

ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ ВЫБОРА РАСПРЕДЕЛЁННОЙ ГЕНЕРАЦИИ

В.В. Тарасенко
г. Челябинск, ЮУрГУ

MANAGEMENT OF POWER SUPPLIES OF FIXTURES WITH USE OF METHODS OF FUZZY LOGIC

V.V. Tarasenko
Chelyabinsk, SUSU

Приведены принципы построения математической модели и алгоритм. Дан сравнительный анализ расчёта простейшей сети описанным методом и методом прямого перебора вариантов.

Ключевые слова: распределённая генерация, генетический алгоритм, аппроксимация, целевая функция.

The principles of construction of mathematical model and algorithm are given. The comparative analysis of the simple network calculation using the described above method and direct enumeration method is represented.

Keywords: distributed generation, genetic algorithm, approximation, objective function.

На современном этапе развития систем энергоснабжения всё чаще возникают ситуации, когда потребитель предпочитает иметь собственный источник энергии. Такими источниками в России обычно служат газопоршневые и газотурбинные установки мощностью от нескольких десятков киловатт до десятков мегаватт, устанавливаемые в распределительной сети 0,4–35 кВ.

Ввиду того, что распределённая генерация (РГ) для России – явление новое, ещё не разработано эффективных методов выбора места расположения и мощности станций. До сих пор при принятии решения о строительстве станций используются методы сравнения вариантов. Такой подход был оправдан при строительстве крупных станций, когда количество возможных конкурентных вариантов исчисляется единицами и десятками. В распределительной же сети бывает целесообразно устанавливать несколько малых электростанций, причём сочетания мест расположения, числа и мощности блоков могут быть самыми разнообразными. Число возможных комбинаций с усложнением конфигурации сети и расширением модельного ряда генераторов растёт экспоненциально.

Представим упрощённую ситуацию, являющуюся наиболее характерной при анализе вариантов размещения РГ. Имеется распределительная сеть города или промышленного предприятия, по которой обеспечивается электроснабжение нескольких трансформаторных подстанций (ТП) с прогнозируемыми нагрузками на шинах 0,4 кВ

(рис. 1). Полагая, что на основе проведённых изысканий определены возможные площадки, расположенные вблизи некоторых ТП, для размещения установок РГ и определены возможные типы этих установок. Переменными математической модели для оптимизации такой сети будут приняты число блоков каждого возможного типа. В качестве ограничений могут рассматриваться условия выдачи мощности во внешнюю сеть, баланс электрической мощности в каждом узле, баланс тепловой мощности, ограничения по экологическим условиям, выделяемой площади и т. п. Принимаем, что для возможных к установке блоков известны основные технико-экономические показатели (ТЭП): мощность, прогнозируемый удельный расход топлива для каждого типа блоков

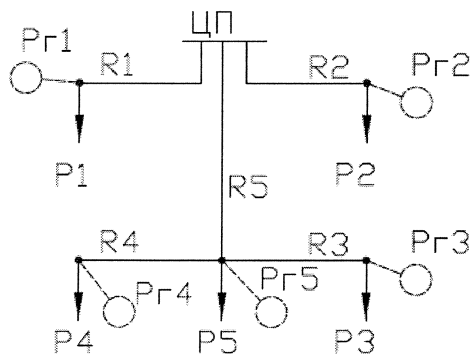


Рис. 1. Схема сети с возможными площадками для установки РГ

с учётом тепловой нагрузки, затраты на поставку и монтаж, удельные эксплуатационные расходы и т. п. Для покрытия нагрузок ТП предусматривается возможность частичного питания их от распределительной сети по тарифу розничного рынка электроэнергии. В качестве критерия оптимизации принимаются приведённые затраты на установку и эксплуатацию комплекса РГ.

