

УДК 621.039

*А. Н. Харабет, О. Е. Зотеев, О. А. Чулкин**Научно-исследовательский институт атомных электрических станций  
при Одесском национальном политехническом университете (НИИ АЭС ОНПУ), г. Одесса***ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ АЭС**

Рассмотрены перспективы применения современной теории возможностей (экспертных систем, нечетких алгоритмов и нечеткой кластеризации) для раскрытия неопределенности относительно текущего состояния надежности энергетического оборудования АЭС.

**Ключевые слова:** атомная энергетика, надежность работы основного оборудования, теория возможностей, нечеткие алгоритмы и системы, нечеткая кластеризация.

Формализация обобщения (свертки) проектных, статистических и экспертных данных о надежности энергетического оборудования постоянно находится в сфере особого внимания специалистов по атомной энергетике Украины.

*Расчетно-теоретическую (проектную) оценку надежности оборудования* дает его разработчик на основании результатов исследований технического построения системы в целом и ее крупных агрегатов в частности. Для такой оценки разработчику необходимо формализовать (смоделировать) процесс изменения технического состояния системы в смысле потери ею надежности во времени. Иначе говоря, разработчик должен предоставить потребителю достоверную информацию о модели деградации поставляемой системы во времени.

Даже на этом уровне отношений «разработчик — потребитель» возможна неоднозначность. Стремление повысить сбыт оборудования вступает в противоречие со стремлением поддержать имидж надежного изготовителя, а в результате может оказаться, что данные о надежности не соответствуют действительности.

*Статистическая оценка показателей надежности* базируется на результатах анализа возникновения отказов систем, крупных агрегатов, узлов и элементов оборудования. При этом, прогнозируя показатели надежности, используют данные о надежности аналогичных систем и агрегатов, полученные на основе опыта эксплуатации в подобных условиях, и определяют коэффициент пересчета средней наработки до отказа одной системы или агрегата, считая, что он будет постоянным для всех аналогичных систем и агрегатов.

Статистическая оценка наиболее проста и доступна. Однако для определения показателей надежности эксплуатируемых систем и агрегатов эта информация запаздывает, а прогнозирование надежности весьма ориентировочно: оборудование

может значительно отличаться как конструкцией, так и реальными условиями его эксплуатации; кроме того, не всегда можно довериться способам регистрации отказов, которые происходят в процессе эксплуатации.

В последние годы все больший интерес вызывают разработка и применение *экспертных методов определения надежности*. В этом направлении Южно-Украинская АЭС совместно с Научно-исследовательским институтом атомных электрических станций при Одесском национальном политехническом университете (НИИ АЭС ОНПУ) прошли уже достаточно большой путь [1, 2] и получили обнадеживающие результаты. Например, с помощью достаточно простой методики, основанной на компьютерной технологии обработки оценок экспертов [3], можно получать параметры закона распределения отказов оборудования.

**Нечеткая кластеризация как метод теории возможностей.** Логика развития этого направления исследований подсказывает, что обеспечить максимальную достоверность данных о надежности можно, если произвести обобщение (свертку) всей получаемой информации.

Самый простой, традиционный способ свертки однородных данных — их усреднение [4, 5]. Однако в нашем случае данные о надежности не однородны. Одни из них представляются в виде упрощенного закона распределения отказов; другие — более сложным законом распределения отказов, где учитывается усиленный поток отказов в начале эксплуатации; третьи — набором экспериментальных точек, полученных по журналам регистрации отказов систем или агрегатов; четвертые — в виде оценок, произведенных экспертами. Эти оценки наиболее удобно представляются в виде наклонных линий, расположенных в поле функции распределения отказов.

В подобных условиях наиболее целесообразно применить *нечеткие методы кластеризации*

разнородных данных [5, 6]. Учитывая, что в нормальном законе распределения отказов

$$f_i = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(\frac{-(t_i - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

применяются два параметра:  $\mu$  — мода распределения и  $\sigma$  — стандартное отклонение, можно проводить нечеткую кластеризацию разнородных данных в поле этих двух параметров. Нахождение центра кластера в таком случае будет означать определение обобщенных параметров закона распределения отказов или, иначе, модели деградации надежности агрегата в процессе эксплуатации. Это может быть проиллюстрировано вычислениями по модели деградации отдельного агрегата, отказы которого подчиняются четкому нормальному закону распределения (рис. 1).

