; postgraduate.

**Markov Vladimir Vasilyevich** – e-mail: [v\\_v\\_mar@mail.ru](mailto:v_v_mar@mail.ru); the department of computer aided Design; associate professor.

УДК 004.891

**Н.А. Полковникова**

### **ГИБРИДНАЯ ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА НА ОСНОВЕ ВЕРОЯТНОСТНО-ДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ МОДЕЛЕЙ**

*Разработка и внедрение интеллектуальных гибридных экспертных систем является важным направлением повышения надёжности и эффективности технической эксплуатации сложных объектов и позволит использовать результаты мониторинга и автоматизировать процедуры решения эксплуатационных задач для информационной поддержки оператора. Концепция комплексного использования объекта управления с экспертной системой позволяет повысить эффективность результатов мониторинга и искусственную компетентность оператора для решения эксплуатационных задач. Рассмотрена разработка базы знаний гибридной экспертной системы с расчётом эталонных и текущих стохастических моделей по контролируемым параметрам, а также алгоритмов для автоматизированной интеллектуальной обработки информации на основе системного подхода для поддержки оператора в принятии правильных решений при эксплуатации сложных технических объектов на примере главного судового двигателя. Для реализации диагностико-прогнозирующих процедур в экспертной системе разработаны: модели, алгоритмы и программные модули, позволяющие на качественно новом уровне использовать оптимизационные методы и резервы фактического технического состояния для предотвращения отказов и увеличения межремонтного периода. Для формализации процедур эволюции данных в базе знаний экспертной системы разработана методика использования стохастических моделей различных типов и уровней: эталонных и текущих (адаптивных), локальных и интегральных, для получения которых требуется база данных измеряемых параметров, программное обеспечение и база данных моделей. Разработана модель и алгоритм многокритериальной оптимизации на основе эволюционных алгоритмов для поддержки оператора по выбору режима работы главного судового двигателя. Целью алгоритма является опре-*

*деление значений параметров топливоподачи для минимизации двух целевых функций: содержания оксидов азота в выпускных газах и удельного эффективного расхода топлива.*

*Гибридная экспертная система; объект управления; лицо, принимающее решение; стохастические модели; диагностико-прогнозирующие процедуры; множественная полиномиальная регрессия; адаптация; эволюционный алгоритм; многокритериальная оптимизация; фронт Парето.*

**N.A. Polkovnikova**

### **HYBRID EXPERT SYSTEM BASED ON PROBABILISTIC AND DETERMINISTIC MODELS**

*Development and implementation of intelligent hybrid expert systems is an important way in increasing reliability and operation efficiency of complex technical objects and allows applying monitoring results and automated solutions for operational tasks and information support of the operator. The concept of integrated use complex technical object with expert system improves the efficiency of monitoring and artificial competency of decision maker for solving operational problems and management. The development of knowledge base for hybrid expert system with calculation of reference and current stochastic models for the control parameters are considered as well as algorithms for automated intelligent information processing based on systematic approach to support the operator in making right decisions in operation of complex technical object on the example of ship's main engine. To implement the diagnostic and predictive procedures in expert system developed: models, algorithms and software modules that enable at qualitatively new level use optimization methods and actual technical condition reserves to prevent failures and increase overhaul period. To formalize procedures of data evolution in the knowledge base of expert system developed method using stochastic models of different types and levels: standard and current (adaptive), local and integral, for which required database of measured parameters, software and models database. Developed model and algorithm of multiobjective optimization based on evolutionary algorithms in order to support the operator in choice of the main marine engine operation mode. The algorithm goal is to determine values of fuel supply parameters in order to minimize two objective functions: the content of nitrogen oxides in exhaust gases and specific fuel oil consumption.*

*Hybrid expert system; control object; decision maker; diagnostic and predictive procedures; stochastic models; multivariate polynomial regression; adaptation; evolutionary algorithm; multiobjective optimization; front Pareto.*

**Введение.** В процессе развития судовых систем управления и мониторинга всё шире применяется комплексная автоматизация оборудования с повышением степени оперативной компьютерной обработки информации. Если автоматизация судового оборудования направлена на повышение эксплуатационной надёжности и сокращение численности экипажа, то компьютерная обработка информации с помощью экспертных систем (ЭС) вызвана необходимостью увеличения объёма контролируемых параметров, ужесточением требований по поддержанию оптимальных режимов работы, развитием методов оперативной диагностики и прогнозирования состояния оборудования. Для решения задач технического диагностирования объект рассматривается как «чёрный ящик»: входы – контролируемые параметры, выходы – наиболее информативные диагностические параметры, отражающие техническое состояние. Поскольку любой сложный объект управления состоит из определённой совокупности узлов (систем), техническое состояние каждого узла определяется группой диагностических параметров. В настоящей работе для описания объекта управления разработаны стохастические модели, поскольку модель «чёрного ящика» не предполагает достаточно точное знание физических взаимосвязей между используемыми в моделях переменными. В этом заключается важное преимущество такого подхода – универсальность метода и применимость для любого сложного технического объекта. База данных (БД) контролируемых и диагностических параметров позволяет по заданным алгоритмам получить эталонные и текущие стохастические модели. Эталонные модели отражают