Для решения задач оптимизации в математике разработано множество различных методов. Самые распространённые оптимизационные модели на основе линейного и нелинейного программирования используются для решения непрерывных задач. В результате решения мощность генераторов обычно не соответствует стандартному ряду номинальных мощностей, характерному для данного производителя, округление же до ближайшей стандартной часто даёт неверный результат [4]. Вторая проблема – необходимость учёта логических операций. В модели сети с РГ изменение ряда показателей происходит скачкообразно в зависимости от мощности установки. В ряде случаев приходится выбирать наибольшее значение из полученных на этапах расчёта величин. Такие операции описываются с использованием логических операторов, наличие которых в модели делает невозможным применение методов оптимизации, основанных на производных. Для решения дискретных задач разработаны специальные методы, основанные на направленном переборе вариантов, например «метод ветвей и границ». Реализация

этих методов также сопряжена с трудностями из-за наличия элементов логики. Самым простым способом преодоления всех этих затруднений являются методы нулевого порядка с прямым перебором вариантов [3]. Однако этот способ имеет существенный недостаток: так называемое «проклятие размерности».

Решение задачи можно найти, используя алгоритмы, моделирующие природные процессы. В качестве такового нами был принят генетический алгоритм (ГА) [5]. Этот способ решения оптимизационных задач позволяет существенно сократить время поиска оптимального решения. Ему не страшны локальные минимумы, а увеличение размерности задачи не приводит к экспоненциальному росту объёма вычислений. Прямое вычисление целевой функции не требует ограничений на применяемые операторы. Механизм поиска оптимального решения сходен с процессами эволюции и естественного отбора в природе (рис. 2). При этом роль хромосом выполняют рассматриваемые параметры модели: мощности блоков и их количество в заданный промежуток времени, выбираемые из представленного ряда случайным образом. Заданное количество хромосом определяет особь, которая характеризуется функцией $F(n_1, n_2, \dots, n_i, p_1, p_2, \dots, p_i)$, где n_i, p_i – количество и номинальная мощность блоков в i -м узле, представляющие собой векторы $\vec{N}$ и $\vec{P}$. Одновременно в процессе эволюции участвует сразу несколько