Однако реальные условия поступления информации о надежности оборудования на АЭС не позволяют надеяться на получение достоверных данных. Вследствие этого снижается надежность прогноза возможных отказов и аварий [1, 2]. В дополнение к статистическим данным информация о предполагаемой надежности может

быть получена в форматах, показанных на рис. 2. На приведенных графиках по вертикальной оси дана вероятность безотказной работы в диапазоне [0, 1], по горизонтальной оси — хронология эксплуатации оборудования по годам.

Кривая на рис. 2, *a* учитывает увеличенный поток отказов в период обкатки оборудования. Такая информация может предоставляться для тех агрегатов, которые являются традиционными в энергетике и закладываются в типовые проекты. Кривая на рис. 2, *b* не дает информации о начальном потоке отказов, так как поставка оборудования не является традиционной. Статистические данные, приведенные на рис. 2, *в*, получаются в результате выборки из баз данных по эксплуатации. Кривая на рис. 2, *г* имеет инверсный характер, поскольку эксперты более уверенно (с меньшей долей сомнения) отвечают на вопросы: «Вы гарантируете, что за  $N$  лет данный агрегат не даст ни одного отказа?». Или: «Вы гарантируете, что через  $M$  лет агрегат чаще будет в ремонте, чем в работе?». Фиксирование и специальная обработка таких ответов дают возможность привести экспертные данные к вероятностно-временной шкале [1, 2].

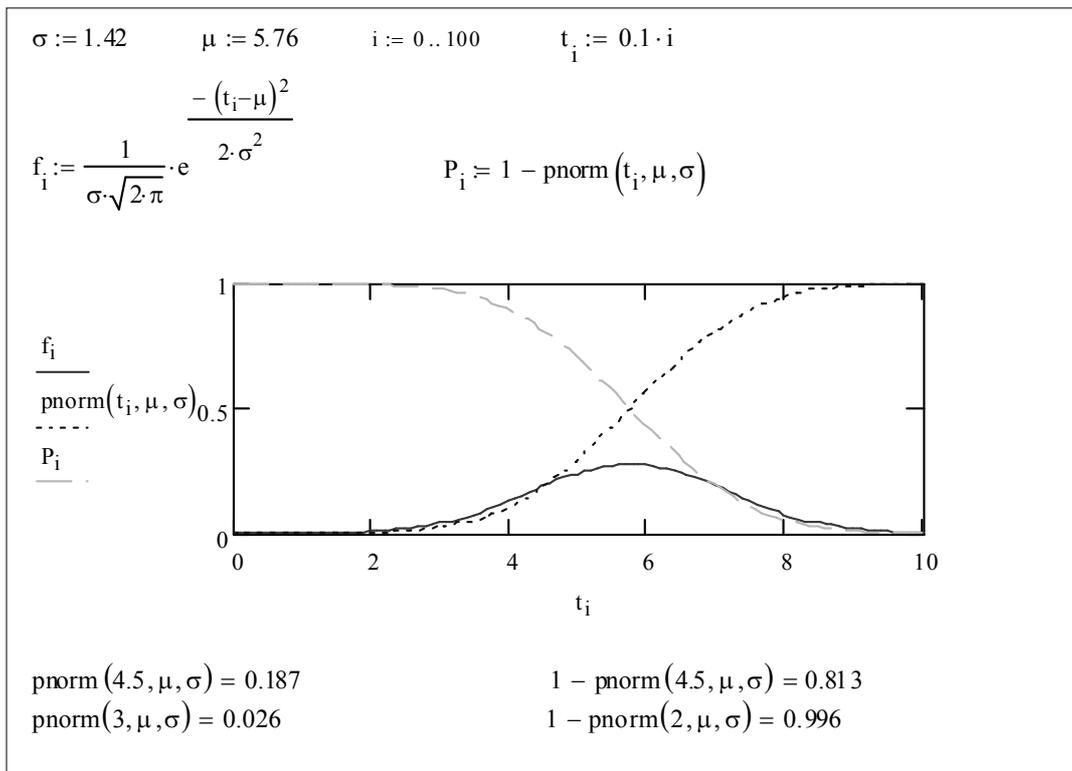


Рис. 1. Вычисления кривых нормального закона распределения отказов:

$f_i$  — плотность (производная) функции отказов (максимум плотности приходится на начальный период эксплуатации — 5,76 года);

$P_i$  — снижение вероятности безотказной работы (деградация надежности);

