

УДК 004.896

М.В. Мартынюк

**АДАПТАЦИЯ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ
УПРАВЛЕНИЯ СОСТОЯНИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматривается подход к решению задач интеллектуального управления состояниями энергосетей в нормальных режимах работы. Разработан и исследован генетический алгоритм автоматизированной настройки параметров устройств управления для обеспечения качества электроэнергии с минимизацией общих энергопотерь. Алгоритм позволяет управлять нормальными режимами работы энергосетей произвольной архитектуры большой размерности, повышая качество электроэнергии и минимизируя энергопотери.

Ключевые слова: интеллектуальное управление, распределительная электрическая сеть, имитационная модель, качество электроснабжения, энергопотери.

Введение

В настоящее время большое внимание уделяется проблеме повышения надежности систем электроснабжения. Ставятся стратегически важные задачи интеллектуализации энергосистем на основе информационных технологий сбора, интеллектуальной обработки и передачи большого объема информации внутри электрических сетей (ЭС), а также автоматизации процессов управления с использованием современных информационных и коммуникационных технологий. Для реализации стратегий развития интеллектуальных сетей разрабатываются активно-адаптивные устройства управления (УУ), автоматизированная настройка параметров которых обеспечит эффективное функционирование ЭС в нормальных режимах работы. Создано новое эффективное комплексное устройство регулирования напряжения – твердотельный регулятор величины и фазы вольтдобавочного напряжения (ТРВДН) [1-4]. При этом управление состояниями сети с помощью ТРВДН выполняется вручную. В связи с этим, необходима разработка автоматизированных алгоритмов оперативной настройки его параметров с целью эффективного управления потоками мощности в распределительных электрических сетях различной конфигурации – протяженных, радиально-магистральных, гексагональных. Регулирование параметров распределительной электрической сети должно осуществляться в режиме реального времени. Решение данной задачи позволит повысить качество электроэнергии, надежность энергосетей и снизить энергопотери. Таким образом, актуальна разработка алгоритмов управления состояниями сложных ЭС произвольной архитектуры для обеспечения нормальных режимов их работы.

Постановка задачи

В данной работе рассматривается решение двух следующих задач управления состоянием электрической сети (под *состоянием электрической сети* будем понимать набор параметров ЭС – значения напряжений в узлах сети, энергопотерь в линиях передач, а также значения параметров управляющих напряжением устройств).

1. Обеспечение напряжения потребителей в пределах допуска (1):

$$\max |\delta \mathbf{U}(\mathbf{P}, \mathbf{K})| \leq k U_{ном}, \quad (1)$$

где $\delta \mathbf{U}(\mathbf{P}, \mathbf{K})$ – вектор относительных отклонений напряжений потребителей от номинального $U_{ном}$, \mathbf{P} – вектор состояния (вектор нагрузок потребителей определяющих текущее состо-

яние энергосети), \mathbf{K} – вектор управления (вектор параметров регулирования комплекса устройств управления), k – допустимый коэффициент отклонения напряжения от номинального (по ГОСТ 32145-2013 значение допустимого отклонения 10 %, т.е., $k = 0.1$).

2. Снижение общих энергопотерь в сети при транспортировке электроэнергии (2):

$$P_{\text{общ.}}(\mathbf{P}, \mathbf{K}) = \sum_{i=1}^N \Delta P_i(\mathbf{P}, \mathbf{K}) \rightarrow \min, \quad (2)$$

где $P_{\text{общ.}}(\mathbf{P}, \mathbf{K})$ – общие энергопотери в линиях передачи электрической сети, $\Delta P_i(\mathbf{P}, \mathbf{K})$ – энергопотери в i -й линии передачи электроэнергии, i – номер линии передачи электрической сети, N – количество линий передачи в электрической сети.

Решение обеих задач является вариационным относительно параметров регулирования \mathbf{K} . Первая задача на практике является приоритетной, вторая задача может быть решена в рамках ограничений, накладываемых первой задачей, т.е. целевая функция первой задачи становится ограничением во второй задаче.

