УДК 621.311.014.019.3

ПРИНЦИПЫ РАЗРАБОТКИ АЛГОРИТМОВ ОПТИМИЗАЦИИ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ НАДЕЖНОСТИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ФАКТОРОВ

Докт. техн. наук, проф. ЕРХАН Ф. М., асп. ВОЙНЕСКО Д. А., инженеры ЛУПУШОР И. Н., БАНТАШ Р. Г.

Государственный аграрный университет Молдовы

E-mail: terhan@mail.ru

PRINCIPLES FOR DEVELOPMENT OF OPTIMIZATION ALGORITHM FOR OPERATIONAL RELIABILITY OF DISTRIBUTIVE SYSTEMS WITH DUE ACCOUNT OF PROBABILITY IMPACT FACTORS

ERKHAN F. M., VOYNESKO D. A., LUPUSHOR I. N., BANTASH R. G.

State Agrarian University of Moldova

Надежность распределительных систем электроснабжения потребителей является многокритериальной функцией. Поэтому при разработке алгоритмов для определения оптимального уровня надежности распределительных сетей необходимо учесть вероятностный характер изменения соответствующих показателей. Разработаны математическая модель и алгоритм для определения оптимального уровня надежности систем электроснабжения с учетом вероятностного изменения показателей надежности составных элементов.

Ключевые слова: надежность, распределительные системы электроснабжения, математическая модель, алгоритм, оптимальный уровень надежности.

Ил. 1. Библиогр.: 9 назв.

Reliability of distributive systems for electric supply of consumers is considered as a multi-criteria function. For this reason while developing an algorithm for determination of optimum reliability level of distributive networks it is necessary to take into account probability character of changes in corresponding indices. A mathematical model and algorithm have been developed for determination of optimum reliability level of electric supply systems with due account of probability changes in reliability indices of component elements.

Keywords: reliability, distributive systems of electric supply, mathematical model, algorithm, optimum reliability level.

Fig. 1. Ref.: 9 titles.

Введение. Для того чтобы эффективность функционирования различных потребителей была оптимальной, необходимо, чтобы технические условия и надежность электроснабжения потребителей соответствовали техническим условиям, предъявляемым источникам питания. Только соблюдая соответствующие технические требования, можно достичь оптимального уровня надежности электроснабжения. Для этого нужно проводить процесс оптимизации с учетом требований потребителей и технических требований, предъявляемых к распределительным системам.

Известно, что надежность – это технико-экономическая категория, функция от показателей как распределительных систем, так и потребителей [1]. Практически можно достигать любого заранее заданного уровня надежности технической системы, если не учитывать затраты на создание такой системы. Когда же они ограничены, возникает задача оптимизации. Из перечисленного выше следует, что для электроснабжения потребителей в зависимости от их категории необходимо, чтобы данная система была оптимальна с точки зрения надежности электроснабжения потребителей и распределительных сетей рассматриваемой системы.

Решение поставленной задачи. Проблемы надежности электроснабжения различных потребителей носят вероятностный характер и зависят от ряда как определенных, так и неопределенных факторов. Проблемы могут быть следующего порядка [2]:

• структурная надежность распределительных систем;

• функциональная надежность составных элементов распределительных систем;

• надежность потребителей;

• результирующая надежность системы в целом.

На результирующую надежность распределительных систем электроснабжения влияют различные факторы, из которых можно выделить:

• технические характеристики составных элементов распределительной системы и потребителей;

• структурные схемы соединения составных элементов распределительной системы и потребителей;

• типы потребителей и требования, предъявляемые ими для обеспечения нормативного уровня надежности электроснабжения;

• влияние как определенных, так и неопределенных факторов на надежность электроснабжения потребителей.

