АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Клименко Ю.А., Преображенский А.П.
Воронежский институт высоких технологий, Воронеж, Россия
klm71165@mail.ru, app@vivt.ru

Аннотация. В статье рассматривается проблема оптимизации обслуживания энергетических компонентов в технических системах. Критерий в проблеме связан с минимальным математическим ожиданием потерь энергетических компонент за время ожидания для всех компонентов. Анализировались ситуации, возникающих при принятии решений относительно роста ресурсной эффективности технической системы.

Ключевые слова: моделирование, оптимизация, энергетическая система, критерий, альтернатива.

Введение

Реформирование технических систем, связанных с обслуживанием энергетических компонентов, требует новых подходов к организации управления. Эффективность и качество работы во многом зависит от возможностей научно обоснованного использования различных ресурсов. Необходимость повышения эффективности управления техническими системами на основе развития проблемно-ориентированных методов моделирования и оптимизации [1]. Целью работы является разработка методов прогнозирования и оптимизации механизмов обслуживания энергетических компонентов в технических системах [2].

1. Структура технической системы обслуживания энергетических компонентов

Мы предполагаем, что существует множество технических систем $S\{S_1, S_2, \ldots, S_N\}$. В них могут обслуживаться различным образом энергетические компоненты. Проводится сбор данных. На их основе определяется интенсивность обслуживания $\chi_1, \ldots, \chi_N$. При этом измерение χ_i рассматривается в виде количества энергетических компонентов. Есть заданный временной интервал их работы. Анализируются технические системы $S\{S_1, S_2, \ldots, S_N\}$. В течение интервалов времени $T: p_1(T), \ldots, p_N(T)$ мы можем обозначить вероятности того, что будет наблюдаться отказ по обслуживанию. Прогностические модели дадут возможности для расчета функции $p_i(T)$.

Время операции в технической системе считаем τ_i. Для соответствующего τ_i технической системой будет потеряно $\chi_i \tau_i$ энергетических компонентов.

Пусть стоит задача в которой строится система S. Промежуток $\alpha \le \chi \le \beta$ соответствует общей пропускной способности. Множество подсистем могут разным образом формировать систему S. Каким образом мы это можем сделать? Важно выбрать соответствующий критерий. Он будет использоваться при задаче оптимизации, направленной на выбор. Анализируется общее время ожидания по всем компонентам системы S^*. Рассматривая его, мы должны минимизировать значение математического ожидания потерь по энергетическим компонентам. Какое будет начальное условие? Для множества число элементов $N_0 \le N$.

1. Пусть ведется процесс моделирования. Важно соотнесение S_i^* $(i=1, 2, \ldots, N_0)$ и S_j $(j=1, 2, \ldots, N)$. Выбор ее происходит по набору S. В системе S^* требуется найти состав входящих в нее компонент. Будем опираться на λ_j $(j=1, 2, \ldots, N)$. Исходим из того, что:

$$\lambda j = \begin{cases} 1, \text{ если } \mathrm{S}_j \text{ входит в оптимальный набор } \mathrm{S}^*, \\ 0, \text{ если } \mathrm{S}_j \text{ не входит в } \mathrm{S}^*. \end{cases} \tag{1}$$

При решении задачи изначально λ_j неизвестны. На основе задачу линейного программирования их можно определить. Формируется целая функция:

$$min \sum_{j=1}^{N} \lambda_j \chi_j \tau_j \left[1 - p_j(T)\right]. \tag{2}$$

В чем смысл данного выражения? Это математическое ожидания пропускной способности в технической системе S^*. Потеря ее будет соотнесена с определенным временем T. Соответствует оно отказу по энергетической компоненте в обслуживании. Важно минимизировать функцию [3]. При этом она зависит от λ_j $(j=1, ..., N)$. Для указанных переменных выполняется:

$$\sum_{j=1}^{N} \lambda_j \le N_0 \quad , \quad \sum_{j=1}^{N} \lambda_j \chi_j \le N_0 \; . \tag{3}$$

В левой части первого неравенства суммируются компоненты, формирующие систему S^*.

Суммарная пропускная способность системы S^* ограничивается вторым условием.

Будем считать, что по системе $S_j \in S$ пропускная способность рассматривается в виде вектора χ_I. Какие в нем составляющие? Они будут следующими: χ_{ik} $(k=1, ..., m;\ i=1, ..., N)$. Ограничения будут такие:

$$\alpha_k \le \sum_{j=1}^{N} \lambda_j \chi_{jk} \le \beta_k (k = 1, ..., m). \tag{4}$$

По k-й компоненте в векторе в системе S^* мы даем границы, в которых она находится: α_k, β_k. Они рассматриваются как исходные данные.

Мы можем решать задачу (2) - (4) или (2)-(5) разными способами [2].