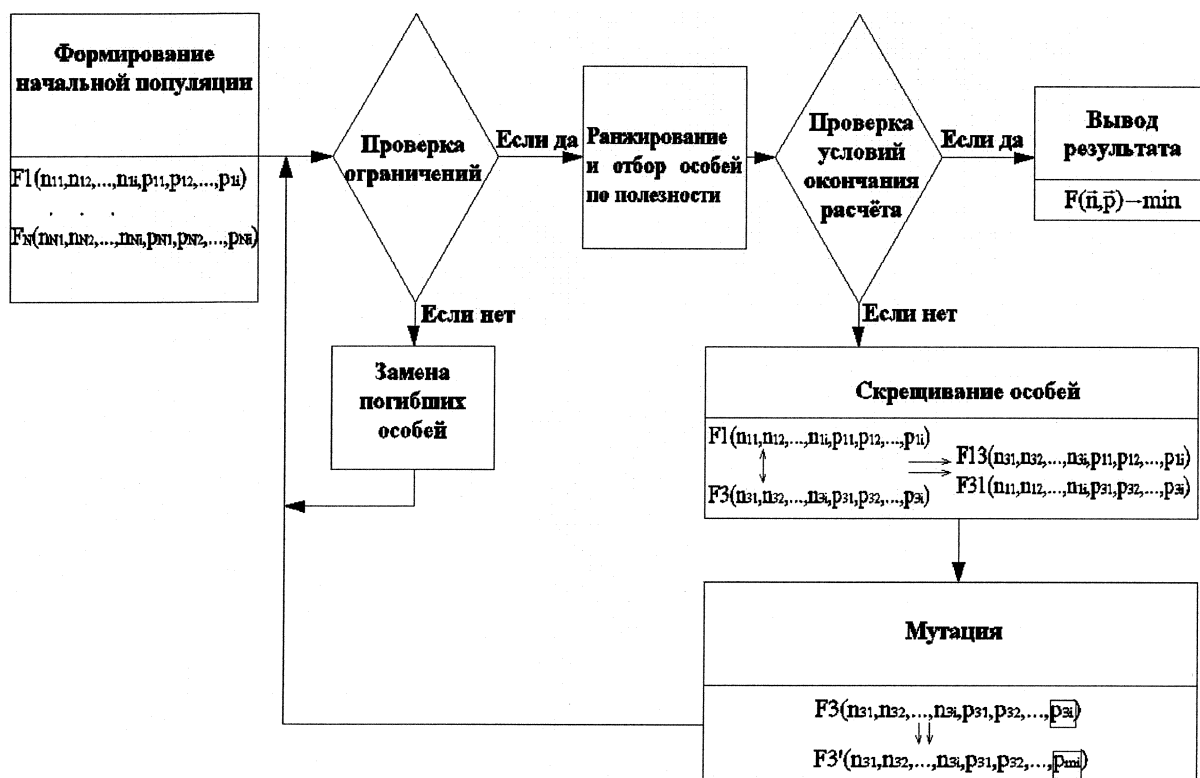


Рис. 2. Схема генетического алгоритма

особей (N), образующих популяцию. Особи обладают способностью скрещиваться, порождая потомков путём частичного случайного обмена хромосомами. Каждая хромосома обладает способностью мутировать с заданной вероятностью. Особи имеют определённый уровень качества, который характеризуется значением целевой функции. Выживают и имеют право дать дальнейшее потомство только наиболее приспособленные особи. Таким образом, генетический алгоритм осуществляет поиск не путём улучшения одного решения, а путём использования сразу нескольких альтернатив на заданном множестве решений. В процессе эволюции накапливается генетический материал, и алгоритм быстро сосредотачивается на околооптимальном решении. Вероятность попадания в локальный оптимум исключается вероятностным распределением начальных решений и мутациями. Для реализации поиска оптимальных мест размещения и мощности генераторов методом ГА использовалась программа «Easy NP 2.0» [9].

Определившись с методом решения оптимизационной задачи, можно перейти к разработке математической модели сети с распределённой генерацией, ориентированной на этот метод. В [6] уже рассматривались общие принципы построения такой модели.

Большинство экономических показателей газопоршневых установок с достаточной точностью описывается линейными и квадратичными функциями. На рис. 3 показана зависимость стоимости когенераторов фирмы Deutz от их номинальной мощности, определяемая выражением:

$$F(P_r) = 142,919 + 0,314 \cdot P_r, \quad (1)$$

где P_r – номинальная мощность блока, кВт.

Коэффициенты линейного уравнения были найдены методом наименьших квадратов (МНК). Исследования показали [6], что затраты на установку блоков, доставку, проектные работы, монтаж, топливо, затраты на покупку и укладку кабелей 0,4 кВ хорошо описываются линейными функциями. Некоторые зависимости целесообразно описывать квадратичными функциями.

Электрические и тепловые нагрузки в сети

определяются в соответствии с прогнозируемым суточным графиком нагрузок и сезонными изменениями. Тариф на электроэнергию, покупаемую из сети, также может зависеть от времени суток. Всё это влияет на экономическую эффективность эксплуатации электростанции. Для учёта суточных и сезонных изменений условий эксплуатации, рассматривается работа станции за определённый интервал $j=1...M$, в течение которого условия предполагаются неизменными и равными усреднённым за этот период значению. При этом значительно возрастает объём вычислений. Полученные значения состава работающего оборудования за каждый период времени будут использоваться при определении эксплуатационных затрат. Капитальные вложения определяются по наибольшему числу одновременно работающих за один период блоков с учётом необходимого резерва:

$$n_i = \max(n_{i1}, n_{i2}, \dots, n_{iM}). \quad (2)$$

В каждом конкретном случае оптимизационная модель может учитывать индивидуальные особенности рассматриваемой системы. Например, возможность продажи электроэнергии сторонним потребителям через внешнюю сеть, учёт затрат в топливоснабжающую систему, на отводимую площадь, на развитие электрической сети, модернизацию распределительных устройств и т. п. Ниже представлены разработанные алгоритмы для пакета Easy NP 2.0, позволяющие определить характерные составляющие затрат.