$t_i$  — время нормативной эксплуатации, лет

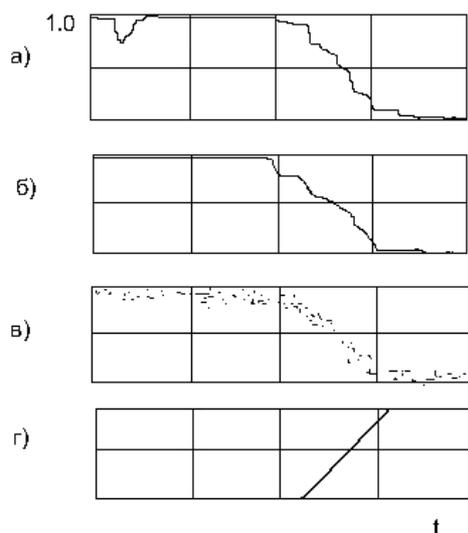


Рис. 2. Типичные форматы исходных данных о прогнозе падения надежности (деградации) агрегатов в процессе эксплуатации:

- a* — кривая деградации для типового оборудования;  
*б* — кривая деградации для нетипового оборудования;  
*в* — статистические данные, накопленные в процессе эксплуатации; *г* — исходные данные (до обработки), получаемые от экспертов

### Описание алгоритма нечеткой кластеризации при обработке разнородных исходных данных.

В настоящее время для обработки разнородных данных, содержащих неопределенность, наиболее известен пакет прикладных программ Fuzzy Logic Toolbox. Этот пакет, в свою очередь, является составной частью широко известного продукта

Matlab [3]. В пакет Fuzzy Logic Toolbox входит программа Clustering (Кластеризация), позволяющая в режиме графического интерфейса пользователя выявлять центры кластеров. Центры кластеров можно рассматривать как точки в многомерном пространстве данных, около которых происходит группирование по выбранным признакам.

Запуск программы Clustering осуществляется с помощью команды `findcluster`. В частности, пусть исходные данные о надежности представлены в виде записи процессов, происходивших при реальной эксплуатации некоторого агрегата в разное время, и состоят из пяти реализаций, или трендов (рис. 3).

На втором шаге программа формирует систему условного нечеткого вывода GENFIS 2. В структуре программы (рис. 4) каждый из пяти трендов оформлен в виде входной лингвистической переменной (`in1` — `in5`), а результат кластеризации — в виде выходной переменной `out1`.

На третьем шагу программа производит первую группировку экспериментальных данных в двух шкалах по вертикальной оси: от 0 до 60 ед. и от 0 до 10 ед. (рис. 5). Завершающие этапы действия программы показаны на рис. 6 и 7.

Для решения поставленной задачи можно воспользоваться и другой программой кластеризации, позволяющей в режиме графического интерфейса производить поиск центров кластеров. Эта программа также входит в пакет Matlab / Fuzzy Logic Toolbox (демоверсия).

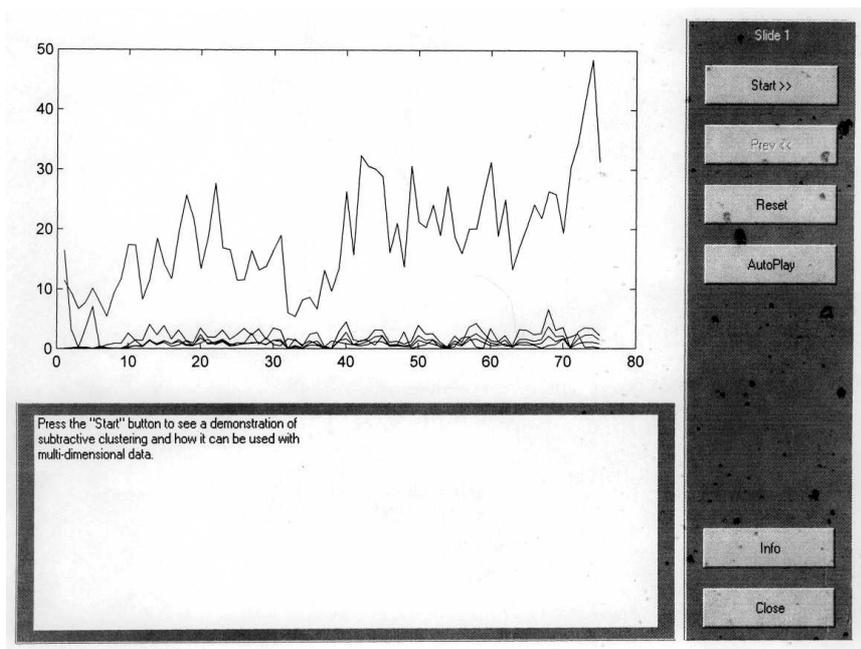


Рис. 3. Иллюстрация действия программы нечеткой кластеризации разнородных статистических исходных данных. Нажатие кнопки «Старт» дает возможность наблюдать за процедурой нечеткой кластеризации по шагам

