УДК 658.012:004.42(075.8)

Д.К. Елтышев, А.Б. Петроченков, С.В. Бочкарёв

К вопросу о применении генетических методов для решения задач поддержки жизненного цикла электрооборудования

Рассмотрена возможность применения теории генетических алгоритмов для решения задач поддержки жизненного цикла электрооборудования в целях улучшения технико-экономи-ческих показателей его эксплуатации.

Ключевые слова: поддержка жизненного цикла, электрооборудование, надежность, генетические алгоритмы.

Введение

В настоящий момент при управлении электроэнергетическими объектами возникает необходимость перехода к системе, охватывающей весь комплекс взаимосвязанных процессов обеспечения заданного технического состояния (ТС) электрооборудования (ЭО) в рамках его надежности и экономии производства. Данная необходимость связана в первую очередь с постоянным ростом количества единиц оборудования, приходящегося на баланс таких объектов, их разнородностью по конструкционному составу и степени важности, территориальной распределенностью и ограниченностью существующей системы планово-предупредительных ремонтов, не позволяющей в полной мере обеспечивать необходимые показатели как с точки зрения технических, так и финансовых аспектов.

В качестве одного из возможных путей решения подобной проблемы рассматривается возможность построения системы поддержки жизненного цикла (ЖЦ) ЭО.

Реализация системы имеет следующую направленность: повышение качества контроля над техническим состоянием ЭО, обеспечение оперативности и достоверности получаемой информации об оборудовании на этапе эксплуатации (эффективное управление информационными (статистика, формуляры мониторинга и диагностики и др.) и материальными (запасные детали) потоками в пространстве и во времени), увеличение скорости и качества принимаемых решений, повышение показателей надёжности и снижение стоимости эксплуатации ЭО [1].

В любой сфере жизнедеятельности существует стремление добиваться лучшего, оптимального. Построение качественной системы поддержки жизненного цикла ЭО также требует эффективного и рационального выполнения всех связанных с ней мероприятий. Основным этапом ЖЦ оборудования, на который делается акцент при построении подобной системы, является стадия эксплуатации, которая выступает и как основной этап накопления статистических данных, и как этап испытания, проверки оборудования на возможность соответствовать заданным показателям [2].

Генетические алгоритмы и жизненный цикл электрооборудования

Вопрос непосредственной разработки системы поддержки ЖЦ является отдельной темой и в статье не рассматривается.

Ключевой при реализации системы является задача поддержки оптимального (заданного) состояния оборудования (показателей надежности и работоспособности) в рамках его ЖЦ (в течение некоторого срока), о возможном решении которой и пойдет речь.

Поставленная задача относится к классу многопараметрических задач с ограничениями. Данный класс задач достаточно часто возникает при решении различных научно-практических проблем [3]. Для их решения разработано несколько методов: классический метод оптимизации, численные методы, методы градиентного поиска (с дроблением шага, метод наискорейшего спуска, метод сопряжения направлений), метод Ньютона и его модификация – метод Ньютона–Рафсона [4].

Все эти методы не решают задач с ограничениями. Необходимо добавить, что изначальная целевая функция может быть модифицирована при необходимости или дополнена новыми ограничениями, а также изменять свою размерность в зависимости от схемы, для которой строится оптимизационная задача [5].

В качестве метода решения, позволяющего создать эффективные алгоритмы для широкого класса задач, рассматривается использование подкласса методов направленного случайного поиска – методов эволюционных вычислений (генетических алгоритмов).

Возможно наиболее популярное приложение генетических алгоритмов (ГА) – оптимизация многопараметрической функции.

Сила ГА заключена в его способности манипулировать одновременно многими параметрами. Алгоритмы хорошо работают при решении крупномасштабных проблем оптимизации, могут быть использованы для широкого класса задач, просты и прозрачны в реализации, применимы в задачах с изменяющейся средой [5].