Решение задачи управления состоянием ЭС с помощью комплекса УУ осложняется следующими факторами:

- чрезвычайно высокая сложность получения точных аналитических решений;
- существование множества решений (различных векторов управления \mathbf{K}) отвечающих требованию (1);
- изменение коэффициента регулирования отдельного УУ изменяет состояние всех элементов энергосети.

Однако то, что влияние УУ на элементы ЭС «ослабевает» по мере их удаления от данного УУ, позволяет использовать для решения данной задачи различные оптимизационные алгоритмы, в частности, генетический алгоритм [5]. Решение задачи «подбора» оптимального, т.е., отвечающего требованиям (1) и (2), вектора параметров регулирования может осуществляться на имитационной модели распределительной электрической сети (РЭС).

Описание имитационной модели

Рассмотрим распределительную электрическую сеть (РЭС) с активно-адаптивной структурой, представляющую совокупность связанных между собой линиями электропередач элементов трех типов: специальных устройств управления, потребителей и производителей электроэнергии. Рассмотрим наиболее универсальную и сложную в плане управления РЭС многоконтурной конфигурации, структура имитационной модели которой приведена на рис. 1. Сеть верхнего уровня содержит только источники напряжений и понижающие трансформаторы (рис. 2а). Сеть нижнего уровня соответствует уровню конечных потребителей электроэнергии (рис. 2в).

Конечных потребителей в имитационной модели будем представлять понижающими трансформаторами и активно-реактивными нагрузками. Структурная схема имитационной модели представляется неориентированным графом с вершинами (узлами) и ребрами (устройствами/линиями) различных типов. Каждый тип ребер и узлов графа обладает набором свойств. Узлам в графовой модели соответствуют точки приложения потенциала, отображаемые на структурных схемах узловые точки с указанием их местоположения (x, y – координаты узлов), неотображаемые на структурных схемах узловые точки, не привязанные к координатам, представляющие собой, например, соединение линий передач, контакты – соединения в трехфазной сети (одной узловой точке могут соответствовать до 4 контактов – фазы A, B, C и нейтраль N). Ребрам графа соответствуют линии электропередачи с соответствующими характеристиками (длина, удельное сопротивление, площадь поперечного сечения), нагрузки/потребители (потребляемая мощность, характеризуются элементом вектора состояния \mathbf{P}), УУ (комплексный коэффициент трансформации, характеризуются элементом вектора управления \mathbf{K}).

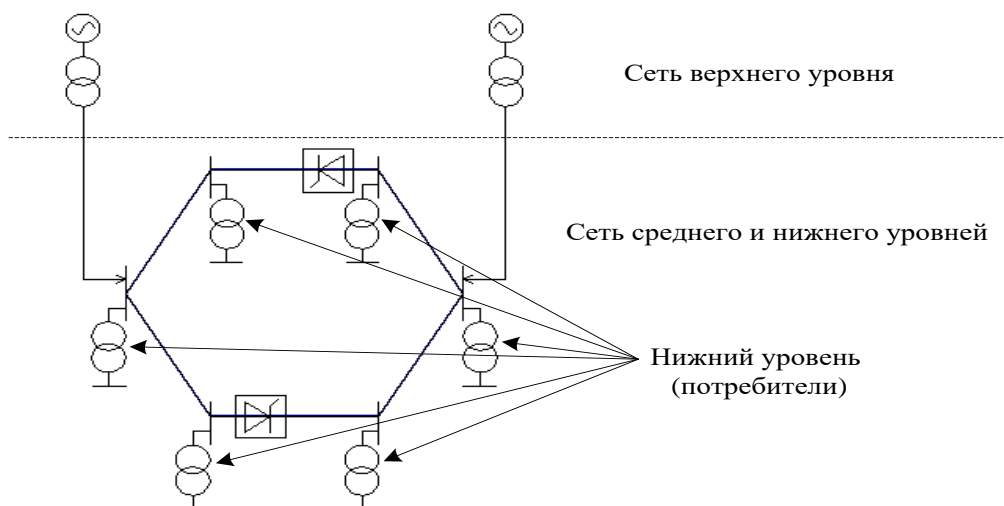
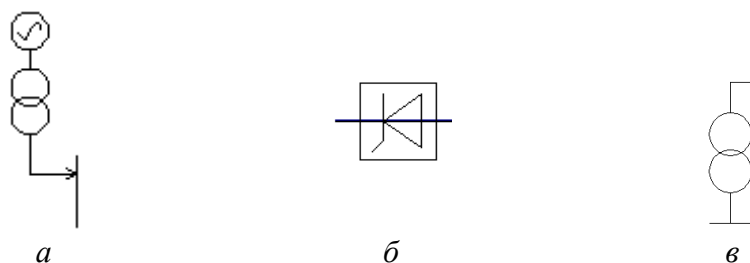