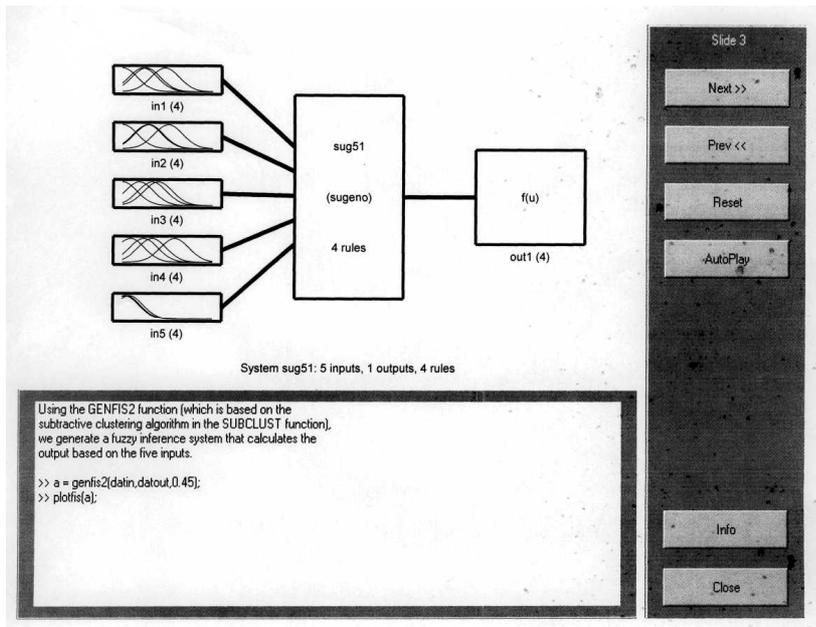


Рис. 4. Применение функции GENFIS 2, которая базируется на алгоритмах вычислительной кластеризации в форме SUBCLUST — функции, генерирующей систему нечеткого условного вывода и вычисляющей в данном случае значение одного выхода как следствие пяти входов

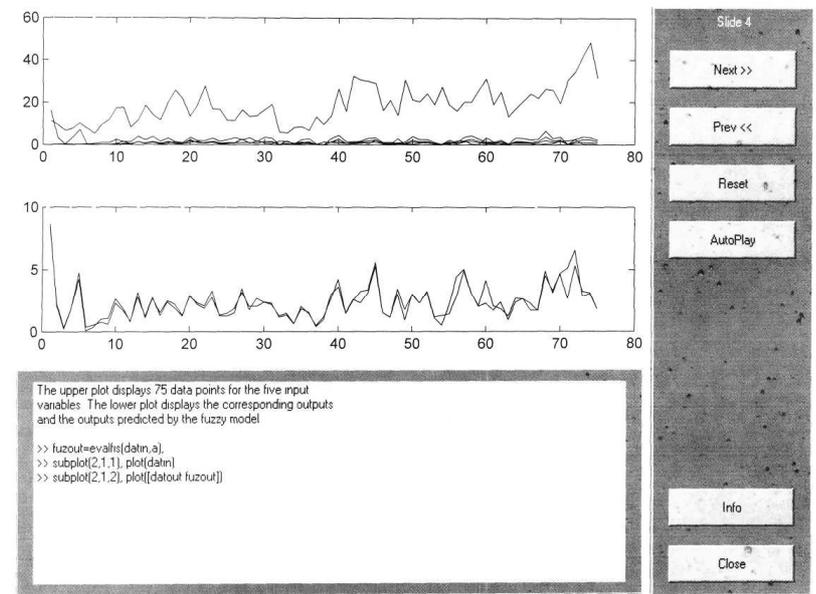


Рис. 5. На верхнем участке дисплея показано примерно 75 сильно отличающихся точек, полученных экспериментально для пяти случаев. Нижний участок дисплея корреспондирует эти входы, приводит к единой шкале 0—10 и предсказывает выходы нечеткой модели