Следовательно, определение оптимального уровня надежности распределительных систем с учетом влияния внешних факторов – довольно сложная задача, так как показатели надежности носят вероятностный характер и изменяются во времени. При определении и оценке оптимального уровня надежности распределительных систем исходили из того, что влияние всех факторов носит детерминированный характер. В таких случаях могут быть использованы несколько критериев оптимизации надежности распределительных систем на основе таких признаков, как:

• суммарные интегральные минимальные приведенные затраты;

• суммарные интегральные ожидаемые ущербы от ненадежного электроснабжения и ущербы системы от недоотпуска электрической энергии;

• оптимизация схем распределительных систем с учетом показателей надежности используемого электрического оборудования;

• оптимальное резервирование схем распределительных систем и систем электроснабжения.

Определение оптимального уровня надежности схем распределительных систем и систем электроснабжения и влияния внешних факторов показывает, что эти проблемы необходимо рассматривать как технико-экономические, решения которых основываются на критерии минимизации приведенных затрат. Уровень надежности в таких случаях оценивается исходя из анализа капитальных и дополнительных затрат, минимально необходимых для увеличения структурной надежности распределительной и питающей систем и ожидаемых ущербов от ненадежного электроснабжения как у потребителей, так и в распределительной системе, которые могут возникнуть в результате воздействия внешних вероятностных факторов и низкого уровня надежности.

Для такого случая аналитическая взаимосвязь между составными элементами может быть представлена уравнением

$$R = f(C_{\Sigma}, C_r, I_b^3, I_b^1). \quad (1)$$

В этом уравнении составляющая приведенных затрат C_r, при помощи которой оценивается структурная надежность распределительной системы с учетом вероятностных функций $C = f(I_{\text{к.з}})$, может быть определена через суммарный объем недоотпущенной энергии потребителям $\sum W = f(\Delta t)$ и значение ожидаемых ущербов (У) у потребителей и распределительной системы

$$\text{У} = \sum \alpha_i W_i, \quad (2)$$

где α_i – коэффициент, характеризующий удельную составляющую надежности составного оборудования распределительной системы в зависимости от вероятностного значения функций, определяющих эффективность узлов,

$$\alpha_i = (0{,}30\text{–}0{,}75) \text{ у. е./(кВт·ч)}; \quad (3)$$

W_i – математическое ожидание общего объема недоотпущенной энергии в распределительной системе из-за низкого уровня структурной и функциональной надежностей составных элементов системы.

Аварийные отключения в распределительных системах, вызванные низким уровнем надежности составных элементов, приводят к появлению ущербов как в распределительной системе, так и у потребителей из-за прямого недоотпуска энергии [3]. Для решения таких задач необходимо разрабатывать и использовать математические модели, которые позволяют находить не только ожидаемые ущербы у потребителей и в распределительной системе, но и ожидаемые уровни надежности электроснабжения [4]. Определение ущербов в распределительных системах в зависимости от продолжительности недоотпуска электрической энергии, где могут быть использованы минимальные и максимальные их значения в зависимости от типа потребителя, его установленной мощности, позволяет оценить ожидаемый уровень надежности электроснабжения потребителей.

Продолжительность аварийного простоя может быть определена согласно [5]. Если аварийный перерыв электроснабжения меньше минимального планируемого значения $(t_{\text{ав}} < t_{\text{мин.доп}})$, то в данных случаях считается, что у потребителей не возникает ущерб (ΔУ = 0). Для таких случаев, согласно [6], ущербы отсутствуют и в распределительных системах ($\Delta У_с = 0$).

Если аварийный перерыв электроснабжения больше минимального планируемого значения ($t_{ав} > t_{мин.доп}$), то в таких случаях считается, что возникают ущербы у потребителей ($\Delta У \neq 0$) и в распределительных системах ($\Delta У_с > 0$) [6]. Так как практически все составные элементы распределительных систем восстанавливаемые, используя принципы резервирования отдельных составных элементов, можно достичь оптимального уровня надежности, предварительно определенного с учетом вероятностного влияния различных внешних факторов (технически такие проблемы могут быть решены, а экономически необходимо обосновать допустимые дополнительные капитальные вложения) [7]. С точки зрения капитальных вложений, для решения таких проблем необходимы большие приведенные капитальные затраты для повышения уровня надежности электроснабжения, в результате чего значительно снизятся ущербы как у потребителей, так и в распределительной системе, которые всегда технически могут быть обоснованы, но экономически не всегда поддержаны.