«нормальное» техническое состояние объекта, а текущие – фактическое состояние в текущий период времени. Представлена архитектура гибридной ЭС, показаны алгоритмы построения интегральной стохастической модели для сложного технического объекта на примере главного судового двигателя (ГД). ГД рассматривается как сложная стохастическая система, рабочие процессы в каждом цилиндре подвержены воздействию случайных возмущений, что требует для их описания использования методов теории вероятности и математической статистики, теории информации и теории случайных процессов.

**Цель.** Цель заключается в разработке базы знаний гибридной ЭС с расчётом эталонных и текущих стохастических моделей по контролируемым параметрам, а также алгоритмов для автоматизированной интеллектуальной обработки информации для поддержки оператора (лица, принимающего решение – ЛПР) в принятии решений при эксплуатации сложных технических объектов.

**Постановка задачи.** Для реализации концепции комплексного использования объекта управления с ЭС для информационной поддержки ЛПР в принятии правильных решений необходимо разработать: 1) модели, алгоритмы и программные модули, позволяющие на качественно новом уровне использовать оптимизационные методы и резервы фактического технического состояния для предотвращения отказов и увеличения межремонтного периода; 2) модель и алгоритм многокритериальной оптимизации на основе эволюционных алгоритмов для поддержки ЛПР по выбору режима работы ГД. Целью алгоритма является определение значений параметров топливоподачи для минимизации двух целевых функций: удельного эффективного расхода топлива и содержания оксидов азота в выпускных газах. На современном флоте широкое применение получили системы централизованного контроля DATA CHIEF C20 (Kongsberg) и Damatic DNA (Valmarine), которые объединяют системы сигнализации, мониторинга и управления ГД. Однако к недостаткам указанных систем можно отнести усреднение результатов измерений, из-за чего наиболее информативная часть диагностической информации теряется, и отсутствие рекомендаций оператору. Поэтому в настоящей работе предложена концепция комплексного использования объекта управления с ЭС, которая заключается в расширении искусственной компетентности оператора, а также быстрой и качественной идентификации нарастающих неисправностей, наиболее эффективного использования результатов мониторинга для решения эксплуатационных задач с выдачей рекомендаций.

**Метод решения.** Для формализации процедур эволюции данных в базе знаний гибридной ЭС разработана методика использования стохастических моделей различных типов и уровней: эталонных и текущих (адаптивных), локальных и интегральных, для получения которых требуется БД измеряемых параметров, программное обеспечение и БД моделей. Стохастические модели, полученные в результате статистической обработки данных мониторинга, представляются в виде полиномов, которые связывают контролируемые параметры с диагностическими. Эталонные модели получены при нормальном техническом состоянии объекта, а текущие – при изменении (ухудшении) технического состояния. После проверки моделей на адекватность производится расчёт признаков неисправностей. В результате реализации диагностико-прогнозирующих процедур и разработанных алгоритмов ЛПР в интерактивном режиме получает поддержку в принятии правильных решений при эксплуатации сложных технических объектов.

**Решение задачи.** В основу обобщённого метода решения основных задач технической эксплуатации положена методика использования эталонных и текущих (адаптивных) стохастических моделей, для построения которых требуется БД измеряемых параметров, программное обеспечение и БД полученных моделей. Структурная схема ЭС для решения поставленных задач представлена на рис. 1.



Рис. 1. Взаимодействие экспертной системы с ЛПР и объектом управления

При решении задач технического диагностирования объект рассматривается как «чёрный ящик»: входы – контролируемые параметры, выходы – наиболее информативные диагностические параметры, отражающие техническое состояние объекта. Техническое состояние каждого узла объекта управления определяется группой диагностических параметров. Структура ЭС включает: базу данных, базу знаний, модули для построения эталонных и текущих стохастических моделей с проверкой адекватности, интерактивный интерфейс взаимодействия с оператором. База данных формируется из массивов численных значений контролируемых параметров. Объект управления с интегрированной системой централизованного мониторинга и ЛПР являются окружением или внешней средой ЭС. Разработанная архитектура реализована в ЭС для главного судового двигателя.