Рис. 1. Структурная схема модели РЭС

Рис. 2. Обозначения мнемоник элементов модели РЭС:
а – источник; б – УУ; в – потребитель

Отдельный элемент вектора управления **К** представляет собой комплексный коэффициент трансформации напряжения. В УУ, описанном в [3], возможно регулирование выходного напряжения в диапазоне $\pm 9\%$ с дискретным шагом в $1,5\%$, угла сдвига фаз в диапазоне $\pm 4,5^\circ$ с шагом в $1,5^\circ$. Таким образом, возможна реализация тринадцати уровней регулировки выходного напряжения и семи уровней регулировки угла сдвига фаз. Общее количество состояний одного УУ в этом случае равно $13 \cdot 7 = 91$.

Вычисление параметров электрической цепи для определения текущего состояния ЭС подразумевает вычисление значений токов и напряжений для каждой ветви и каждого узла электрической цепи. В данной работе параметры ЭС вычислялись с помощью алгоритма, описанного в [6]. На основании вычисленных токов и напряжений цепи определяется полное описание состояния ЭС, характеризуемое такими параметрами, как общие энергопотери в сети, полная мощность потребления и выполнение требования (1).

Описание генетического алгоритма

Для решения задачи обеспечения качества электроэнергии и минимизации энергопотерь с учетом большого количества возможных состояний УУ были исследованы эвристические подходы, применяемые при решении задач оптимизации параметров энергосетей [7-9]. Неприменимость алгоритма полного перебора для решения подобных задач показана, например, в [10]. В результате разработан генетический алгоритм (ГА), позволяющий найти решение, близкое к оптимальному, за требуемое время.

Для поиска квазиоптимального вектора параметров регулирования УУ с использованием эвристических алгоритмов необходимо решить следующие задачи:

- выполнить кодирование решения задачи в форму, удобную для работы эвристических алгоритмов;
- выбрать критерии оценки полученного решения;
- разработать метод генерации начального множества решений;
- разработать метод коррекции сгенерированного решения с целью получения допустимого решения;
- настроить параметры эвристического алгоритма.

На каждой итерации эвристический алгоритм будет работать с набором коэффициентов регулирования УУ, подбирая их таким образом, чтобы обеспечить качество электроэнергии потребителю с минимизацией энергопотерь. Условие окончания работы ГА – обеспечено заданное значение качества электроэнергии в сети или с учетом ограничения на время поиска решения. Под *решением* будем понимать закодированный битовой строкой вектор параметров регулирования комплекса устройств управления (**К**), совместно с вектором нагрузок потребителей (**Р**), определяющий состояние ЭС. Под *популяцией* будем понимать набор возможных решений – набор векторов управления, задающих множество различных состояний комплекса УУ. Под *приспособленностью* будем понимать количественную оценку качества возможного решения, т.е. величину общих энергопотерь $P_{общ}$ (2) ЭС при сохранении качества поставляемой электроэнергии (1).

