

# АЛГОРИТМ ГЕНЕТИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ В ЗАДАЧЕ УПРАВЛЕНИЯ СРОКОМ СЛУЖБЫ ОБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

**Ю.И. Коконова**

*Иркутский национальный исследовательский технический университет*  
Россия, 664074, Иркутск, ул. Лермонтова, 81  
E-mail: dudareva.yuliya@mail.ru

**Е.В. Маркова**

*Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН*  
Россия, 664033, Иркутск, Лермонтова, 130  
E-mail: markova@isem.irk.ru

**Ключевые слова:** интегральное уравнение Вольтерра I рода, генетический алгоритм, управление, электроэнергетическая система.

**Аннотация:** Рассматривается модель развития электроэнергетической системы, представленная в виде интегрального уравнения Вольтерра I рода с переменным нижним пределом интегрирования, который учитывает срок жизни самого старого в момент времени  $t$  энергоблока электроэнергетической системы. Управление сроками службы оборудования электростанции осуществляется изменением эксплуатационных издержек и затрат на ввод мощностей. Критерий качества для задачи оптимального управления задан на весь прогнозный период. Предложен генетический алгоритм поиска функции оптимального управления сроком службы оборудования.

## 1. Введение

В докладе рассматривается интегральная модель, возникающая в задаче прогнозирования развития электроэнергетических систем (ЭЭС). Формализация задачи поиска долгосрочной стратегии ввода и демонтажа мощностей крупной ЭЭС может быть выполнена с помощью теории развивающихся динамических систем. Один из известных способов учета технологического состояния оборудования содержит интегральное уравнение Вольтерра I рода с двумя переменными пределами интегрирования [1]. Сфера применения интегральных моделей, введенных В.М. Глушковым, рассмотрена в работах [2, 3]. Данная математическая модель успешно используется для качественного исследования процессов замены устаревшего оборудования с учетом его возрастной структуры [3].

Цель данной работы состоит в разработке алгоритма численного моделирования функции оптимального управления сроком службы оборудования ЭЭС, которая обеспечивает на некотором промежутке времени (прогнозном периоде) минимизацию функционала качества, включающего известные удельные затраты на ввод нового и

эксплуатацию генерирующего оборудования, при естественных ограничениях на фазовую переменную.

## 2. Постановка задачи

Математическая модель развития ЭЭС записывается в виде интегрального уравнения Вольтерра I рода

$$(1) \quad \int_{t-c(t)}^t \beta(t,s)x(s)ds = p(t), t \in [t_0, T],$$

при условии

$$(2) \quad x(t) = x^0(t), t \in [t_0 - c(t_0), t_0],$$

где  $x(t)$  – искомый суммарный (по ЭЭС) ввод электрической мощности в момент времени  $t$ ;  $\beta(t,s) \equiv \beta(t-s)$  – коэффициент интенсивности использования в момент времени  $t$  единицы мощности, введенной ранее в момент  $s$ ;  $p(t)$  – динамика электропотребления (электрической нагрузки), которая считается известной;  $c(t)$  – срок жизни самого старого энергоблока в ЭЭС;  $x^0(t)$  – известная динамика ввода мощностей на предыстории  $[t_0 - c(t_0), t_0]$ .

Используя модель (1), (2), сформулируем задачу определения долгосрочных стратегий ввода мощностей  $x(t)$ , обеспечивающих с учетом выбывания устаревшего оборудования заданную потребность  $p(t)$  при минимуме суммарных затрат за прогнозный период на ввод новых и эксплуатацию генерирующих мощностей. Постановка задачи следующая:

найти

$$(3) \quad c^*(t) = \arg \min_{c(t) \in C} I(x(t)),$$

где

$$(4) \quad I(x(t)) = \int_{t_0}^T a^{t-t_0} \left\{ \int_{t-c(t)}^t u_1(t-s)u_2(s)x(s)ds \right\} dt + \int_{t_0}^T a^{t-t_0} k(t)x(t)dt,$$

при ограничениях (1), (2) и

$$(5) \quad 0 \leq x(t) \leq \bar{x}(t), t \in [t_0, T],$$

$$(6) \quad C = \{c(t) \mid \underline{c} \leq c(t) \leq \bar{c}, c'(t) < 1, t \in (t_0, T)\}.$$

Здесь  $u_1(t-s)$  – затраты на эксплуатацию в момент  $t$  единицы мощности, введенной ранее в момент времени  $s$  (с увеличением срока эксплуатации эта величина возрастает);  $u_2(t)$  – удельные затраты на эксплуатацию всех мощностей, введенных к моменту  $t$ ;  $k(t)$  – удельные затраты на ввод единицы мощности в момент  $t$ ;  $a^{t-t_0}$  – коэффициент дисконтирования затрат,  $0 < a < 1$ .

Эти функции, а также  $\bar{x}(t)$ ,  $\bar{c}$ ,  $\underline{c}$ ,  $p(t)$  и установленные мощности  $x^0(t)$  на предыстории  $[t_0 - c(t_0), t_0]$  считаются известными. Заметим, что ограничение  $c'(t) < 1$  означает, что скорость увеличения возраста самого старого элемента не может быть больше скорости естественного процесса старения.

Нелинейное вхождение управляющего параметра  $c(t)$  в (1), а также ограничение на фазовую переменную (5) обуславливают сложность поставленной задачи.