Подобно биологическому развитию каждый технологический продукт непрерывно развивается от стадии зарождения (проектирования) до стадии гибели (утилизации), подвергаясь различного рода воздействиям со стороны внешней среды и адаптируясь к ним.

Генетические алгоритмы позволяют моделировать естественные эволюционные процессы для эффективного решения оптимизационных задач науки и техники.

Алгоритмы работают с совокупностью «особей» – популяцией, каждая из которых представляет собой возможное решение данной проблемы. В каждой генерации генетического алгоритма хромосомы (закодированные решения) являются результатом применения некоторых генетических операторов [6].

Для реализации генетических алгоритмов (ГА) при разработке методики оценки и поддержки ЖЦ ЭО вводится понятие **«техноособи»** – это любой вид оборудования (трансформатор, воздушная линия), ЖЦ которого рассматривается с позиций биологической эволюции.

Пусть нам необходимо организовать процесс развития некоторой «техноособи». Зададимся конкретным временным отрезком (дискретом), величина которого может быть согласована с регламентированной эксплуатационной документацией (в частности, Правилами устройства электроустановок) для рассматриваемого вида ЭО. Будем считать, что на данном дискрете времени неизменны структура системы ЭС и размер отчислений (сумма) на проведение эксплуатационных мероприятий. Необходимо построить модель оптимальной эксплуатации «техноособи».

Логично, что ЖЦ оборудования представляет собой некоторую функцию времени, которая должна отражать поведение «техноособи» на протяжении этапа эксплуатации. Иначе говоря, функция должна иметь связь с эксплуатационными параметрами, характеризующими эффективность и качество работы данного вида ЭО или его элемента

$$\text{ЖЦ} = f(t).$$

Однако ЖЦ определяется в большей степени совокупностью различного рода мероприятий (в частности, управленческих и эксплуатационных), посредством которых осуществляется сопровождение оборудования, контроль его ТС и эффективности работы, поэтому зависимость ЖЦ ЭО от эксплуатационных параметров является скорее косвенной и выражается через систему подобных мероприятий, устанавливающих способ и порядок воздействия на значения параметров, их нормоконтроль. Исходя из этого, идея состоит не в прямой оптимизации конкретных значений параметров и показателей ЭО, а в оптимизации способа эксплуатации оборудования, с помощью которого осуществляется непосредственный контроль над этими параметрами, т.е. в построении модели оптимальной эксплуатации.

Действительно, в данной постановке функция ЖЦ получается многопараметрической и сложной в реализации, поскольку ее коэффициенты несколько «виртуальны». Кроме того, комплекс эксплуатационных мероприятий может быть весьма разновариантным и различаться даже в способе формирования и исполнения групп операций (по непосредственному контролю за ТС, по анализу данных и оценке ТС, по планированию работ и прогнозированию состояния и т.д.) [7].

Очевидно, что прямое применение математического аппарата для описания подобной функции ЖЦ является достаточно сложным, поскольку не совсем понятны эта зависимость и ее структура. Хорошим выходом в данной ситуации видится формирование некоторого обобщенного решения и построения алгоритма реализации данной функции.

Логично, что из идеи построения модели оптимальной системы эксплуатации вытекает идея обеспечения заданного ТС ЭО, что является основным направлением для систем поддержки ЖЦ, а тем самым идея поддержки показателей и параметров ЭО, в частности показателей надежности, на некотором заданном уровне [7, 9].

С учетом этого решение задачи поддержки ЖЦ включает в себя решение задачи поддержки надежности оборудования, а реализация функции ЖЦ предусматривает реализацию функции надежности.

$$R(t) = p = 1 - F(t),$$

где $F(t)$ определяет вероятность отказа за время t, $R(t)$ – вероятность безотказной работы [8].

Надёжность в «широком» смысле – комплексное свойство, которое в зависимости от назначения объекта и условий его эксплуатации может включать в себя свойства безотказности, долговечности, ремонтопригодности и сохраняемости, а также определённое

сочетание этих свойств [8]. В несколько другой интерпретации функцию надежности можно представить в виде

$$R'(t) = a_0 - bt,$$

где a_0 – начальные значения параметра, bt – его изменение за время t.