Разработка алгоритма оптимизации надежности распределительных систем электроснабжения потребителей. Распределительные системы электроснабжения потребителей динамически преобразуются и постоянно развиваются, поэтому надежность таких динамических систем является функцией от ряда как определенных, так и неопределенных факторов. Если подобные системы содержат n составных элементов с надежностью каждого $r_1, r_2, ..., r_n$ и у i-го составного элемента надежность будет r_i, то в таком случае надежность системы представляет собой непрерывную функцию $R = f(r_1, r_2, ..., r_n)$ и аналитически может быть выражена формулой

$$R = r_i[\psi(r_1, r_2, ..., r_n)_{r_j=1}] + (1 - r_i)[\psi(r_1, r_2, ..., r_n)_{r_j=0}]. \tag{4}$$

Так как надежность отдельных составных элементов $(r_1, r_2, ..., r_n)$ распределительных систем относительно высокая $(0{,}86 \leq r_k \leq 0{,}95)$, то она увеличивается с повышением надежности составных элементов. Если надежность составного элемента j рассматриваемой системы увеличивается от r_j до r_q, что соответствует росту надежности на $\Delta r = r_q - r_j$, то необходимы минимально допустимые дополнительные приведенные затраты $\Delta К_j(\Delta r)$. При этом надо учитывать, что полные капитальные затраты $\Sigma К$ таких систем носят линейный характер, лимитированы и не должны превышать заранее заданные величины $\Sigma С(t)$, прогнозируемые при разработке технико-экономического обоснования рассматриваемой системы. Для таких вариантов прогнозируемые приведенные капитальные затраты определяются по формуле

$$\sum С(t) = \sum К_k(\Delta r). \tag{5}$$

Практически это означает, что $С_j(r_j)$ является непрерывной, монотонно возрастающей функцией, зависящей от значения надежности составных элементов r_j. В таком случае рассматриваемая задача состоит в нахождении величины $C_j(r_j)$, которая определяет оптимальную надежность распределительной системы. Так как суммарные капитальные вложения детерминированы для заданной структуры распределительной системы, в данном случае выполняются условия, представленные уравнением

$$\sum \mathrm{C}(t) = \sum \mathrm{K}_k (\Delta r) = \mathrm{const}. \quad (6)$$

Решать подобные проблемы предлагается методом неопределенных множителей Лагранжа. Для такого случая можно определить множество значений r_q, при котором удовлетворяются условия уравнения (7) [8]

$$\delta f(r_1, r_2, ..., r_n) = 0, \quad (7)$$

где $\delta(f)$ – вариация рассматриваемой функции в зависимости от установленного предела изменения, для которого выполняется условие

$$\delta \mathrm{C} = \sum \delta \mathrm{K}_{ij}(r_j). \quad (8)$$

Для такого случая оптимальная структурная надежность распределительной системы определяется из выражения

$$R(r_j) = \delta R(r_1, r_2, ..., r_n) - \lambda \left| \delta \mathrm{C} - \sum \delta \mathrm{K}_j r_j \right|, \quad (9)$$

где λ – постоянная величина, которая зависит от структуры графа рассматриваемой распределительной системы и очень часто носит неопределенный характер.