Для формирования БД режимных значений параметров двигателя достаточно производить 7–13 измерений с шагом  $\Delta t = 10\text{--}15$  мин. В то же время для надёжного распознавания внезапных отказов шаг дискретизации не должен превышать 60 с. Поэтому при формировании измерительного уровня информационной базы технической эксплуатации ГД в программе статистической обработки на первом этапе должна производиться оценка математического ожидания каждого из контролируемых параметров по выборке из 13 измеренных значений с шагом дискретизации 60 с. По выборкам контролируемых и диагностических параметров рассчитываются текущие (локальные) стохастические модели отдельных узлов, а по их совокупности формируется интегральная модель всего объекта. Текущие модели отражают фактическое состояние объекта в текущий период времени, а эталонные – «нормальное» техническое состояние. Построение эталонных стохастических моделей должно производиться после очередного восстановления «нормального» технического состояния в результате технического обслуживания или ремонта. Исследованиями установлено, что периодически через 200...300 часов нормальной работы (10...15 суток) должна выполняться корректировка эталонных моделей для восстановления их адекватности [1]. Для получения стохастических моделей непосредственно в условиях эксплуатации разработана программа расчета для ЭС (число факторов от одного до пяти) [2]. Программа позволяет автоматизировать процедуры корректировки моделей и входит в гибридную экспертную систему «Дизель эксперт» [3]. В ЭС предусмотрена возможность сохранять вводимые выборки в БД с

указанием времени и даты. Наблюдению подлежит диагностический параметр (отклик)  $Y$ , зависящий от набора контролируемых параметров (факторов)  $x_1, x_2, \dots, x_k$ . Строгая функциональная зависимость между  $Y$  и  $x$  недостижима по причинам влияния множества дополнительных неопределенных факторов (случайных воздействий). Это означает, что между  $Y$  и  $x$  существует лишь стохастическая (вероятностная) связь  $Y \approx f(x_1, x_2, \dots, x_k)$  [4–7]. При расчёте коэффициентов множественной регрессии использован аппарат матричного исчисления [8–12]. Результаты эксперимента можно представить в виде матрицы наблюдаемых значений параметров:

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nk} \end{pmatrix}, Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_n \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Затем составляются  $n$  несовместных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \beta_1 x_{11} + \beta_2 x_{12} + \dots + \beta_i x_{1i} + \dots + \beta_k x_{1k} &= y_1; \\ \beta_1 x_{21} + \beta_2 x_{22} + \dots + \beta_i x_{2i} + \dots + \beta_k x_{2k} &= y_2; \\ \dots & \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ \beta_1 x_{n1} + \beta_2 x_{n2} + \dots + \beta_i x_{ni} + \dots + \beta_k x_{nk} &= y_n \end{aligned} \right\}. \quad (2)$$

Система уравнений (2) является интегральной моделью сложного технического объекта, где каждое отдельное уравнение – локальная модель. Из этой системы уравнений можно определить  $k$  коэффициентов регрессии. Для решения такой системы использован матричный метод по следующему алгоритму:

1. Составляется транспонированная матрица  $X^T$ :

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nk} \end{pmatrix}, \quad X^T = \begin{pmatrix} x_{11}^T & x_{21}^T & \dots & x_{n1}^T \\ x_{12}^T & x_{22}^T & \dots & x_{n2}^T \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{1k}^T & x_{2k}^T & \dots & x_{nk}^T \end{pmatrix}. \quad (3)$$

2. Находится произведение матриц  $X$  и  $X^T$ .

3. Находится определитель полученной матрицы  $X \cdot X^T$ . Для этого матрица преобразуется в диагональную (треугольную).

4. Если  $\Delta^{X \cdot X^T} \neq 0$ , составляется обратная матрица  $(X^T X)^{-1}$ :

$$(X^T X)^{-1} = \frac{1}{\Delta^{X \cdot X^T}} \begin{pmatrix} (-1)^{1+1} M_{11} & (-1)^{1+2} M_{12} & \dots & (-1)^{1+k} M_{1k} \\ (-1)^{2+1} M_{21} & (-1)^{2+2} M_{22} & \dots & (-1)^{2+k} M_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ (-1)^{n+1} M_{n1} & (-1)^{n+2} M_{n2} & \dots & (-1)^{n+k} M_{nk} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где  $\Delta^{X \cdot X^T}$  – определитель матрицы  $X^T X$ , а  $(-1)^{n+k} M_{nk}$  является алгебраическим дополнением к элементу  $x_{nk}$ ;  $M_{nk}$  – минор, зависящий от номера строки  $n$  и номера столбца  $k$  матрицы, алгоритм нахождения которого идентичен нахождению определителя.