В идеальном случае значение такой функции должно равняться нулю, т.е. должно обеспечиваться минимальное отклонение от заданных значений. В такой постановке функция охватывает все поставленные задачи поддержки ЖЦ ЭО. Наиболее сложным теперь является формализация функции, а точнее всего – процесса управления ЖЦ с позиций ГА.

Процессу построения ГА для реализации функции ЖЦ должны предшествовать операции:

– выбор начальных условий;

– выбор критерия (критериальной функции);

– анализ и выбор ограничений.

Предположим, что «техноособь» вводится в эксплуатацию и характеризуется некоторыми нулевыми (начальными) условиями – заданным значением надежности, включающим в себя уровень ремонтопригодности, восстановления, наработки на отказ, вероятности безотказной работы и т.д.

В качестве начальных условий (входных данных для алгоритма) для рассматриваемого вида ЭО целесообразно использовать значения показателей, определяемые на стадии проектирования в форме, установленной заводом-изготовителем и отраженные в эксплуатационной документации (в частности, в паспортах или устройствах по эксплуатации на конкретный вид оборудования).

В этом случае основной задачей является обеспечение соответствия «реальная надежность оборудования – надежность, заданная в качестве нулевых условий», т.е. поддержка как можно более высокого уровня надёжности.

Необходимо ввести критерий оценки оптимальности, который будет характеризовать уровень рассматриваемых решений по контролю ТС оборудования.

Реализация генетического алгоритма предполагает задание функции приспособленности, или фитнес-функции (fitness function). Эта функция получает на вход двоичную хромосому и возвращает число, показывающее, насколько хороша эта хромосома, и является критерием для формирования алгоритма [6].

В рамках решаемой задачи пусть дана хромосома $X = x_1 x_2$ со значением выбранного показателя n и хромосома $Y = y_1 y_2$ со значением показателя n' и есть некоторое заданное значение m показателя, которого необходимо придерживаться, тогда

$$\text{fitness}(X) = |n - m|, \ \text{fitness}(Y) = |n' - m|.$$

В результате этих вычислений каждой хромосоме ставится в соответствие ее приспособленность (fitness) – число, которое оказывается сравнительно большим для плохих и сравнительно маленьким для хороших оптимальных показателей надежности, обеспеченных данной совокупностью методик.

Пусть, например, рассматривается некоторый дискрет времени, ограничивающийся первым отказом оборудования. Тогда в качестве критерия целесообразно использовать значение показателя наработки на отказ для выбранного вида ЭО. Чем меньше отклонение при расчете критериальной функции, тем оптимальнее способ сопровождения оборудования, тем оптимальнее набор мероприятий, обеспечивающих это сопровождение и их содержание (степень и качество их реализации).

Еще одним важным моментом являются анализ и выбор ограничений для рассматриваемой системы, а значит, и для алгоритма ее функционирования. Эксплуатация ЭО может проходить в рамках ограниченного финансирования, быть ограничена в приборной и документационной базе, в квалифицированных кадрах, а также в сроках проведения мероприятий и т.д. [9].

Ограничения являются необходимым дополнением, позволяющим учитывать особенности реальных технологических объектов и систем, а также факторы, влияющие на их функционирование. Большинство реальных задач носят именно детерминированный характер.

По завершении алгоритма (выходные данные) должен делаться вывод о качестве и эффективности существующей системы поддержки заданного ТС ЭО и его ЖЦ в целом и приниматься решение о возможной корректировке эксплуатационной программы (выходные данные).

Как было сказано выше, функция ЖЦ ЭО характеризуется набором мероприятий, с помощью которых осуществляется его сопровождение и поддержка его ТС на протяжении ЖЦ. Реализация мероприятий осуществляется на основе разработанных на предприятии (или организации) решений в виде соответствующих регламентов и методик проведения работ.