Если будет учтено, что частные производные функции $R = f(r_1, r_2, ..., r_n)$, при помощи которой определяется надежность системы в зависимости от изменения надежности составных элементов, описываются уравнением, то в итоге получится формула, представляющая собой изменение функциональной надежности системы в зависимости от изменения функциональной надежности составных элементов во времени:

$$\frac{\partial R}{\partial r_j} = R(r_1, r_2, ..., r_n)_{r_j=1} - R(r_1, r_2, ..., r_n)_{r_j=0}; \quad (10)$$

$$R(r_1, r_2, ..., r_n)_{r_j=1} - R(r_1, r_2, ..., r_n)_{r_j=0} = \lambda \frac{\mathrm{dC}_j}{\mathrm{d}r_j}. \quad (11)$$

Оптимальная надежность составных элементов r_j распределительной системы определится уравнениями типа (11), составленными для всех существующих элементов системы, когда их индекс j изменяется в пределах $j = 1, 2, 3, ..., n,$ и может быть найдена при помощи неопределенного множителя λ. Для вычисления λ необходимо, чтобы были известны значения надежности составного элемента r_j и дополнительных затрат, минимально необходимых для повышения надежности соответствующего элемента $\Delta K_k(r)$.

Анализ уравнения (11) показывает, что если найдены пределы изменения надежности составных элементов, надежность распределительной системы становится оптимальной тогда, когда для всех составных элементов системы соотношения между повышением надежности Δr и минимально необходимыми капитальными затратами ΔK_k являются максимальными. Так как надежность составных элементов $r_1, r_2, ..., r_n$ распределительных систем носит вероятностный характер и изменяется в пределах $0 < r_j < 1$, минимально необходимые затраты должны удовлетворять условию (8). В таких случаях для решения уравнений типа (10) могут быть использованы различные методы, но для рассматриваемого варианта применяли методы, представленные в [8].

Исходя из предположения, что рассматриваемая распределительная система содержит смешанные схемы соединения составных элементов, возникает необходимость определения оптимального числа резервированных элементов, которые обеспечивают оптимальный уровень надежности в зависимости от минимально допустимых затрат, ограниченных начальными условиями. Для такого случая надежность системы определяется согласно формуле

$$R_0 = \prod_{j=1}^{n} r_j. \tag{12}$$

Надежность составного элемента j может быть рассчитана

$$r_j = 1 - q_j^{x_j}, \tag{13}$$

а надежность распределительной системы, у которой часть элементов резервирована, может определяться:

$$q_j = 1 - r_j; \tag{14}$$

$$R_{\text{c}} = \prod_{j=1}^{n} r_j. \tag{15}$$

Если полная стоимость системы определяется

$$\text{C}_{\text{c}} = \sum_{i}^{n} \text{C}_i \alpha_i, \tag{16}$$

где C_j – стоимость одного элемента, и выполняется неравенство $\text{C}_0 < \text{C}_{\text{c}}$, то получим

$$\delta T = \delta[\log r_j - \lambda(\text{C}_{\text{c}} - \sum_{i}^{n} \text{C}_i x_i)]. \tag{17}$$

Максимальное значение логарифма рассматриваемой функции определяет уровень надежности составных элементов распределительной системы, а оптимальное распределение x_j находится по формуле

$$\frac{dg_i^{x_i}}{dx_i} + \lambda C_i = 0 \text{ при } i = 1, 2, 3, \ldots, n. \tag{18}$$

Эквивалентное замещение $\log r_j$ через g_i в (17) приводит к аналитическому уравнению

$$g_i^{x_i} \log g_i / (1 - g_i^{x_i}) - \lambda \mathrm{C}_i = 0. \tag{19}$$

Если учесть аналитические выражения (18) и (19), то значение $g_i^{x_i}$ определяется по формуле

$$g_i^{x_i} = \lambda \mathrm{C}_i / \log g_i / (1 - g_i^{x_i}). \tag{20}$$

Решение (19) с учетом заданных значений g_i и x_i дает аналитическое уравнение

$$\alpha_j = \mathrm{C}_i / \log g_i. \tag{21}$$

Эквивалентное замещение $x\log g_j$, согласно (21), позволяет получить формулу (22), при помощи которой можно определить приведенные затраты