Капитальные затраты на установку блоков:

$$K_1 = \sum_{i=1}^N (n_i + n_{pi}) \cdot (a_1 + a_2 \cdot P_{ri}), \quad (3)$$

где n_i , n_{pi} – количество рабочих и возможных резервных блоков, устанавливаемых в i -м узле; P_{ri} – номинальная мощность генераторов в i -м узле, кВт; a_1 , a_2 – коэффициенты линейной аппроксимации.

Капитальные затраты на строительную часть и монтаж блоков и инженерных систем под ключ:

$$K_2 = \sum_{i=1}^N (n_i + n_{pi}) \cdot (a_3 + a_4 \cdot P_{ri}), \quad (4)$$

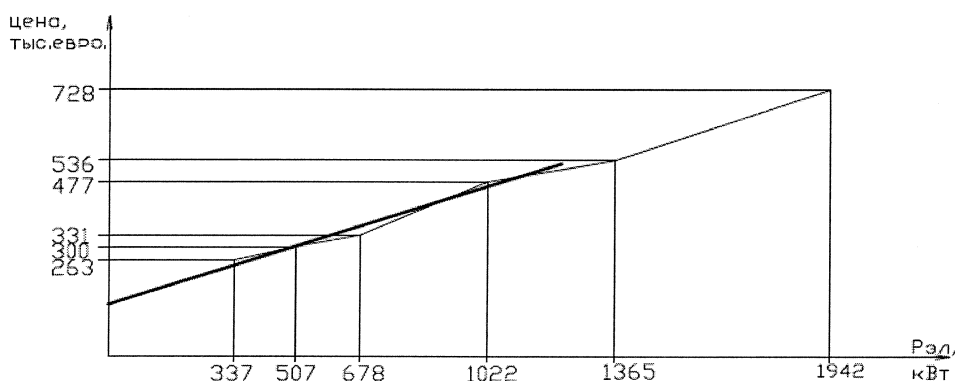


Рис. 3. Стоимость когенераторов фирмы Deutz

где a_3, a_4 – коэффициенты линейной зависимости затрат на строительство и монтаж от мощности блоков.

Транспортные расходы:

$$K_3 = \sum_{i=1}^N (n_i + n_{pi}) \cdot (a_5 + a_6 \cdot P_{gi}), \quad (5)$$

где a_5, a_6 – коэффициенты линейной аппроксимации функции зависимости стоимости доставки генератора мощностью P_{gi} до места строительства.

Аналогично определяются другие составляющие затрат, связанные с установкой блоков.

Возможны различные варианты работы станции по отношению к внешней сети. В случае параллельной работы без выдачи мощности в сеть, но с возможностью покрытия недостающих нагрузок от сети, общие затраты «на присоединение к сети» будут определяться выражением:

$$K_5 = b_0 + b_4 \sum_{i=1}^N (n_i \cdot P_{gi}) + b'_5 \cdot \left(n_p \cdot P_{z\max} - \sum_{i=1}^N P_{gi} \cdot n_{ip} \right) + b'_3 \cdot \left(\sum_{i=1}^N P_i \cdot k_{од} - \sum_{i=1}^N n_i \cdot P_{gi} \right), \quad (6)$$

где b_0, b_4 – коэффициенты линейной аппроксимации, характеризующие затраты на модернизацию защиты и автоматики распределительной сети в связи с присоединением РГ; b'_5 – плата за резервирование мощности, определяемая по договору с энергоснабжающей организацией, руб/кВт; n_p – количество блоков максимальной мощности, которое нужно резервировать; b'_3 – плата за присоединение нагрузки к сети, руб/кВт; $k_{од}$ – коэффициент одновременности; P_i – максимальная мощность нагрузки в i -м узле, кВт; $P_{z\max}$ – мощность самого мощного блока в сети, кВт.