Решение рассматриваемой задачи на реальных данных с изменением различных параметров подробно рассмотрено в работах [5-7]. С развитием новых технологий появились новые численные методы решения задач оптимального уравнения, в частности такие, как генетический алгоритм.

## 3. О специфике вычислительного алгоритма

Для поиска решения  $c^*(t)$  задачи оптимального управления воспользуемся методами генетического программирования.

Генетические алгоритмы – это семейство поисковых алгоритмов, идеи которых подсказаны принципами эволюции в природе. Имитируя процессы естественного отбора и воспроизводства, генетические алгоритмы могут находить высококачественные решения задач, включающих поиск, оптимизацию и обучение. В то же время аналогия с естественным отбором позволяет этим алгоритмам преодолевать некоторые препятствия, встающие на пути традиционных алгоритмов поиска и оптимизации, особенно в задачах с большим числом параметров и сложными математическими представлениями [4].

Цель генетических алгоритмов – найти оптимальное решение некоторой задачи. Если дарвиновская эволюция развивает популяцию отдельных особей, то генетические алгоритмы развивают популяцию потенциальных решений данной задачи, называемых индивидуумами. Эти решения итеративно оцениваются и используются для создания нового поколения решений. Те, что лучше проявили себя при решении задачи, имеют больше шансов пройти отбор и передать свои качества следующему поколению. Так постепенно потенциальные решения совершенствуются в решении поставленной задачи [4].

Популяция представляет собой набор случайно сгенерированных особей (родителей), который в дальнейшем эволюционирует, и текущее поколение будет заменяться новым. Для решения поставленной задачи оптимизации генерируется область допустимых значений с определенным набором генов, заданным заранее, из которой в дальнейшем случайным образом будет генерироваться особь или набор определенных решений. Так как происходит оптимизация срока службы оборудования, набор выборки будет большой.

Особь представляет собой набор из  $n$  сгенерированных значений. Если проецировать на задачу оптимизации динамики демонтажа оборудования, то предполагаемый набор представлен из 50 различных значений. После генерации происходят изменения различных показателей при указанных ранее условиях, поставленных в постановке задачи оптимизации. Предполагается, что срок службы оборудования может увеличиваться только на единицу за один год, а уменьшаться на неограниченное количество лет. Следовательно, набор генов в особи должен быть представлен с ограничением в соседних генах. Если условия выполняются новой особью, то она имеет возможность мутировать, т.е. обновить свою популяцию, внести новые сочетания генов в хромосомы, стимулируя тем самым поиск в неисследованных областях пространства решений. Процесс мутации вводится либо скрещиванием, когда меняются значения между особями различными методами, либо мутация позволяет обходить локальные минимумы, т.е. за счет изменения в генах, определенных точках хромосомы.

На каждой итерации алгоритма хромосомы оцениваются с помощью функции приспособленности. Это функция, которую мы стремимся оптимизировать, или задача, которую пытаемся решить. Определение целевой функции или задачи оптимизации является минимизация суммарных затрат, которая позволяет понять, насколько та или иная особь нас устраивает.

После того, как вычислены функции приспособленности всех хромосом в популяции, начинается процесс отбора до заданного количества переборков или достижения целевой функции, который определяет, какие именно индивидуумы будут оставлены для воспроизводства, т. е. создания потомков, образующих следующее поколение. Отбор выполняется в начале каждой итерации цикла генетического алгоритма, чтобы выбрать из текущей популяции тех индивидуумов, которые станут

родителями индивидуумов в следующем поколении. Отбор носит вероятностный характер, причем вероятность выбора индивидуума зависит от его приспособленности, так что у более приспособленных индивидуумов шансы отобраться выше. Далее применяется расчет с помощью программного кода, описывающего вычисления функционала затрат, где  $c(t)$  является решением задачи оптимизации с помощью генетического программирования.

В дальнейшем этот алгоритм будет применен к решению задачи поиска оптимальной стратегии замены устаревшего оборудования крупной ЭЭС России с использованием реальных данных.

Исследование Е.В. Марковой выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект FWEU-2021-0006, тема No. АААА-А21-121012090034-3).

## Список литературы

1. Глушков В.М., Иванов В.В., Яненко В.М. Моделирование развивающихся систем. М.: Наука, 1983. 350 с.
2. Маркова Е.В., Сидлер И.В., Труфанов В.В. О моделях развивающихся систем типа Глушкова и их приложениях в электроэнергетике // Автоматика и телемеханика. 2011. № 7. С. 20-28.
3. Апарцин А.С., Сидлер И.В. Интегральные модели развития систем электроэнергетики с учетом старения оборудования электростанций // Электронное моделирование. 2014. Т. 36, № 4. С. 81-88.
4. Панченко Т.В. Генетические алгоритмы / Под ред. Ю. Ю. Тарасевича. Астрахань: Издательский дом «Астраханский университет», 2007. С. 6-15.
5. Апарцин А.С., Маркова Е.В., Труфанов В.В. Интегральные модели развития электроэнергетических систем. Препринт ИСЭМ СО РАН, 2002. № 1. 36 с.
6. Иванов Д.В., Караулова И.В., Маркова Е.В., Труфанов В.В., Хамисов О.В. Численное решение задачи управления развитием электроэнергетической системы // Автоматика и телемеханика. 2004. № 3. С. 125-136.
7. Апарцин А.С., Караулова И.В., Маркова Е.В., Труфанов В.В. Применение интегральных уравнений Вольтерра для моделирования стратегий технического перевооружения электроэнергетики // Электричество. 2005. № 10. С. 69-75.