5. Находится произведение  $X^T Y$ . После выполнения перечисленных шагов можно получить искомые величины коэффициентов регрессии. Для этого необходимо найти произведение полученных матриц:

$$B = (X^T X)^{-1} X^T Y = \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \dots \\ \beta_k \end{pmatrix} = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k)^T. \quad (5)$$

Величины коэффициентов регрессии представляются в виде вектора-столбца коэффициентов  $\beta$  в файле отчета для вывода готовой зависимости. Адекватность моделей проверялась по критерию Фишера (F), относительному среднеквадратическому отклонению (S) и коэффициенту множественной детерминации, который определялся с помощью статистического пакета прикладных программ Statgraphics. Коэффициент множественной детерминации для каждой модели составил не ниже 91 %, относительное среднеквадратическое отклонение – не превышает 3 %. Задавая уровень значимости 0,05 по таблице Фишера для n-k степеней свободы, находится значение критерия F. Если оно больше вычисленного, то полученная в виде уравнения регрессии модель адекватна результатам эксперимента, в противном случае необходимо выбрать другой, более сложный вид уравнения. Обнаруженные связи и зависимости устойчивы только на определённый период времени и при определённых условиях с той или иной степенью вероятности. Поэтому формирование исходной (обучающей) выборки для построения эталонных и текущих стохастических моделей должно происходить в реальных условиях эксплуатации судна при неизменном техническом состоянии всех моделируемых элементов. База знаний ЭС и реализация диагностико-прогнозирующих процедур на основе эталонных и текущих стохастических моделей позволяет формализовать процедуры информационной поддержки оператора при оценке технического состояния ГД по контролируемым параметрам. Поскольку контролируемые параметры, как правило, зависят от режима работы двигателя и внешних условий плавания, то расчёт по текущим диагностическим моделям позволяет определить эталонные значения параметров при тех же условиях. При этом величина отклонений значений диагностических параметров от расчётных по моделям будет количественно характеризовать изменение технического состояния двигателя. Нарастающее отклонение фактического значения контролируемого (диагностического) параметра от его расчётного текущего значения должно рассматриваться, как развитие признака ухудшения технического состояния и может быть выявлено до достижения контролируемым параметром предельного значения, при котором предусматривается срабатывание аварийно-предупредительной сигнализации (АПС). На этом принципе для ЭС построен алгоритм предотвращения отказа, в котором распознавание отказа и включение АПС обеспечивается при превышении контролируемым параметром уставки с учётом доверительных интервалов фактических и ограничительных значений, а также при достижении критической скорости нарастания параметра. На рис. 3 представлена структурная схема алгоритма прогнозирования отказа. За эталонное значение диагностического параметра принимается его фактическое значение, полученное при нормальном техническом состоянии объекта, а за количественную характеристику изменения технического состояния принято отклонение  $\Delta ДП_i$  наблюдаемого фактического значения  $ДП_i^ф$  от эталонного  $ДП_i^э$ . Величина отклонения  $\Delta ДП_i$  проверяется на значимость по отношению к погрешности  $\varepsilon$  и в процессе эксплуатации ГД производится накопление выборки  $\Delta ДП_i$  достаточного объёма  $m$ . Аппроксимация данного временного ряда регрессионным полиномом позволяет получить модель тренда диагностического параметра  $\Delta ДП^{TC} = f(t)$ . Реализация алгоритма прогнозирования отказа предполагает выполнение следующих условий: процесс изменения технического состояния объекта происходит монотонно; должно быть известно предельное значение диагностического параметра [ДП]; модель тренда диагностического параметра должна допускать удовлетворительную по точности экстраполяцию. После вычисления по модели прогнозируемого значения  $ДП_{i+1}^{пр}$  и сравнения с предельным [ДП] производится оценка остаточного ресурса.

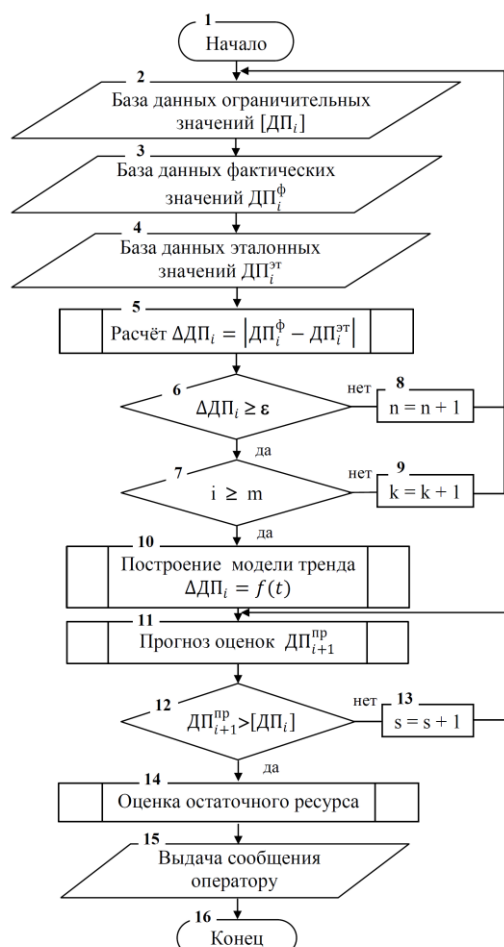


Рис. 3. Структурная схема алгоритма прогнозирования отказа

Разработанные алгоритмы решения задач технической эксплуатации сложных технических объектов реализованы в программном модуле ЭС «Дизель-эксперт». Другой задачей реализованной в ЭС является выбор режима работы ГД в зависимости от условий эксплуатации с помощью эволюционного алгоритма многокритериальной оптимизации.