Каждое мероприятие, которое производится на этапе развития (эксплуатации) «техноособи», несет свою смысловую и практическую нагрузку с точки зрения обеспечения оптимальной функции ЖЦ и функции надежности и используется при кодировке хромосом (закодированных решений). То есть в этом случае каждый вид ЭО («техноособь») характеризуется конкретным набором мероприятий, с помощью которых осуществляется поддержка его эксплуатации и ЖЦ в целом. Отличие в генах хромосом будет проявляться в специфичности реализации мероприятий для различных методик и условий эксплуатации. Это будет проявляться: в применении различной приборной базы (например, в одном случае используются оптические средства при визуальной оценке состояния изоляторов, а в другом – нет), в учете ряда внешних факторов, в применении различных подходов по оценке состояния (вплоть до расстояния и точек контроля), а также в применении различных методов обработки результатов.

Перед непосредственным построением алгоритма для интерпретации понятий генетики касательно «техноособи» дополнительно необходимо ввести следующие определения.

Репродукция. Включает в себя некоторые элементы стандартизации, в качестве выработанных методик обслуживания и принятия решений. В результате репродукции мы получим элемент ЭО и набор регламентированных мероприятий, посредством которых будут осуществляться его сопровождение и контроль его ТС.

Мутация. В данном случае под мутацией будем понимать воздействие некоторых факторов на эксплуатацию оборудования:

– Условия окружающей среды (внешний фактор ввиду распределенности объектов является важным).

– Уровень квалификации обслуживающего персонала.

Кроссинговер. Заключается в усовершенствовании существующих методик контроля и обслуживания оборудования, на основе экспертных оценок и других видов анализа существующих систем. Необходима выработка конкретных решений по модернизации, поддержка решений различного рода документной базой. Завершающим этапом является разработка стандарта предприятия, регламентирующего и учитывающего все особенности набора мероприятий по контролю и обеспечению заданного ТС оборудования.

На основе вышеизложенных выводов и понятий формируется алгоритм, отображающий реализацию функции ЖЦ выбранного вида ЭО с позиций теории генетических методов (рис. 1).

Назначение блоков, приведенных на рисунке:

Блок 1 – комплекс операций, соответствующий понятию репродукции генетического моделирования (на данном этапе происходит инициализация популяции «техноособей» либо единичной «техноособи» для частного случая).

Блок 2 – проведение мероприятий, соответствующих процессу жизнедеятельности «техноособи».

Блок 3 – комплекс операций по оценке критерия (приспособленности) «техноособей» (включает в себя расчет значения выбранной целевой функции (фитнес-функции) и оценку уровня приспособленности каждой «техноособи» в соответствии с полученными значениями).

Блок 4 – набор операций и решений, связанных с определением возможных мутаций и степени их влияния на «техноособь»; проведение мероприятий, соответствующих операции кроссинговера генетического моделирования.

Блок 5 – ряд операций и решений, соответствующих определению «выживаемости» «техноособи» (решение о возможности дальнейшей ее жизнедеятельности либо о завершении ее ЖЦ, если это необходимо).

Итак, из приведенного выше алгоритма видно, что выполнение каждой группы мероприятий по сопровождению ЭО (см. рис. 1) влияет на функцию ЖЦ оборудования в целом. Рассмотрим возможность математизации поставленной задачи в упрощенном варианте.

По аналогии с функцией надежности, функция ЖЦ должна обеспечивать максимальное стремление к заданным условиям, т.е. модель оптимальной эксплуатации должна обеспечивать поддержание заданных показателей на должном уровне.

$$\text{ЖЦ} = R'(t) = R_0 - (A(p) + B(p) + C(p) + D(p) + \ldots) = 0,$$

где $A(p), B(p), C(p), D(p)$ – доля надежности, обеспечиваемая или поддерживаемая тем или иным мероприятием. Очевидно, что существует множество допущений и ограничений – условия эксплуатации, наличие приборной базы и квалификационного персонала и т.д. Для различных условий при одинаковых материальных затратах и одинаковых системах эксплуатации результаты могут быть разными.