$$\mathrm{C}_i = \sum_{j=1}^{n} x_j \mathrm{C}_j. \tag{22}$$

При определении оптимального уровня надежности R распределительной системы можно использовать метод последовательной аппроксимации составных элементов согласно [9]. На первом шаге аппроксимации фиксируется значение уровня надежности R. Выражая R через приведенные затраты в соответствии с (11), можно определить x_j. Если подставлять полученное значение x_j, можно определить и минимальные величины приведенных затрат, необходимых для получения оптимального значения надежности:

$$\Delta \mathrm{K}_{ij} = \sum_{j=1}^{n} x_j^i \mathrm{K}_j. \tag{23}$$

Если выполняется неравенство $\mathrm{K}_i(t) > \mathrm{K}_j(t),$ то достигнутый уровень надежности R распределительной системы превышает оптимальное значение, так как величине R_i соответствует детерминированное значение $\mathrm{K}_i(t) = \mathrm{K}_j(t).$

Для составных элементов распределительной системы считается, что их надежность практически выполняет условие $0{,}86 \le r_k \le 0{,}95,$ из которого следует, что надежность составных элементов распределительных систем довольно высока. Для таких аналитических случаев с учетом (21) получается уравнение

$$x_j \approx (\log \lambda \alpha_i / \log g_i). \tag{24}$$

Если исходить из предположения, что (24) численно определено, то могут быть найдены минимально необходимые приведенные затраты для создания распределительной системы с оптимальным уровнем надежности, которая определяется

$$\mathrm{C}_{\text{опт}} = \sum_{j=1`}^{n} \alpha_j \log(-\alpha) + \sum_{j=1}^{n} \alpha_j / \log(-\alpha). \tag{25}$$

Из (25) можно найти значение множителя λ

$$\lambda = \exp\left[\mathrm{C} - \sum_{j=1}^{n} \alpha_j \log(-\alpha)\right] / \left[\sum_{j=1}^{n} \alpha_j\right]. \tag{26}$$

Вычисленное таким образом значение λ может быть использовано как первый шаг итерации для определения оптимального уровня надежности распределительных систем. Необходимо отметить, что значение x_i может быть только целым числом параллельно соединенных элементов в рассматриваемой распределительной системе. При аналитических расчетах в соответствии с (24) x_j может получать произвольные значения и быть не целым числом. В таких случаях эту величину необходимо округлять до значения целого числа в соответствии с существующими правилами. В общем случае для решения этих уравнений необходимо, чтобы выполнялось условие

$$\mathrm{C}_{\Sigma} - \sum \mathrm{C}_j x_j \le \mathrm{C}_i. \tag{27}$$

Если условие (27) выполняется, то для множества значений x_j выполняется уравнение (25). В таких случаях x_j является решением для оптимального уровня надежности распределительной системы. Если выполняется условие

$$\mathrm{C}_{\Sigma} - \sum \mathrm{C}_j x_j \ge \mathrm{C}_i, \tag{28}$$

то для множества значений x_j нельзя определить оптимальный уровень надежности с учетом заранее заданных величин для распределительной системы.

Учитывая, что надежность распределительных систем носит как вероятностный, так и детерминированный характер, для ее расчета можно использовать следующий алгоритм:

- для каждого электрического узла распределительной системы определяется соотношение между значением прироста надежности и минимальными приведенными затратами, необходимыми для достижения данного прироста надежности;
- для электрического узла системы рассматриваются и учитываются все резервируемые элементы с учетом уменьшения соотношения между увеличением надежности и приведенных затрат.

При соответствующем анализе определяется минимально необходимое число резервных элементов для обеспечения оптимального уровня надежности распределительной системы.