2. Ограничения при рассмотрении задачи можно задать другим способом. Например, задать вектор пропускной способности χ_i мы можем при помощи нормы с весом:

$$\|\chi_j\| = \sum_{k=1}^{m} \chi_{jk} c_k \; . \tag{5}$$

В указанном выражении для неотрицательных весовых коэффициентов c_k $(k=1, ..., m)$ мы можем соотнести стоимость единицы энергетической компонентыk-го типа. Тогда мы вместо ограничений (3) и (4) запишем

$$\alpha \le \sum_{j=1}^{N} \lambda_j \|\chi_j\| = \sum_{j=1}^{N} \sum_{k=1}^{m} \lambda_j \chi_{ik} c_h \le b \; . \tag{6}$$

Границы интервала рассматриваются как ограничения по стоимости работ, осуществляемых в S^*.

Важно, при практической реализации указанного подхода (6) анализировать вместе с (3) и (4).

3. С точки зрения практики интересно рассмотрение $N_0 \ge N$. Когда такой вариант может наблюдаться? Число подсистем S_i (i=1, 2, …, N) не превышает число подразделений. Какой вид задачи будет наблюдаться? Видно, что это задача линейного программирования. Есть трудности в ходе ее решения. То есть, его находим не для всех вариантов. Это связано с тем, что не очень большой выбор будет относительно подразделений. Есть возможности осуществления полного анализа. Тогда для Sтребуется дать расчет пропускной способности [3]. С точки зрения общей постановки это будет экстремальная задача нелинейного программирования. Так как ее трудно решить, мы предлагаем другой подход.

Проведем выбор большого целого числа $N_1 > N_0 \ge N$. Сделаем добавление системе S еще $N1 - N$систем $S_{N+1}, ..., S_{N1}$, которые соответствуют производительностям $\chi_{N+1}, ..., \chi_{N1}$. Мы анализируем времена ожидания $\tau_{N+1}, ..., \tau_{N1}$. Также анализу подлежат вероятности того, что будет отказ для $T(p_{N+1}(T), ..., p_{N1}(T)$. В ходе решения задачи целевая функция похожа на (2):

$$min \sum_{j=1}^{N_1} \lambda_j \chi_j \tau_j \left[1 - p_j(T)\right]. \tag{7}$$

По ограничениям мы ориентируемся на (3). При этом в выражениях будет замена N на N_1. В ходе временного анализа указанной задачи шаг берется небольшой. Функции p_j(T) (j=N+1, …, N_1) характеризуются своей полнотой. Подсистемы S^* мы сможем выбрать оптимально. Какие при этом будут трудности? Компоненты S_j позволяют сформировать S^*. Но они соответствуют номерам N+1, …, N_1. В ходе численной реализации оптимальность не будет соответствовать компонентам [4].

Можно ли обойти такую трудность? Проведем решение двуцелевой задачи линейного булевского программирования. В ней целевые функции мы назначим такие

$$min \sum_{j=1}^{N} \lambda_j \chi_j \tau_j \left[1 - p_j(T)\right], max \sum_{j=1}^{N} \lambda_j \chi_j \tag{8}$$

При этом остается ограничение (3). Существует возможность для объединения двуцелевых функции (8) в одну дробно-линейную функцию

$$\frac{\sum_{j=1}^{N} \lambda_j \chi_j \tau_j \left[1 - p_j(T)\right]}{\sum_{j=1}^{N} \lambda_j \chi_j} \tag{9}$$

Эту функцию мы рассматриваем как минимальные средние потери энергетических компонент на единицу производительности. В результате решения задачи получаем

$$\chi' = \chi - max \sum_{j=1}^{N} \lambda_j \chi_j \tag{10}$$

В указанном выражении χ является заданной пропускной способностью. Ее требуется получить. Решим задачу линейного при такой целевой функции

$$min \sum_{j=N+1}^{N_1} \lambda_j \chi_j \tau_j \left[1 - p_j(T)\right] \tag{11}$$

Существуют ограничения

$$\sum_{j=N+1}^{N_1} \lambda_j \chi_j = \chi' \tag{12}$$

Эти ограничения можно переписать аналогично (5) и (7). Анализ при решении задачи соответствовал фиксированному значению промежутка времени T. Пусть выражение (2) рассматриваемое в виде функции от T для промежутка $T_1 \le T \le T_2$ характеризуется единственным минимумом [5]. Тогда искать минимум можно при помощи метода поиска по Фибоначчи.

2. Проблемы выбора альтернатив

Требуется сделать выбор системы наиболее эффективных мер для того, чтобы обеспечить ресурсоэффективность при работе технической системы. Набор таких мер можно сформировать как множество альтернативных вариантов.

В качестве адекватных можно считать квалиметрические оценки. Они рассматриваются как лингвистических переменных [4], которые заключают высказывания относительно того, насколько предпочтительно принятие определенного решения [5].

Проведем рассмотрение множества ситуаций. Когда они будут наблюдаться? Требуется принимать решение по роста ресурсоэффективности технической системы, $B = \bigcup_{n=1}^{N} b_n$, она будет характеризоваться объемом N. Анализируются элементы b_n, которые есть в B. Важно решить задачу выбора единственного a_n из $A = \bigcup_{n=1}^{N} a_n$. Этот процесс реализуется при однозначном отображении b_n в a_n. Показатели, которые соответствуют каждому варианту:

$b_1 : F_1 = \{f_1^1, f_1^2, ..., f_1^i\}$; $b_2 : F_2 = \{f_2^1, f_2^2, ..., f_2^i\}$; ... $b_n: F_n = \{f_n^1, f_n^2, ..., f_n^i\}$,

в ходе решения задачи индексы: $i = \overline{1, I}$ - по показателю; $i = \overline{1, N}$ - по варианту.