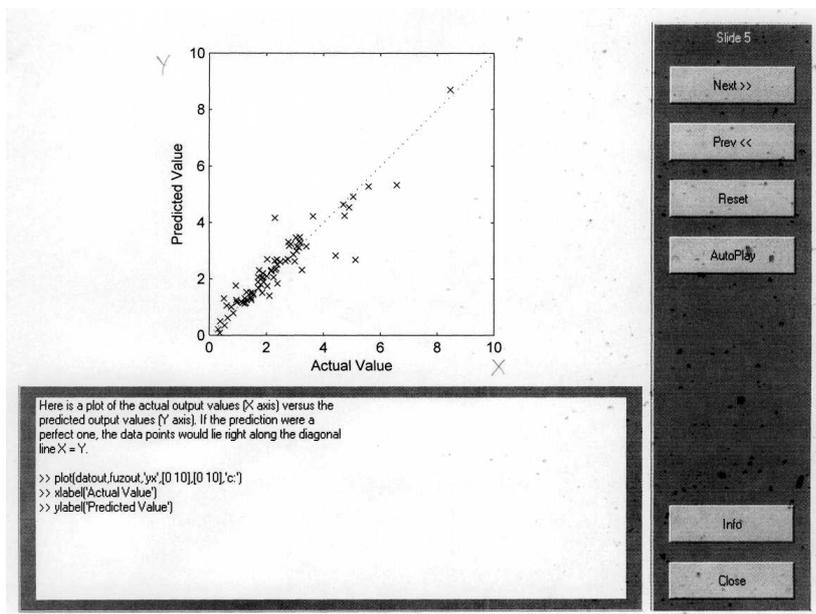


Рис. 6. Поле прогнозируемой связи между обобщенными путем кластерного анализа входами X выходами Y. Если модель верна, точки группируются вдоль диагонали X=Y

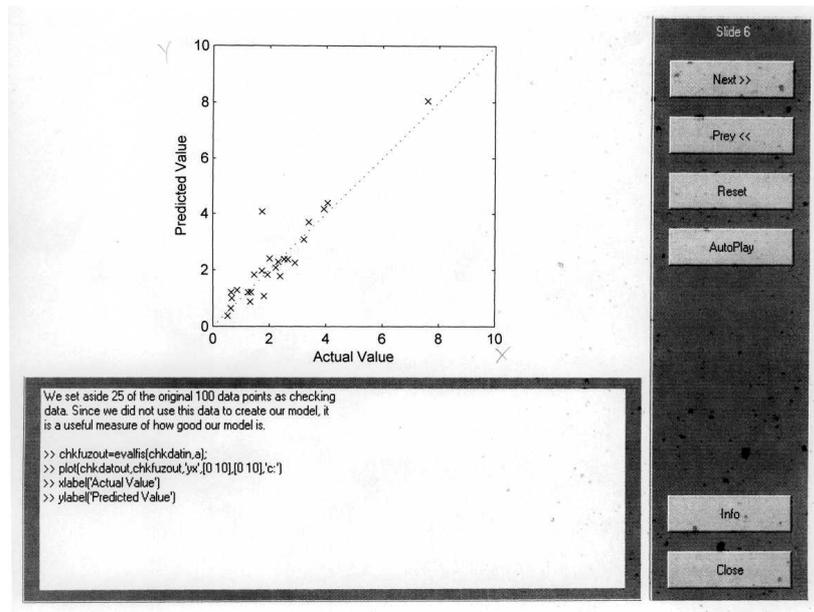


Рис. 7. Определены 25 точек (центров кластеров) из первоначальных 100 точек разнородных статистических данных. В то время, как применение первичного массива было затруднительно, после нечеткой кластеризации произошло «сворачивание» массива данных в 4 раза

Запуск программы осуществляется из командной строки директивой `findcluster`. В появляющемся окне программы (рис. 8), помимо стандартного набора пунктов (File, Edit, Window, Help), имеется набор управляющих кнопок и опций:

кнопка загрузки файла исходных данных — Load Data;

кнопка выбора алгоритма кластеризации — Method;

четыре расположенные ниже кнопки опций алгоритма (их названия меняются в зависимости от выбранного алгоритма);

кнопка начала итеративного процесса нахождения центров кластеров — Start;

кнопка сохранения результатов кластеризации — Save Center;

кнопка очистки (стирания) графиков — Clear Plot;

кнопка справочной информации — Info;

кнопка завершения работы с программой — Close.