Рассматриваемый ГА при генерации решения манипулируют символьными строками, которые должны однозначно интерпретировать состояние электрической сети. Пусть ЭС включает N управляющих устройств с S количеством состояний, определяемых возможным набором их параметров. Размер битовой строки, состоящей из элементов множества $M = \{0, 1\}$, для параметра можно определить по формуле (3):

$$|M|^{(k-1)} < S \leq |M|^k, \quad (3)$$

где S – количество возможных допустимых состояний параметра решаемой задачи, k – длина битовой строки.

Пусть устройства управления имеют два коэффициента регулирования – по амплитуде напряжения U и сдвигу фаз φ . Тогда битовая строка, кодирующая решение, будет состоять из аллелей, количество которых соответствует количеству УУ, а каждая аллель будет включать 2 компонента по числу коэффициентов регулирования (рис. 3).

U_1	φ_1	U_2	φ_2	...	U_N	φ_N
-------	-------------	-------	-------------	-----	-------	-------------

Рис. 3. Кодирование решения, набора значений коэффициентов регулирования N УУ

Необходимо учесть, что для оценки качества получаемых решений само решение должно находиться в области допустимых решений. Существуют различные стратегии обеспечения допустимости сгенерированных решений ГА, рассмотрим применимость наиболее распространенных.

Первый вариант. Стратегия основывается на отбрасывании решений, не входящих в область допустимых. Генерация будет производиться до тех пор, пока нужное количество допустимых решений в популяции не будет сформировано. Вероятность генерации значений символьных строк, представляющей недопустимое решение, определяется диапазоном и дискретностью регулирования параметров УУ.

Второй вариант. Решения, лежащие вне области допустимых решений, помечаем флагом недопустимости для их отсеивания при переходе на следующую итерацию (при формировании нового поколения).

Третий вариант. Недопустимые значения решений корректируются следующим образом. Выходящий за диапазон допустимых значений коэффициент регулирования УУ принимается равным ближайшему допустимому значению.

Четвертый вариант. При формировании решения используются такие алгоритмы, которые заведомо обеспечивают входение решения в допустимое множество состояний УУ, где под состоянием УУ будем понимать набор значений коэффициентов регулирования УУ.

Для формирования начальной популяции ГА при решении задачи управления состояниями ЭС, т.е., получения квазиоптимальных управляющих воздействий для обеспечения качества электроэнергии с минимизацией энергопотерь, будем использовать четвертый вариант. Решения начальной популяции будем формировать следующим образом. Случайному значению из множества допустимых дискретных значений параметров коэффициентов регулирования УУ ставится соответствующее битовое представление в соответствующую аллель. Отметим, что качество ГА зависит напрямую от того, насколько удачно будет сформирована начальная популяция, а также насколько разнообразны варианты решений начальной популяции.

Алгоритм генерации множества допустимых решений начальной популяции имеет следующий вид.

Первый шаг. Генерируем случайным образом номер набора состояния комплекса УУ.

Второй шаг. Устанавливаем значение коэффициентов регулировки УУ в соответствии сгенерированному решению и формируем значение битовой строки.

Третий шаг. Производим моделирование электрической сети. Для этого рассчитываем токи, протекающие во всех линиях электрической сети, и значения напряжений на всех узлах сети методом узловых потенциалов. Рассчитываем значение целевой функции – общие энергопотери в сети. Проверяем, обеспечивает ли сгенерированный набор коэффициентов регулирования УУ выполнению условия (1). Если это так, сгенерированный набор значений коэффициентов регулирования УУ включаем в множество решений начальной популяции. Если мощность множества решений меньше требуемого значения, переход на шаг 1, иначе выход. Для формирования решений новых популяций при работе ГА будем использовать третий вариант стратегии формирования решений, являющийся наилучшим применительно к специфике нашей задачи. Процесс адаптации ГА к решению прикладных задач заключается в формировании механизма кодирования / декодирования решения в символьную строку, построения функции оценки новых решений и оптимизации ГА настройкой их параметров.