#### Многокритериальная оптимизация на основе эволюционного алгоритма.

В ЭС реализован модифицированный эволюционный алгоритм (ЭА) многокритериальной оптимизации для минимизации двух целевых функций: удельного эффективного расхода топлива (SFOC – specific fuel oil consumption) и содержания оксидов азота  $\text{NO}_x$  в выпускных газах ГД. Моделирование оптимизации производилось с помощью разработанной модификации многокритериального алгоритма SPEA2 (Strength Pareto Evolutionary Algorithm), который позволяет найти несколько Парето-оптимальных решений за одну итерацию.

Множество решений задачи многокритериальной оптимизации состоит из Парето-векторов решений, которые не могут быть улучшены по одной целевой функции без ухудшения другой. Математическая модель многокритериальной оптимизации по удельному эффективному расходу топлива и содержанию выбросов  $\text{NO}_x$  представлена в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} f_{NO_x}(x) + \frac{1}{g_e(x)} \rightarrow \min - \text{целевые функции;} \\ f_{NO_x}(x) \leq 12 \text{ [г/кВт·ч]} \\ 0,186 \leq g_e(x) \leq 0,205 \text{ [кг/кВт·ч]} \end{array} \right\} - \text{граничные условия;} \quad (6)$$

$$f_{NO_x}(x) \cdot g_e(x) = 12 \cdot 0,205 = 2,46 - \text{ограничение.}$$

Данная модель (6) состоит из трёх составляющих: целевых функций, ограничения и граничных условий. Граничные условия показывают предельно допустимые значения целевых функций: удельного эффективного расхода топлива –  $g_e(x)$  и содержание  $NO_x$  в выпускных газах –  $f_{NO_x}(x)$ . Ограничение показывает произведение предельных значений целевых функций. Вероятностной составляющей ЭА являются применяемые правила отбора решений [13–16]. Эволюционирующий процесс оптимизации наиболее приспособленных особей итеративно создаёт движущийся к оптимальному набору решений фронт Парето (рис. 4).

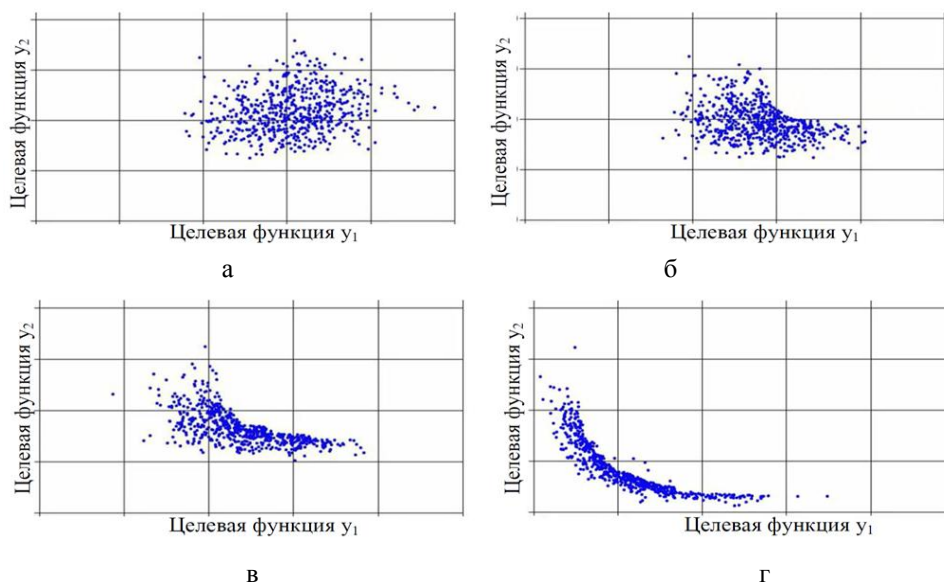


Рис. 4. Пример работы многокритериального ЭА: а – начальная популяция; б, в – промежуточные решения; г – оптимальный фронт Парето