Пусть x_i – число параллельных элементов в распределительной системе. Если исходить из предположения, что к электрическому узлу i распределительной системы будет присоединен еще и элемент k, то, обозначая через $\gamma_k(x_k)$ соотношение, получим

$$\gamma_k(x_k)=\frac{\sum_{j=1}^{n}(1-q_j^{x_m})-\sum_{j=1}^{m}\log(1-q_j^{x_m})+\log(1-q_j^{x_m})}{\mathrm{C}_j}. \quad (29)$$

Уравнение (29) может быть преобразовано

$$\gamma_k(x_k)=\mathrm{C}_j^{-1}\log\left[1+q_j^{x_m}r_j\right]/(1-q_j^{x_m}). \quad (30)$$

Вероятность отказа любого элемента распределительных систем описывается уравнением

$$q=(1-r)<1. \quad (31)$$

А если величина x_j – целое положительное число, то будет выполняться неравенство

$$0<\ 0<q_i^x(1-q_i)^r(1-q_j^{x+1})^r<1. \quad (32)$$

Из (32) следует

$$\gamma_i(x+1)<\gamma_i(x). \quad (33)$$

Видно, что для каждого значения элемента k величина $\gamma_k(x_k)$ как функция от x_j является монотонно убывающей. Из всего представленного следует, что разработанный алгоритм для оптимизации надежности электрических узлов и распределительных систем может быть разбит на несколько ступеней и описан следующим образом:

- определяется значение $\gamma_k(x_k)$ для различных x_j $(x_j=1, 2, 3, ..., n_0)$;
- определяется значение $\gamma_k(x_k)$ в зависимости от степени убывания функции;
- в соответствии с индексом k составных элементов последовательности $\gamma_k(x_k)$ в электрических узлах суммируется и определяется суммарное значение для анализируемого узла или интегральное значение для рассматриваемой распределительной системы;
- этот цикл повторяется, пока не будет определено значение затрат для рассматриваемого узла или соответствующей системы;
- проводится анализ последовательностей с идентичными индексами $(y^1, y^2, y^3, \ldots)$; если последний индекс совпадет с $\gamma_{k0}(x_{k0})$, то оптимальное решение соответствует числу параллельных элементов x_{k0}.

Часто при решении таких задач оптимальному числу x_{k0} соответствует один элемент. Разработанный алгоритм для оптимизации надежности распределительных систем с учетом их вероятностного изменения во времени приведен на рис. 1.