Коэффициенты b_0, b_3, b_5 , могут принимать различные значения, в том числе и нулевые, в зависимости от получаемых результатов. Для учёта этого используются логические выражения следующего вида:

$$b'_5 = \text{if} \left(\sum_{i=1}^N n_i = 0, 0, b_5 \right), \quad (7)$$

учитывающие ситуацию, когда в ходе расчёта выявлена нецелесообразность установки в сети генераторов.

Кроме капитальных вложений, модель должна учитывать годовые эксплуатационные затраты.

Стоимость потерь электроэнергии в сети 6–10 кВ будет выражаться в следующем виде:

$$C_1 = \sum_{j=1}^M (h_{1j} \cdot \Delta W_j), \quad (8)$$

где h_{1j} – тариф за электроэнергию в j -й интервал времени, руб/кВт·ч; ΔW_j – потери электроэнергии в сети за год в j -й интервал времени, кВт·ч.

$$\Delta W_j = T \cdot \Delta P_j \cdot T_j, \quad (9)$$

где T – количество дней в году; ΔP_j – потери мощности в сети 10 кВ в j -й интервал времени, кВт; T_j – длительность j -го интервала времени, час.

Потери мощности на j -м интервале суточного графика

$$\Delta P_j = \frac{1 + \text{tg}^2 \varphi}{U^2} \sum_{i=1}^n R_i \cdot \left(\sum_{i'=1}^{n'} (P_i \cdot k_{ij} - n_{ij} \cdot P_{gi}) \right)^2, \quad (10)$$

где $\text{tg} \varphi$ – коэффициент мощности в данной сети; U – номинальное напряжение сети, кВ; k_{ij} – коэффициент, показывающий какую часть от максимальной составляет средняя нагрузка за j -й промежуток времени в i -м узле; R_i – сопротивление ветви, питающей i -й узел, Ом; n_{ij} – количество генераторов находящихся в работе в i -м узле в j -й интервал времени; n' – количество узлов дерева, питаемых по i -й ветви.

Аналогичным образом можно выразить основные эксплуатационные затраты сети с распределённой генерацией.

Приведённые выражения позволяют однозначно определить целевую функцию $F(\vec{P}, \vec{N})$. Перебирая различные составляющие векторов $\vec{P}$ и $\vec{N}$ из возможных, ГА находит такие их значения, при которых $F(\vec{P}, \vec{N}) \rightarrow \min$.

При решении задачи должен удовлетворяться ряд ограничений.

Ограничение по количеству и мощности резервных блоков:

$$\sum_{i=1}^N n_{pi} \cdot P_{gi} \leq 2 \cdot P_{z\max}. \quad (11)$$

Ограничение сечения питающих кабелей 0,4 кВ по длительно допустимому току:

$$a_1 + a_2 \cdot \frac{I_i}{m_i} + a_3 \cdot \left(\frac{I_i}{m_i} \right)^2 \leq S_i, \quad (12)$$

где m_i – количество параллельных кабелей в i -м узле, шт; S_i – сечение кабеля 0,4 кВ в i -м узле, мм².

Ограничение мощности станции по пропускной способности трансформаторов 10/0,4 кВ:

$$P_{gi} \cdot (n_{ij} + n_{pi}) - k_{ij} \cdot P_i \leq P_{пр}. \quad (13)$$

Ограничение на выдачу во внешнюю сеть:

$$\sum_{i=1}^N P_{gi} \cdot n_{ij} \leq \sum_{i=1}^N P_i \cdot k_{ij} + \Delta P_j + \Delta P_{j-0,4}, \quad (14)$$

где $\Delta P_{j-0,4}$ – потери мощности в сети 0,4 кВ в j -й интервал времени, кВт.

В соответствии с алгоритмом каждая новая особь проверяется на соответствие ограничениям. В случае нарушения ограничений особь отбраковывается и заменяется новой.