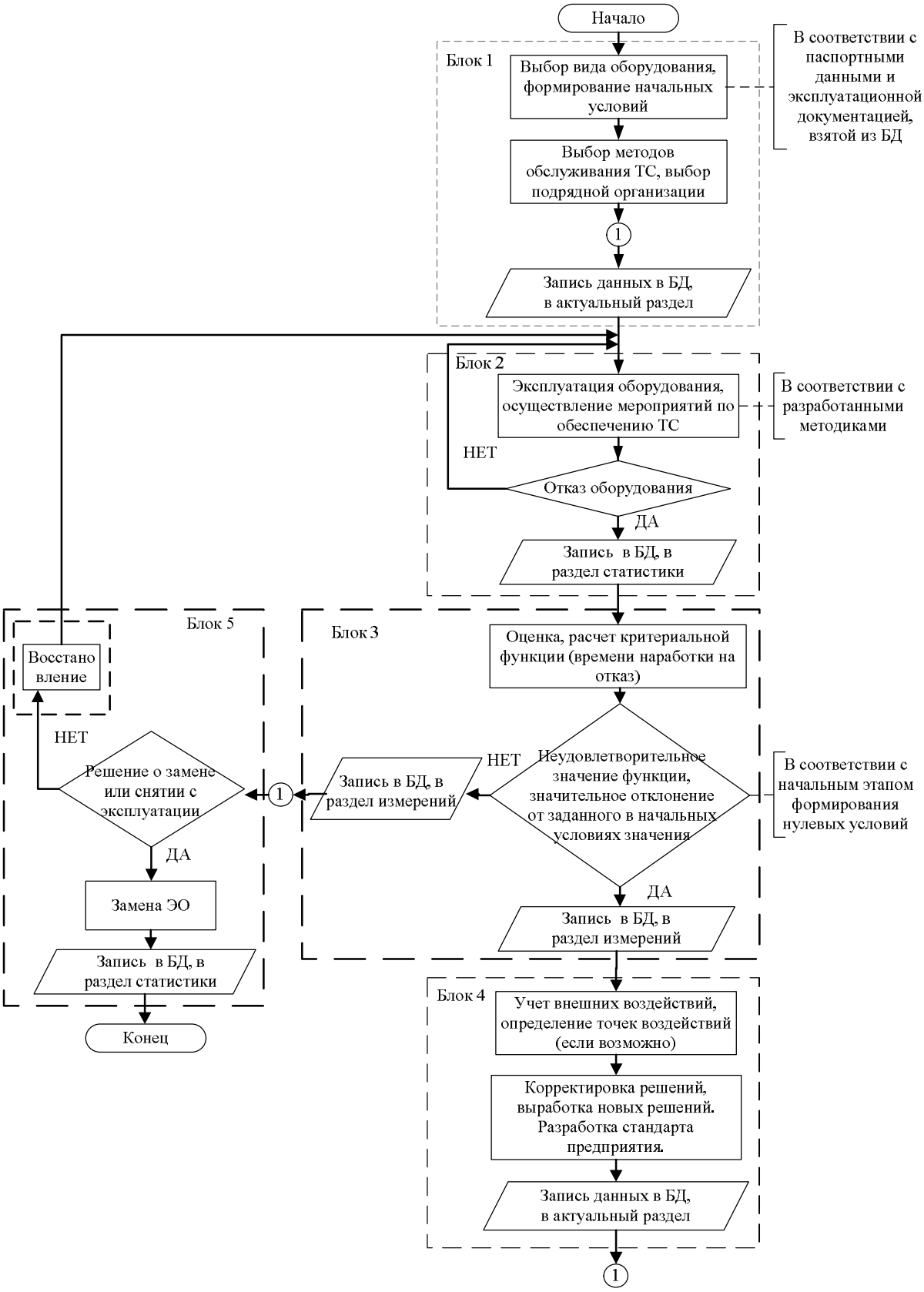

Рис. 1. Реализация функции ЖЦ ЭО с применением теории ГА

Пусть заданная надежность характеризуется временем наработки на отказ в 40 месяцев. Кроме того, пусть каждая из групп мероприятий (см. рис. 1) обеспечивает свой некоторый уровень выбранного показателя, величина которого случайно генерируется от 1 до 10. Дополнительно будем учитывать, что каждое мероприятие требует конкретных материальных затрат, и есть некоторое ограничение в финансовых средствах на реализацию системы. Затем обозначим: a_1 – a_3 – визуальный мониторинг, авральный мониторинг, мониторинг с применением специальных приборов инфракрасного и ультрафиолетового контроля; b_1 – b_3 – различные подходы к анализу, обработке и оценке ТС; c_1 – c_3 – подходы по выполнению ремонтных мероприятий; d_1 – d_3 – подходы по планированию и прогнозированию.

Упрощенное уравнение функции ЖЦ с позиций поддержания надежности будет иметь вид

$$\text{ЖЦ} = R_0 - (a_n(p) + b_n(p) + c_n(p) + d_n(p)) \le 0,$$

где R_0 – заданная надежность, $n = 1 \ldots 3$.

Уравнение ЖЦ для рассматриваемой задачи примет следующий вид:

$$a_n + b_n + c_n + d_n \ge 40, \text{ где } n = 1 \ldots 3. \quad (1)$$

Выберем три случайных решения, сформировав первое поколение хромосом (табл. 1).

Чтобы вычислить коэффициенты приспособленности (fitness), подставим каждое решение в выражение (1) и найдем отклонение (табл. 2).

Таблица 1

Формирование начальной популяции

Хромосома	(a,b,c,d)
1	(5,4,9,7)
2	(2,5,4,3)
3	(9,3,7,7)

Таблица 2

Расчет приспособленности