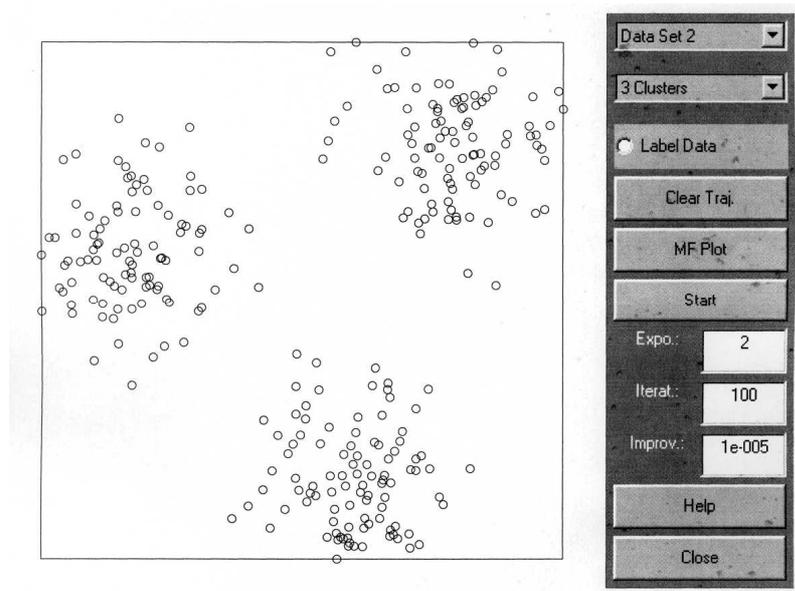


Рис. 8. Рабочее окно программы кластеризации после загрузки данных. Данные состоят из трех групп, в которых явно присутствует нечеткость (уплотнение точек в одних местах и разреженность в других)

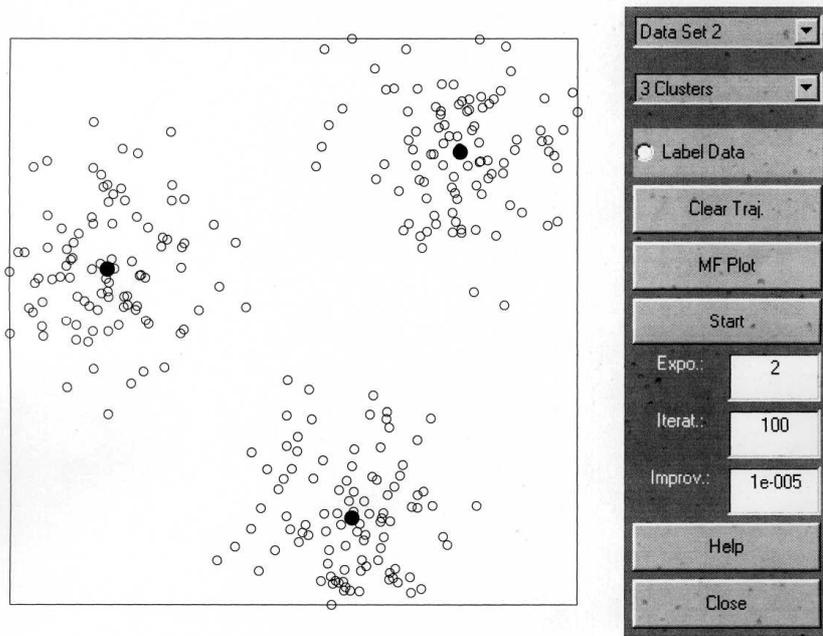


Рис. 9. В результате действия программы найдены три центра кластеров. Координаты центров сохраняются перед последним шагом кластеризации — поиском общего центра

В программе применяются два алгоритма выявления центров кластеров: Fuzzy c-means (можно перевести как «Алгоритм нечетких центров») и Subtractive clustering («Вычитающая, или субтрактивная, кластеризация»).

В результате действия программы найдены три центра кластеров (рис. 9). Координаты центров сохраняются перед последним шагом кластеризации — поиском общего центра.