Представленный алгоритм был проверен на простейшей сети из пяти узлов, показанной на рис. 1. Результаты сравнивались с результатами, получаемыми методом прямого перебора вариантов. При этом количество возможных вариантов варьировалось изменением списка номинальных мощностей возможных к установке блоков. Оба

Затраты времени на расчёт простейшей сети

Число возможных вариантов, млн	Прямой перебор вариантов, с	Генетический алгоритм, с
0,0225	8	5
0,135	44	6,5
3,375	960	10
506,25	$1,4 \times 10^5$	20

метода дают абсолютно одинаковые результаты, хотя существенно отличаются по времени вычислений (см. таблицу)

Эффективность ГА зависит от применяемых настроек для каждого типа задач. При анализе рассмотренной сети поддерживался размер популяции в количестве 30 особей, каждой парой особей создавалось 10 потомков с вероятностью мутации 50%. Программа также позволяет изменять и другие параметры эволюции. При этом можно подобрать такие условия отбора и скрещивания, при которых решение задачи методом ГА будет максимально эффективным. Критерием останова в рассматриваемой задаче служило получение тех же результатов, что и при прямом переборе вариантов. В практических задачах критерием останова, как правило, является ограничение по времени решения.

Литература

1. Тарасенко, В.В. *Преимущества распределённой генерации и проблемы на пути её распространения* / В.В. Тарасенко, М.Е. Гольдштейн, Б.Г. Булатов // *Ресурсосбережение и возобновляемые источники энергии: сборник докладов I Международной научно-практической конференции*. – Улан-Удэ, 2008.

2. Acharya, N. *An analytical approach for DG allocation in primary distribution network* / N. Acharya, P. Mahat, N. Mithulananthan // *Electric Power Systems Research*. – 2007. – № 1.

3. Тарасенко, В.В. *О применении метода перебора при поиске оптимального числа и мощностей источников электроэнергии в сети с распределённой генерацией* / В.В. Тарасенко // *Сборник докладов I научной конференции аспирантов и докторантов ЮУрГУ*. – 2009.

4. Охорзин, В.А. *Оптимизация экономических систем: учебное пособие* / В.А. Охорзин. – М.: Финансы и статистика, 2005.

5. Гладков, Л.А. *Генетические алгоритмы* / Л.А. Гладков, В.В. Курейчик, В.М. Курейчик. – М.: Физматлит, 2006.

6. Тарасенко, В.В. *Принципы математического описания технико-экономических показателей распределённой генерации* / В.В. Тарасенко // *Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов: сборник трудов Международной научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов*. – Тольятти, 2009.

7. *Энергетические газотурбинные установки и энергетические установки на базе газопоршневых и дизельных двухтопливных двигателей* // *Некоммерческое партнёрство «Российское тепло-снабжение»: отчёт*. – М., 2004. – Ч. II.

8. Christopher Asir Rajan C. *An evolutionary programming based simulated annealing method for solving the unit commitment problem* / C. Christopher Asir Rajan, M.R. Mohan // *Electrical Power and Energy System*. – 2007. – №29.

9. <http://np-soft.ru/main/index.htm>.

Поступила в редакцию 18.01.2010 г.

Тарасенко Виктор Викторович. Аспирант кафедры «Электрические станции, сети и системы» ЮУрГУ. Окончил Оренбургский государственный университет в 2007 г. по специальности «Электроснабжение промышленных предприятий и городов». Область научных интересов: распределённая генерация, оптимизационные модели, энергоэффективность.

Контактный телефон: 8-(351)267-92-41.

Tarasenko Viktor Viktorovich is a post-graduate student of the Electric Power Stations, Networks and Systems Department of South Ural State University. In 2007 he graduated from Orenburg State University, specialty Industrial and Municipal Power Supply. Research interests: distributed generation, optimization models, energy efficiency. Contact phone: 8-(351)267-92-41.