Хромосома	Коэффициент выживаемости
1	40 – 25 = 15
2	40 – 14 = 26
3	40 – 26 = 14

Чем выше приспособленность, тем больше шансов быть отобранным в качестве родительской хромосомы (табл. 3).

Для получения хромосом-потомков воспользуемся оператором «кроссовера» (crossover) [6]. В результате получим второе поколение хромосом (табл. 4) со свойственной им приспособленностью (табл. 5).

Таблица 3

Отбор родительских хромосом для последующих операций

Хромосома отца	Хромосома матери
3	1
1	2
3	2

Таблица 4

Симуляция операций кроссовера

Хромосома отца	Хромосома матери	Хромосома потомка
9 | 3,7,7	5 | 4,9,7	9,4,9,7
5 | 4,9,7	2 | 5,4,3	5,5,4,3
9,3 | 7,7	2,5 | 4,3	9,3,4,3

Таблица 5

Расчет коэффициентов выживаемости потомков

Хромосома	Коэффициент выживаемости
(9,4,9,7)	40 – 29 = 11
(5,5,4,3)	40 – 17 = 23
(9,3,4,3)	40 – 19 = 21

Продолжая таким образом, одна хромосома в конце концов достигнет коэффициента выживаемости 0 или близкого к нему, в зависимости от того, насколько хорошо необходимо обеспечить заданную надежность, т.е. станет решением. Поскольку мы задаемся некоторым финансовым ограничителем, то для каждой хромосомы нового поколения необходимо учитывать и дополнительный «финансовый» критерий, рассчитывая добавочные коэффициенты приспособленности (fitness). Тем самым выбор оптимального решения будет являться синтезом решений для двух функций: функции «надежности» и функции «затрат». На выходе мы получим оптимальную для конкретного случая возможных финансовых вложений модель эксплуатации ЭО с точки зрения обеспечения его надежности.