Все настраиваемые параметры ГА можно условно разделить на три группы:

- параметры, влияющие на генерацию новых решений в текущем поколении на основе решений предыдущего поколения. К ним относятся вероятность выбора операторов ГА кроссовер, мутация и т.д., выбор вида мутации, кроссовера и т.д.;
- параметры, влияющие на стратегию отбора перспективных решений при формировании нового поколения решений из существующего множества;
- параметры, влияющие на время работы ГА.

Первая и вторая группы параметров отвечают за скорость сходимости ГА к квазиоптимальному решению и качество исследования области допустимых решений. Третья группа включает в себя размер популяции на каждой итерации, количество итераций работы ГА. В то же время необходимо учитывать, что настройка параметров групп влияет друг на друга. В общем виде, все параметры ГА образуют замкнутую систему со сложными обратными связями (компенсирующими и усиливающими), и решение задачи настроек самих генетических алгоритмов выливается в отдельную оптимизационную задачу.

Общий алгоритм настройки параметров генетического алгоритма

Настройка параметров ГА будет происходить в два этапа. На первом этапе будут настроены параметры первого и второго типов, которые влияют на качество формирования новых решений внутри популяции, а также отбора решений в новую популяцию. На втором

этапе на основе настроенных параметров первых двух типов будут настраиваться параметры третьего типа, влияющие на время получения решения ГА.

В связи с тем, что типы параметров взаимосвязаны, настройка их должна проходить итерационно до тех пор, пока она приводит к улучшению решения.

Очевидно, что настроенные на одной архитектуре энергосети значения параметров ГА не являются оптимальными для другой архитектуры.

К параметрам, настраиваемым на первом этапе, относятся вероятность мутации, доля решений, полученных с помощью оператора кроссовера, тип кроссовера, метод отбора решений для работы оператора кроссовер, доля элитных решений, переходящих в следующее поколение.

Настройка каждого из параметров заключается в фиксации значения всех остальных параметров и в варьировании значения настраиваемого параметра в пределах допуска. Инициализация значений параметров первого типа в ГА была произведена следующим образом:

- метод выбора «родительской» пары – случайный отбор;
- тип кроссовера – одноточечный;
- вероятность выбора оператора кроссовер 0,1;
- вероятности инвертирования бит в битовой строке для мутации 0,01;
- метод отбора – комбинированный, при этом вероятность элитного отбора 0,1.

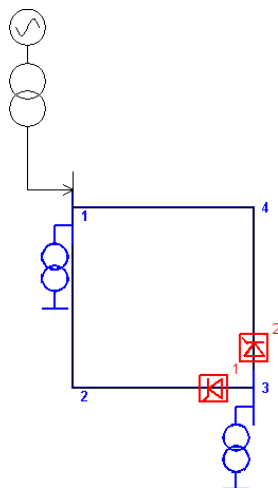


Рис. 4. Малая ЭС с двумя УУ

Дальнейшая настройка и исследования работы ГА были выполнены на конкретных примерах, для различных топологий ЭС разного размера. При настройке параметров варьировалось значение одного параметра при фиксации значений всех остальных параметров, как было описано выше. Результаты проведенных исследований для схемы ЭС, представленной на рис. 4, дали следующие настройки параметров ГА: размер популяции – 20 решений, генерация начальной популяции выполнена по правилу вхождения решения в допустимое множество состояний УУ, элитный отбор в новую популяцию решений составляет 20 %, тип кроссовера – двухточечный, выбор оператора кроссовера с вероятностью 0,7, мутации – с вероятностью 0,3. Критерии останова: заданное время работы алгоритма или отсутствие улучшения решений в течение 50 поколений.