Таким образом, на основании проверки эффективности рассмотренных алгоритмов можно утверждать о возможности «сворачивания» трех типов данных по надежности оборудования любой АЭС: проектно-производственных, статистических (в том числе по результатам эксплуатации на других станциях) и экспертных, полученных на действующем оборудовании. Тем не менее, данную проработку следует считать предварительной, так как результаты исследований надежности требуют дополнительной проверки.

Конечной целью оценки текущего значения надежности энергетического оборудования АЭС является обнаружение наименее надежного элемента энергоблока, а именно:

- наименее надежной технологической системы;
- наименее надежного агрегата ненадежной технологической системы;
- наименее надежного узла ненадежного агрегата;
- наименее надежного конструктивного элемента (детали) ненадежного узла.

Представляемая иерархия конструктивно-технологических структур позволяет [6, 7, 8], начиная

с рассмотрения основной единицы АЭС — энергоблока, целенаправленно дойти до элемента, который мог бы стать первопричиной аварии. При этом затраты на поиск и устранение первопричины возможной аварии могли бы оказаться минимальными.

Эксплуатация АЭС дает высокий экономический эффект, но сопровождается сильным экологическим и психологическим воздействием. Поэтому, в отличие от известных вариантов, при которых заполнение матрицы нечетких отношений выполняет один эксперт, мы рекомендуем, с целью достижения более высокого уровня надежности оценок, создавать бригаду экспертов в составе не менее пяти специалистов. Учитывая многообразие конструктивных и эксплуатационных факторов энергоблока, бригады экспертов целесообразно подбирать по следующим специализациям:

- технологические системы, механика и металловедение;
- электроснабжение, электротехника и электропривод;
- контрольно-измерительные системы, автоматизация и технологическая защита;
- оперативная деятельность эксплуатационного персонала.

Для рассмотрения задачи надежности как многокритериальной [6, 8, 9], необходимо ориентировать работу экспертов на применение ими проектных данных по обследуемому оборудованию, а также всех накопленных статистических данных. Решение должно вырабатываться только на основе свертки всех критериев надежности.

## Выводы

1. Применение теории возможностей совместно с методами анализа иерархий дает результаты, которые могут служить научной основой для экспертного сбора и обработки информации о текущем значении показателей надежности энергетического оборудования.

2. Технология сбора и обработки экспертной информации в условиях конкретной АЭС может быть основана на изложенных выше подходах.

3. Модели деградации энергетического оборудования могут быть с достаточной для практики

точностью определены через экспертную аппроксимацию. В качестве основного закона распределения отказов может служить нормальный закон распределения.

4. Для свертки разнородных данных по надежности, получаемых от организаций, которые проектируют и изготавливают энергетическое оборудование и комплектующие изделия к нему, статистических данных об отказах, полученных в результате эксплуатации, и данных, полученных от экспертов, целесообразно применение алгоритмов нечеткой кластеризации.

## Список использованной литературы

1. Методика определения технического состояния оборудования с применением экспертных оценок : Отчет о НИР. — Одесса : НИИ АЭС ОНПУ, 2006.
2. Частная методика получения вероятностных моделей деградации энергетического оборудования на основании результатов экспертного обследования на Южно-Украинской АЭС / НИИ АЭС ОНПУ; ЮУАЭС. — 2006.
3. Дьяконов В. Математические пакеты расширения MATLAB. Специальный справочник / В. Дьяконов, В. Круглов. — СПб. : Питер, 2001. — 480 с.
4. Yu P. L. Multiple Criteria Decision Making: Concepts, Techniques, and Extensions / Yu P. L. — N.Y.—London : Plenum Press, 1985.
5. Жамбю М. Иерархический кластер-анализ и соответствия / М. Жамбю. — М. : Финансы и статистика, 1988. — 342 с.
6. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати. — М. : Радио и связь, 1989. — 316 с.
7. Saaty T. L. Multicriteria Decision Making. The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation / T. L. Saaty. — University of Pittsburgh, RWS Publications, 1990. — 224 p.
8. Ларичев О. И. Теория и методы принятия решений / О. И. Ларичев. — М. : Лорос, 2000. — 296 с.
9. Triantaphillou E. Two new cases of rank reversals when the AHP and some of its additive variants are used that do not occur with the multiplicative AHP / Triantaphillou E. // J. of Multi-Criteria Decision Analysis, 2001. — V. 10. — P. 11—25.

Получено 12.06.2013