Заключение

Построение алгоритмов оценки ЖЦ является непростой задачей.

Для удобства решения подобных задач в реальных условиях необходима значительная статистическая база для формирования начальных условий, целей и вариантов реализации алгоритма, а также для анализа и оценки эффективности существующих или ранее использовавшихся мероприятий по обеспечению за ТС оборудования.

Возможность математизации функции ЖЦ и численного моделирования также определяется некоторым статистическим заделом, позволяющим хотя бы частично выявить

непосредственно численную связь эксплуатационных мероприятий с обеспечиваемыми ими показателями надежности.

Подобная база может быть сформирована с учетом собственного опыта либо на основе опыта других организаций и предприятий. Задачи подобного плана являются сложнее просто математических задач, поскольку имеют дело с реальными условиями и объектами и требуют учета ряда ограничений и факторов, а также дополнительных временных затрат. Однако в целом можно сказать, что использование теории и практики ГА для решения задач поддержки ЖЦ ЭО является весьма целесообразным и позволяет выбрать приемлемый вариант организации структуры управления и обеспечения заданного уровня ТС оборудования в зависимости от технико-экономической компоненты и реальных эксплуатационных условий. На производстве часто стоит задача поиска приемлемого обоснованного решения, что при использовании эволюционных методов всегда достигается [6].

Литература

1. Норенков И.Б. Информационная поддержка наукоемких изделий. CALS-технологии / И.Б. Норенков, Б.К. Кузьмик. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, – 2002. – 320 с.

2. Основы ИПИ-технологий: учеб. пособие / под общ. ред. проф. А.Н. Тихонова, проф. Ю.В. Полянскова. – Ульяновск: УлГУ, 2006. – 391 с.

3. Хемми А. Введение в исследование операций: 6-е изд.: пер. с англ. – М.: Изд. дом «Вильямс», 2001. – 912 с.

4. Гловацкая А.П. Методы и алгоритмы вычислительной математики: учеб. пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1999. – 408 с.

5. Исаев С.А. Разработка и исследование генетических алгоритмов для принятия решений на основе многокритериальных нелинейных моделей: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Н.Новгород, 2000. – 32 с.

6. Гладков Л.А. Генетические алгоритмы / под ред. В.М. Курейчика. – М.: Физматлит, 2006. – 320 с.

7. Бочкарев С.В. Автоматизация управления жизненным циклом электротехнической продукции: учеб. пособие / С.В. Бочкарев, А.Б. Петроченков, А.В. Ромодин. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 365 с.

8. Бочкарев С.В. Диагностика и надежность автоматизированных систем: учеб. пособие для вузов / С.В. Бочкарев, А.И. Цаплин. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2006. – 262 с.

9. Ящура А.И. Система технического обслуживания и ремонта энергетического оборудования: Справочник. – М.: НЦ ЭНАС, 2006. – 504 с.

Елтышев Денис Константинович
Аспирант каф. микропроцессорных средств автоматизации
Пермского государственного технического университета (МСА ПГТУ)
Тел.: 8-922-321-24-13
Эл. почта: zerothree@mail.ru

Петроченков Антон Борисович
Канд. техн. наук, доцент, зав. каф. МСА ПГТУ
Тел.: (8-342)239-18-21
Эл. почта: pab@pstu.msa.ru

Бочкарёв Сергей Васильевич
Д-р техн. наук, профессор каф. МСА ПГТУ
Тел.: (8-342)239-18-22
Эл. почта: bochkarev@pstu.msa.ru

D.K. Eltyshev, A.B. Petrochenkov, S.V. Bochkarev

On the application of genetic methods for solving the tasks of electrical equipment life cycle support

The article describes the possibility of application of the genetic algorithm theory for solving the problems of the electrical equipment life cycle support in order to improve technical and economic indices of its exploitation.

Keywords: life cycle support, electrical equipment, reliability, genetic algorithms.