В результате численного моделирования рабочего процесса по параметрам двухфазного впрыска топлива и работы модифицированного алгоритма SPEA2, получен оптимальный Парето-фронт по двум целевым функциям в 27-м поколении. Хромосома разработанного модифицированного ЭА представляет совокупность значений четырёх параметров топливоподачи. В связи с тем, что для кодирования наибольшего значения параметра необходимо 5 бит, то длина хромосомы составляет  $4 \cdot 5 = 20$  бит. Размер популяции в каждом поколении составляет 50 особей, а число родителей – 25, что составляет половину от всех особей в поколении. Разработанный модифицированный ЭА находит Парето-оптимальный фронт в 27-м поколении, сгенерировав за всю работу всего  $27 \cdot 50 = 1350$  особей. На рис. 5 представлены результаты работы модифицированного алгоритма SPEA2, указана начальная точка О, соответствующая режиму работы ГД без оптимизации.



Значения содержания  $\text{NO}_x$  и удельного эффективного расхода топлива нормализованы в (%). Целевые функции могут быть оптимизированы при определённых значениях параметров впрыска топлива. Поскольку всегда имеется компромиссное решение между целями оптимизации, окончательный выбор оптимальных значений параметров впрыска должен определяться условиями эксплуатации двигателя. Так, если целью является получение минимального содержания  $\text{NO}_x$ , то следует выбрать режим работы ГД, который определяется точкой М со снижением содержания  $\text{NO}_x$  на 24 %. Однако в этом случае экономия удельного эффективного расхода топлива будет минимальной (2,5 %). Если целью является минимизация удельного эффективного расхода топлива, то режим работы ГД будет определяться точкой К, с незначительным снижением содержания  $\text{NO}_x$  (на 4 %). Компромиссным решением будет режим работы ГД, который определяется точкой N, где содержание  $\text{NO}_x$  уменьшается на 18 % с уменьшением удельного эффективного расхода топлива на 4 %. Поскольку ЛПР заранее знает, какие из критериев его интересуют больше, то на полученном фронте Парето рассматриваются отдельные решения, оптимальные по наиболее значимым критериям [17–20].

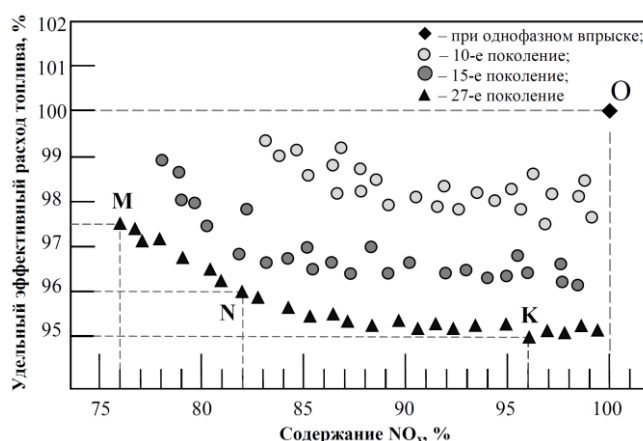


Рис. 5. Результаты оптимизации по двум целевым функциям в виде Парето-фронта для представленных поколений

Таким образом, ЛПР получает поддержку в принятии решения по выбору режима работы ГД: с минимальным значением удельного эффективного расхода топлива, с минимальным значением содержания оксидов азота в выпускных газах или компромиссный вариант в зависимости от условий эксплуатации.

**Заключение.** Гибридная ЭС на основе стохастических моделей, средств и методов технического диагностирования с использованием ЭА, а также разработанных программных модулей позволяет на качественно новом уровне использовать резервы фактического технического состояния объекта для увеличения ресурсных характеристик и перехода от системы планового обслуживания и ремонта к системе обслуживания по фактическому состоянию. Анализ формализованных процедур эволюции данных в базе знаний ЭС позволяет выделить в ней три взаимосвязанные области: базы данных параметров, программные модули с алгоритмами решения задач технической эксплуатации ГД и базы данных системы моделей. Для формализации процедур эволюции данных в ЭС разработана методика использования стохастических моделей различных типов и уровней: эталонных и текущих, локальных и интегральных. Реализация в ЭС многокритериальной оптимизации с помощью ЭА позволяет обеспечить выбор режима работы ГД в зависи-