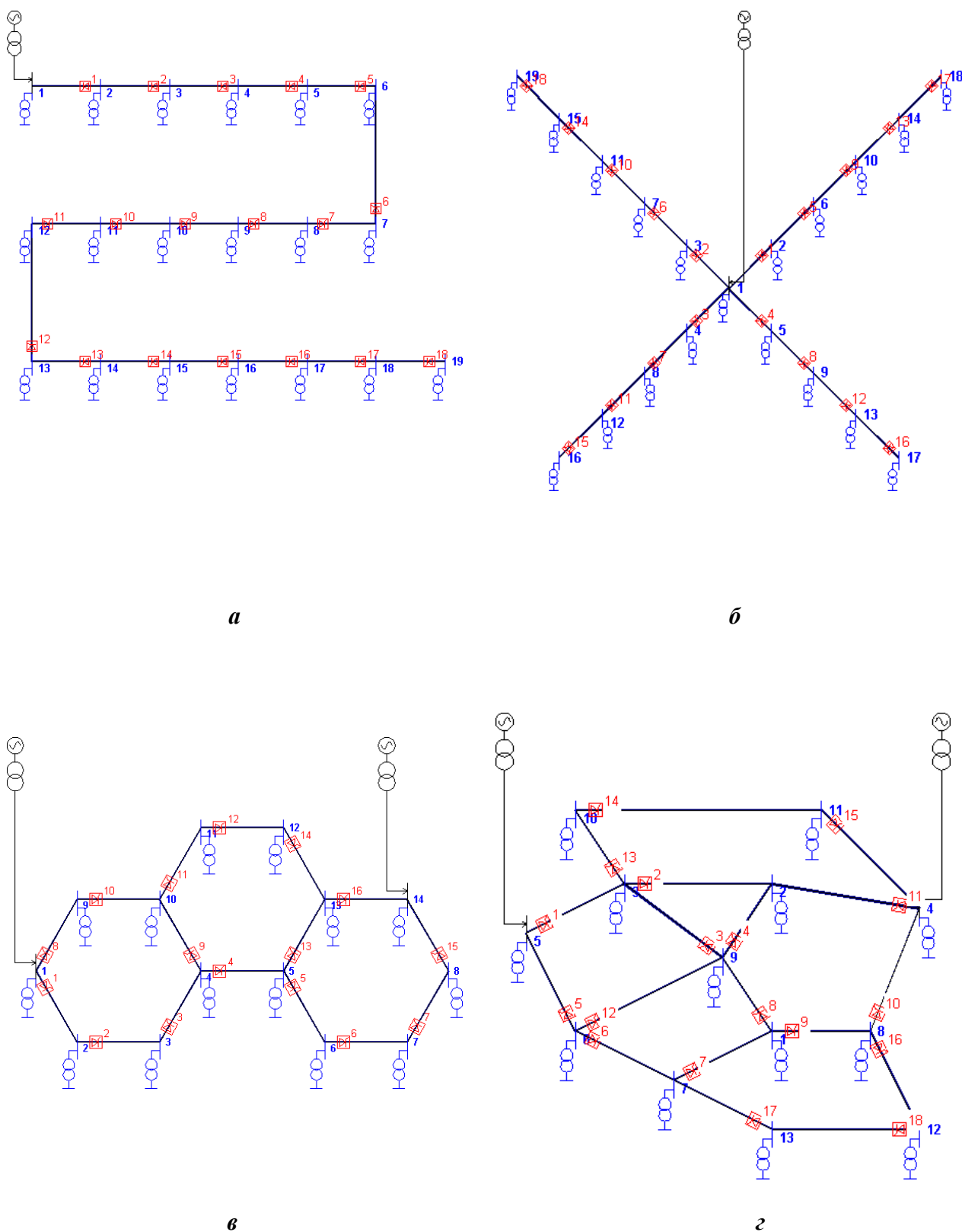


Рис. 5. Варианты конфигураций ЭС:
а – линейная; **б** – радиальная; **в** – гексагональная; **г** – произвольная

Результаты моделирования при 9 запусках ГА представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты моделирования при 10 запусках ГА