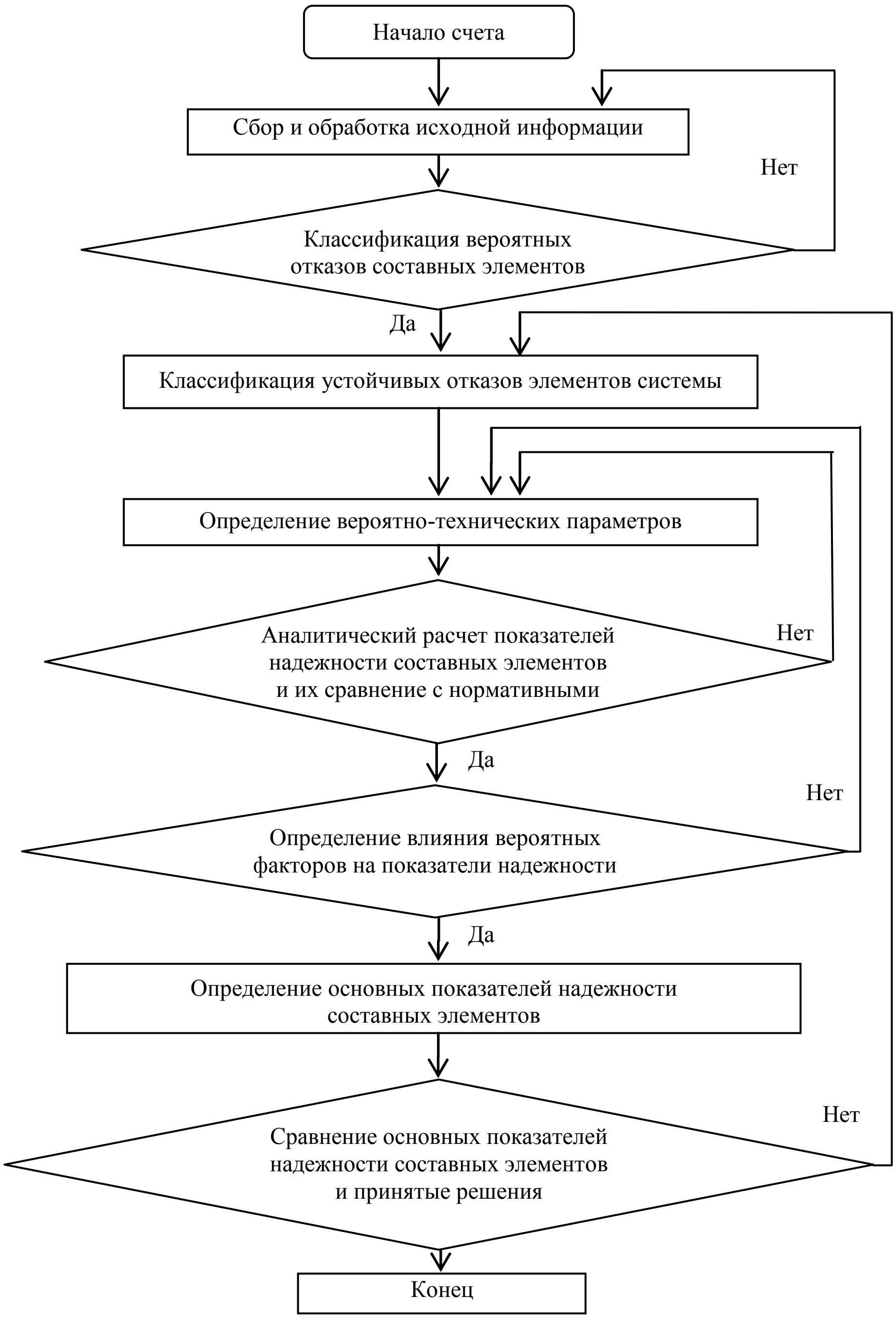

Рис. 1. Структура алгоритма аналитического расчета показателей надежности распределительных систем

ВЫВОДЫ

Надежность распределительных систем является многофункциональной проблемой, которая зависит от ряда определенных и неопределенных факторов и носит вероятностный характер. Определение оптимального уровня надежности распределительных систем – актуально, так как устанавливается зависимость между приведенными капитальными затратами и ожидаемыми ущербами от ненадежного электроснабжения потребителей.

Установлено, что ущербы от ненадежного электроснабжения имеются не только у потребителей, но и в самой распределительной системе. Для определения оптимального уровня надежности распределительных систем разработан алгоритм с учетом динамики развития системы и изменения во времени показателей надежности, которые носят вероятностный характер.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е р х а н, Ф. М. Токи короткого замыкания и надежность энергосистем / Ф. М. Ерхан. – Кишинев: Штиинца, 1985. – 256 с.
2. Е р х а н, Ф. М. Взаимосвязь между токами короткого замыкания и надежностью электрооборудования / Ф. М. Ерхан // Энергетика… (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1991. – № 11. – С. 13–17.
3. Х а м ф р и с, А. Переходное восстанавливающее напряжение в режиме не удаленного короткого замыкания / А. Хамфрис // Отключение токов в сетях высокого напряжения / под. ред. К. Ригаллера. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – С. 39–70.
4. Е р х а н, Ф. М. Оценка влияния уровней токов короткого замыкания на статическую устойчивость узлов электроэнергетических систем / Ф. М. Ерхан // Известия АН МССР. Сер. физ.-техн. и матем. наук. – 1980. – № 2. – С. 77–87.
5. Н а д е ж н о с т ь систем электроснабжения / В. В. Зорин [и др.]. – Киев: Вища шк., 1984. – 192 с.
6. Е р х а н, Ф. М. Исследование влияния уровней токов короткого замыкания на надежность выключателей / Ф. М. Ерхан // Известия АН СССР. Сер. Энергетика и транспорт. – 1991. – № 6. – С. 89–94.
7. Е н д е р и, Д. Надежность электроэнергетических систем / Д. Ендери. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 421 с.
8. Е р х а н, Ф. М. Выбор критерия оптимизации схем электроснабжения сельскохозяйственных потребителей / Ф. М. Ерхан, Е. Я. Заика // Известия АН МССР. Сер. физ.-техн. и матем. наук. – 1987. – № 2. – С. 62–67.
9. Е р х а н, Ф. М. Определение влияния уровней токов короткого замыкания на надежность распределительных электрических сетей и установленного электрооборудования электроэнергетических систем: автореф. дис. … д-ра хабилитата техн. наук / Ф. М. Ерхан. – Кишинев, 2002. – 42 с.