мости от условий эксплуатации. Экспертная система разработана и внедрена для использования непосредственно в условиях эксплуатации ГД 6S50MC танкера «Тамбов» (ООО «СКФ Новошип»), чтобы автоматизировать и обеспечить поддержку ЛПР в следующих задачах технической эксплуатации: оценка текущего технического состояния и идентификация неисправностей по контролируемым параметрам, предотвращение и прогнозирование отказов, оптимизация удельного эффективного расхода топлива и содержания оксидов азота в выпускных газах.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Шишкин В.А.* Анализ неисправностей и предотвращение повреждений судовых дизелей. – М.: Транспорт, 1986. – 192 с.
2. *Полковникова Н.А., Курейчик В.М., Полковников А.К.* Расчет стохастических моделей для экспертной системы. Программа для ЭВМ. Свидетельство о гос. регистрации № 2014619228 от 11.09.2014. Оpubл. 20.10.2014 г. Официальный бюллетень RU ОБПБТ № 10 (96) 2014.
3. *Полковникова Н.А., Курейчик В.М., Полковников А.К.* Экспертная система для диагностики судовых дизелей «Дизель эксперт». Программа для ЭВМ. Свидетельство о гос. регистрации № 2012615935 от 28.06.2012. Оpubл. 20.09.2012 г. Официальный бюллетень RU ОБПБТ. – 2012. – № 3 (80). – С. 683-684.
4. *Ефремов Л.В.* Практика вероятностного анализа надежности техники с применением компьютерных технологий. – СПб.: Наука, 2008. – 216 с.
5. *Ивановский Р.И.* Теория вероятностей и математическая статистика. Основы, прикладные аспекты с примерами и задачами в среде Mathcad. – СПб.: БХВ-Петербург, 2008. – 528 с.
6. *Макаров И.М., Лохин В.М., Манько С.В., Романов М.П.* Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления. – М.: Наука, 2006. – 333 с.
7. *Пономарев И.В., Славский В.В.* О геометрической интерпретации метода наименьших квадратов // Известия Алтайского государственного университета. – 2012. – № 1 (73). – С. 119-121.
8. *Носко В.П.* Эконометрика. Введение в регрессионный анализ временных рядов. – М.: НФПК, 2002. – 270 с.
9. *Романов В.Н.* Системный анализ для инженеров. – СПб.: СЗГЗТУ, 2006. – 186 с.
10. *Шашков В.Б.* Прикладной регрессионный анализ. Многофакторная регрессия: учебное пособие. – Оренбург: ГОУ ВПО ОГУ, 2003. – 363 с.
11. *Воробьев С.Н., Осипов Л.А.* Регрессионный анализ: учеб.-метод. пособие. – СПб.: СПбГУАП, 2000. – 66 с.
12. *Гузик В.Ф., Кидалов В.И., Самойленко А.П.* Статистическая диагностика неравновесных объектов. – СПб.: Судостроение, 2009. – 304 с.
13. *Курейчик В.В., Курейчик В.М., Родзин С.И.* Теория эволюционных вычислений. – М.: Физматлит, 2012. – 260 с.
14. *Kenneth A. De Jong.* Evolutionary computation. A unified approach. The MIT Press, 2006. – 256 p.
15. *Neumann F., Witt C.* Bioinspired computation in combinatorial optimization. – Springer, 2010. – 216 p.
16. *Ashlock D.* Evolutionary computation for modeling and optimization. Springer, 2006. – 571 p.
17. *Brockhoff D., Zitzler E.* Objective reduction in evolutionary multiobjective optimization: theory and applications // Evolutionary Computation. – 2009. – No. 17 (2). – P. 135-166.
18. *Siegfried T., Bleuler S., Laumanns M., Zitzler E., Kinzelbach W.* Multi-Objective Groundwater Management Using Evolutionary Algorithms // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. – 2009. – No. 13 (2). – P. 229-242.
19. *Xiao-Bing Hu, M. Wang, E. Di Paolo.* Calculating complete and exact Pareto front for multiobjective optimization: a new deterministic approach for discrete problems // IEEE Transactions on cybernetics. – 2013. – Vol. 43, No.3. – P. 1088-1101.
20. *Hohm T., Zitzler E.* A Multiobjective evolutionary algorithm for numerical parameter space characterization of reaction diffusion systems // International Conference on Pattern Recognition in Bioinformatics (PRIB 2009), Heidelberg, Germany, 2009. Springer. – P. 162-174.