№	Время работы (с)	Номер набора	Энергопотери (кВт)
1	17,27	6806	8,177
2	21,99	7717	8,096
3	22,47	6706	6,755
4	26,74	2673	7,296
5	20,07	1702	7,134
6	18,45	5806	8,028
7	19,56	3702	7,251
8	18,33	6805	8,177
9	16,56	8716	8,327

Как видно из табл. 1, лучший результат составил 6,755 кВт, что хуже минимально возможных потерь (4,995 кВт), полученных с помощью алгоритма полного перебора, но при этом время работы ГА значительно меньше (порядка 20 с). В результате исследований была проведена настройка параметров ГА для ЭС различных конфигураций, представленных на рис. 5, со сходным количеством УУ. Результаты проведенных исследований настройки параметров ГА в зависимости от конфигураций энергосетей с 16÷18 устройствами управления представлены в табл. 2.

Увеличение количества УУ в энергосети при работе ГА также приводит к увеличению объема вычислений, однако для ГА, в отличие от алгоритма полного перебора состояний, данное увеличение не носит лавинообразный характер. Зависимость времени работы ГА от количества УУ представлена на рис. 6.

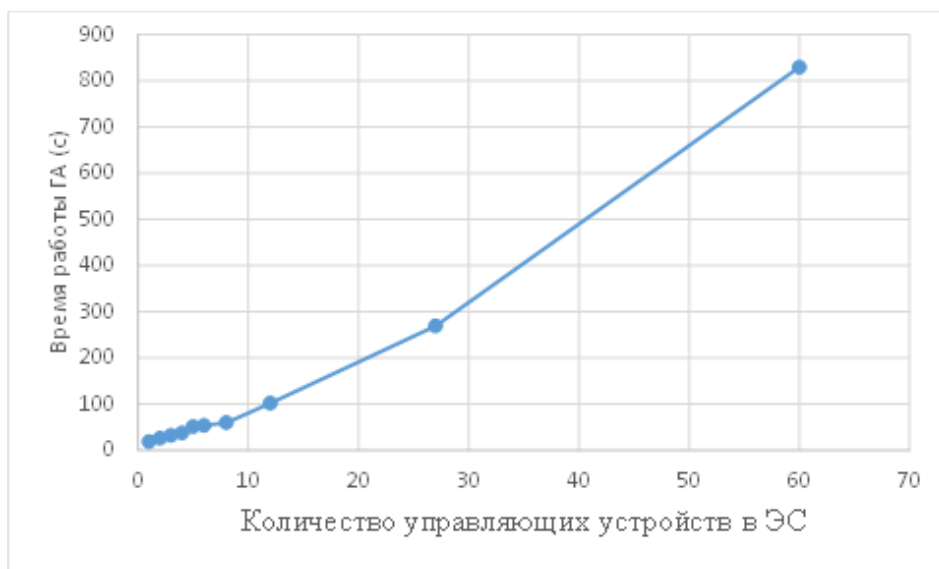


Рис. 6. Время работы ГА в зависимости от количества устройств управления

Таблица 2

Результаты моделирования при 10 запусках ГА с 18 УУ

	Линейная топология	Радиальная топология	Гексагональная топология	Произвольная топология
Метод выбора «родительской» пары	Выбор родительской пары, не зависимо от топологии сети, осуществляется по значениям функции приспособленности			
Тип кроссовера	двухточечный			
Вероятность выбора оператора кроссовер	0,6	0,7	0,7	0,7
Вероятности инвертирования бит в битовой строке для дальней мутации	0,03	0,05	0,06	0,10
Элитный отбор (%)	10	20	30	20

Заключение

Скорость работы ГА позволяет использовать их для расчета ЭС большой размерности. Тем не менее, как было указано выше, для каждой структурной схемы ЭС требуется выполнение настроек параметров ГА. Диапазон изменения коэффициентов передачи реально существующего УУ [3] дает возможность эффективного решения задач интеллектуального управления энергосетями.