REFERENCES

1. E r k h a n, F. M. (1985) *Short-Circuit Currents and Reliability of Power Systems*. Kishinev: Shtiintsa.
2. E r k h a n, F. M. (1991) Interrealtion Between Short-Circuit Currents and Reliability of Electrical Equipment. *Izvestiia Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii – Energetika. [Proceedings of the Higher Education Institutions and Power Engineering Associations – Power Engineering]*, 11, 13–17.
3. H u m p h r i e s, A. (1981) Transient Recovery Voltage in the Short-Line Fault Regime. *Current Interruption in the high voltage networks.* Moscow: Energoatomizdat, 39–70.
4. E r k h a n, F. M. (1980) Impact Assessment of Short-Circuit Current on Static Stability of Interconnected Power System Units. *Izvestiia Akademii nauk Moldavskoi SSR. Ser.: Fiziko-Tekhnicheskikh i Matematicheskikh Nauk [Proceedings of the Academy of Sciences of the Moldavian SSR. Ser.: Physico-Technical and Mathematical Sciences]*, 2, 77–87.
5. Z o r i n, V. V., Tislenko, V. V., Kleppel', F., & Gerkhard A. (1984) *Reliability of Electric Supply Systems.* Kiev: Visha Shkola.
6. E r k h a n, F. M. (1991) Impact Investigation of Short-Circuit Current on Circuit Breaker Reliability. *Trudy AN SSSR. Seriia: Energetika i Transport [Proceedings of AN SSSR. Series: Power Engineering and Transport]*, 6, 89–94.
7. E n d e r y, D. (1983) *Reliability of Electrical Power Systems.* Moscow, Energoatomizdat.
8. E r k h a n, F. M., & Zaika, E. Ya. (1987) Selection of Optimization Criteria for Electric Supply Diagrams of Agricultural Consumers. *Izvestiia Akademii Nauk Moldavskoi SSR. Ser.: Fiziko-Tekhnicheskikh i Matematicheskikh Nauk [Proceedings of the Academy of Sciences of the Moldavian SSR. Ser.: Physico-Technical and Mathematical Sciences]*, 2, 62–67.
9. E r k h a n, F. M. *Opredelenie Vliianiia Urovnei Tokov Korotkogo Zamykaniia na Nadezhnost' Raspredelitel'nykh Elektricheskikh Setei i Ustanovlennogo Elektrooborudovaniia Elektroenergeticheskikh Sistem. Avtoref. dis. d-ra Khabilitata Tekhn. Nauk* [Determining the impact of levels of short-circuit currents on the reliability of electric distribution networks of electrical equipment and electric power systems. Dr. tech. sci. diss.]. Kishinev, 2002.

Представлена кафедрой электрификации
и автоматизации сельского хозяйства

Поступила 03.05.2013