## REFERENCES

1. *Shishkin V.A.* Analiz neispravnostey i predotvrashchenie povrezhdeniy sudovykh dizeley [Failure analysis and damage prevention of marine diesel engines]. Moscow: Transport, 1986, 192 p.
2. *Polkovnikova N.A., Kureychik V.M., Polkovnikov A.K.* Raschet stokhasticheskikh modeley dlya ekspertnoy sistemy. Programma dlya EVM. Svidetel'stvo o gos. registratsii No. 2014619228 ot 11.09.2014 [The calculation of stochastic models for expert systems. The PC program. The certificate of state registration No. 2014619228 from 11.09.2014.]. Publ. 20.10.2014. Official bulletin RU OBPBT, No. 10 (96), 2014.
3. *Polkovnikova N.A., Kureychik V.M., Polkovnikov A.K.* Ekspertnaya sistema dlya diagnostiki sudovykh dizeley «Dizel' ekspert». Programma dlya EVM. Svidetel'stvo o gos. registratsii № 2012615935 ot 28.06.2012 [Expert system for diagnosis of marine diesel engines "Diesel expert". The PC program. Certificate of state registration № 2012615935 dated 28.06.2012.]. Publ. 20.09.2012. Official bulletin RU OBPBT, 2012, No. 3 (80), pp. 683-684.
4. *Efremov L.V.* Praktika veroyatnostnogo analiza nadezhnosti tekhniki s primeneniem kompyuternykh tekhnologiy [Practice of probabilistic reliability analysis technique using computer technology]. St. Petersburg: Nauka, 2008, 216 p.
5. *Ivanovskiy R.I.* Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika. Osnovy, prikladnye aspekty s primerami i zadachami v srede Mathcad [Probability theory and mathematical statistics. Fundamentals, practical aspects, with examples and problems in Mathcad]. St. Petersburg: BKhV-Peterburg, 2008, 528 p.
6. *Makarov I.M., Lokhin V.M., Man'ko S.V., Romanov M.P.* Iskusstvennyy intellekt i intellektual'nye sistemy upravleniya [Artificial intelligence and intelligent control systems]. Moscow: Nauka, 2006, 333 p.
7. *Ponomarev I.V., Slavskiy V.V.* O geometricheskoy interpretatsii metoda naimen'shikh kvadratov [Geometric interpretation of least squares method], *Izvestiya Altayskogo gosudarstvennogo universiteta* [the News of Altai State University], 2012, No. 1 (73), pp. 119-121.
8. *Nosko V.P.* Ekonometrika. Vvedenie v regressionnyy analiz vremennykh ryadov [Econometrics. Introduction to regression analysis of time series]. Moscow: NFPK, 2002, 270 p.
9. *Romanov V.N.* Sistemnyy analiz dlya inzhenerov [System analysis for engineers]. St. Petersburg: SZGZTU, 2006, 186 p.
10. *Shashkov V.B.* Prikladnoy regressionnyy analiz. Mnogofaktornaya regressiya: Uchebnoe posobie [Applied regression analysis. Multivariate regression: a tutorial]. Orenburg: GOU VPO OGU, 2003, 363 p.
11. *Vorob'ev S.N., Osipov L.A.* Regressionnyy analiz: Ucheb.-metod. Posobie [Regression analysis: textbook]. St. Petersburg: SPbGUAP, 2000, 66 p.
12. *Guzik V.F., Kidalov V.I., Samoylenko A.P.* Statisticheskaya diagnostika neravnovesnykh ob'ektov [Diagnostics of non-equilibrium statistical objects]. St. Petersburg: Sudostroenie, 2009, 304 p.
13. *Kureychik V.V., Kureychik V.M., Rodzin S.I.* Teoriya evolyutsionnykh vychisleniy [The theory of evolutionary computation]. Moscow: Fizmatlit, 2012, 260 p.
14. *Kenneth A. De Jong.* Evolutionary computation. A unified approach. The MIT Press, 2006, 256 p.
15. *Neumann F., Witt C.* Bioinspired computation in combinatorial optimization. Springer, 2010, 216 p.
16. *Ashlock D.* Evolutionary computation for modeling and optimization. Springer, 2006, 571 p.
17. *Brockhoff D., Zitzler E.* Objective reduction in evolutionary multiobjective optimization: theory and applications, *Evolutionary Computation*, 2009, No. 17 (2), pp. 135-166.
18. *Siegfried T., Bleuler S., Laumanns M., Zitzler E., Kinzelbach W.* Multi-Objective Groundwater Management Using Evolutionary Algorithms, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2009, No. 13 (2), pp. 229-242.
19. *Xiao-Bing Hu, M. Wang, E. Di Paolo.* Calculating complete and exact Pareto front for multiobjective optimization: a new deterministic approach for discrete problems, *IEEE Transactions on cybernetics*, 2013, Vol. 43, No. 3, pp. 1088-1101.

20. *Hohm T., Zitzler E.* A Multiobjective evolutionary algorithm for numerical parameter space characterization of reaction diffusion systems, *International Conference on Pattern Recognition in Bioinformatics (PRIB 2009)*, Heidelberg, Germany, 2009. Springer, pp. 162-174.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.А. Туркин.

**Полковникова Наталья Анатольевна** – Южный федеральный университет; e-mail: npolkovnikova@tti.sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: +79525617317; кафедра дискретной математики и методов оптимизации; аспирант.

**Polkovnikova Natalia Anatolievna** – Southern Federal University; e-mail: npolkovnikova@tti.sfedu.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79525617317; the department of discrete mathematics and optimization methods; postgraduate student.