Библиографический список

1. **Sosnina, E.** Harmonic Analysis of the Thyristor Regulator Output Voltage / E. Sosnina, A. Kralin, R. Bedretdinov, E. Kryukov // Proc. 2018 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exhibition – Latin America (T&DLA). Peru, 2018. – P. 1-6.
2. **Соснина, Е.Н.** Тиристорный регулятор величины и фазы вольтодобавочного напряжения в распределительных электрических сетях 6-10 кВ / Е.Н. Соснина, А.А. Асабин, Е.В. Крюков, А.А. Кралин // Актуальные проблемы электроэнергетики: сборник научно-технических статей. – Н. Новгород: НГТУ, 2017. – С. 132-136.
3. Пат. 2621062 Рос. Федерация: МПК G 05F 1/30. Тиристорное фазоповоротное устройство с вольтодобавочным трансформатором для сети среднего напряжения / Соснина Е.Н., Асабин А.А., Кралин А.А., Крюков Е.В.; заявитель и патентообладатель Ниж. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева – № 2016127017; заявл. 06.07.2016; опубл. 31.05.2017, Бюл. № 16.
4. **Martynyuk, M.V.** Voltage regulation of a linear section of an extended distribution network with thyristor regulators of booster voltage (TRBV) / M.V. Martynyuk, E.S. Sokolova, D.V. Dmitriev, A.I. Tyurin, Evgeny V. Kryukov // 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, 2019.
1. **Батищев, Д.И.** Генетические алгоритмы решения экстремальных задач / Д.И. Батищев. – Воронеж, 1995.
2. **Martynyuk, M.V.** Matrix Method of Calculation for Simulation of Distribution Electric Networks Of Medium Voltage / M.V. Martynyuk, E.S. Sokolova, D.V. Dmitriev, A.I. Tyurin // International Journal of Applied Engineering Research, – 2017. – V. 12/ – № 24. – P. 15066-15072.
3. **Корнеев, А.С.** Использование генетических алгоритмов для решения задач оптимизации в электроэнергетике / А.С. Корнеев, М.С. Ляхов // Сборник IX Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых «Молодая гвардия», 18-21 апреля, КузГТУ, Кемерово, 2017. – С. 4. – Режим доступа: <http://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/RM/2017/RM17/pages/Articles/0201038-.pdf> (дата обращения: 03.10.2018).
4. **Поляхов, Н.Д.** Оптимизация распределения потоков мощности в энергосистеме с помощью генетических алгоритмов / Н.Д. Поляхов, И.А. Приходько, И.А. Рубцов, И.В. Швыров // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 3. – С. 170. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=6523> (дата обращения: 20.05.2018).

5. **Gurjar, S.** Smart Grid Reconfiguration Using Simple Genetic Algorithm and NSGA-II / S. Gurjar, U. Me-wada // Journal Club for Electrical Engineering (JCEE), 2015, 2(I). – P. 37-43.
6. **Sokolova, E.S.** Optimization of the Parameters of the Distribution Network Computer Model to Reduce Losses / E.S. Sokolova, M.V. Martyniuk, D.V. Dmitriev, A.I. Tyurin // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – Vladivostok, 2018.

*Дата поступления
в редакцию: 05.06.2019*

M.V. Martyniuk

ADAPTATION OF THE GENETIC ALGORITHM FOR SOLVING THE PROBLEMS OF MANAGING THE CONDITION OF THE ELECTRIC NETWORK

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

Purpose: an approach to solving problems of intelligent control of the states of the power grids in normal operation modes is considered. A genetic algorithm has been developed and investigated for the automated adjustment of control device parameters to ensure the quality of electric power while minimizing total energy losses.

Approach: the method of optimization of the selection of parameters is implemented on a simulation model of the electrical network.

Results: a description of the genetic algorithm and the algorithm for setting its parameters is given. The algorithm has been tested on simulation models of electrical networks of various architectures. It is shown, that it is possible to use complex of the TVBRs to control the state of the electrical network.

Keywords: intelligent control, electrical distribution network, simulation model, quality of power supply, energy loss.