Анализируемые показатели будут дискретными распределениями $\delta(a_n)$ для качественной или количественной шкалы E. Проведение выбора среди альтернатив будет зависеть от того, какие значения показателей f_n^i. Тогда показатели рассматриваются в виде критериев выбора альтернатив a_n по множеству A.

Оценки предпочтительности альтернатив R_n, если анализируются дискретные распределения значений критериев [7] можно найти на основе свертки множества критериев к одному:

$$R_n = \sum \delta\left(f_n^i\right) \cup p_n^i \tag{13}$$

В указанном выражении $\{f_n^i\} = E$; $\delta(p_n^i)$ – вес, который относится к $p_n^i \in E$; $U(p_n^i)$ – полезность критерия p_n^i.

При анализе оценок мы рассматриваем бинарные отношения. То есть, альтернатива a будет предпочтительнее, по сравнению с b, когда $R_a > R_b$. Когда будет тождественность между альтернативами a и b? Если $R_a = R_b$. Предположим, что $a,\ b \in A$ являются двумя альтернативами Как найти предпочтительность по дискретно распределенным величинам? Один из подходов связан с нечеткими отношениями предпочтений. Считаем, что R_{ab} и R_{ba} показывают предпочтения a перед b и b перед aстрогим образом Из этого вытекает, что степень тождественности по альтернативам характеризуется $R_{a\sim b}$. В [0, 1] требуется дать определение R_{ab}, R_{ba} и $R_{a\sim b}$. С учетом указанных допущений мы можем моделировать ситуации предпочтений [6]. В практических задачах мы можем анализировать предпочтение, являющимся строгим $R_{ab}=1$; соотношение, которое связано с безразличием $R_{a\sim b}=1$; соотношение, которое связано с большой предпочтительностью $R_{ab}+R_{a\sim b}=1$; соотношение, которое связано с несравнимостью $R_{ab}= R_{ba}$. Каким образом можно при нечетком подходе определить полноту? Например, на базе выражения

$$R_{ab}+R_{ba}+ R_{a\sim b} = l \quad \forall a, b \in A. \tag{14}$$

Методы нечетких отношений предпочтений можно обобщить. Это будет для случая произвольного множества альтернатив. Должны быть выявлены наиболее предпочтительные альтернативы. Каким образом это можно сделать? Применяем методику многошагового парного сравнения или сравнения каждой альтернативы и других. Объемы множества $\{a_n\}$ тех альтернативных ситуаций, которые анализируются, будут определять трудоемкость и эффективность в решении рассматриваемой задачи [7]. В случае, когда объемы большие, мы можем столкнуться «комбинаторным взрывом». Из этого вытекают повышенные требования к применяемой вычислительной технике.

3. Процедуры, связанные с определением оценки предпочтений при множественном выборе

Проанализируем процедуры, связанные с определением оценки предпочтительности в ходе многоальтернативного выбора по множеству дискретным образом распределенных критериев [8]. Когда используются множественные отношения предпочтительности, тогда создается формальная модель рационального выбора при том, что может быть размытость. Методика базируется на том, что можно применять принцип монотонности. Для решения задачи мы опираемся на подход, позволяющий последовательное сужение относительно анализируемых альтернатив [9]. Покажем, каким образом можно осуществить определение в рамках многоальтернативной предпочтительности.

Исходим из того, что $B = \bigcup_{n=1}^{N} b_n$ - это множество анализируемых вариантов. Происходит процесс их отображения к множеству альтернатив $A = \bigcup_{n=1}^{N} a_n : \left(b_n \to a_n\right)$. По любой a_n есть критерии $f(i,n)$. Следует отметить, что они дискретные. Для индексов имеем: $i = \overline{1, I}$ – по критерию; $n = \overline{1, N}$ – по альтернативе. За счет $f(i,n)$ мы обозначаем дискретные распределения. Для критериев существует количественная шкала E:

$$\sum_{i=1}^{I} f\left(i,n\right) = 1 \,\forall\, n = \overline{1,N} \tag{15}$$

Принцип монотонности характерен для указанных распределений. Значениепредпочтительности по принятию a_n, когда есть вариант b_n, характеризуется монотонным изменением, когда монотонное изменение есть для $f(i,n)$ по шкале E. Альтернатива a_n перед другими характеризуется R_n – степенью предпочтительности. Нормировку запишем таким способом: $\sum_{n=1}^{N} R_n \le 1$. Интегральная тождественность альтернатив – $S = 1 - \sum_{n=1}^{N} R_n$. Моделирование в рамках нечеткого подхода отношений предпочтений: предпочтение, являющимся строгим $R_k = 1; R_n = 0; S = 0 \; \forall \; n = \overline{1,N}; \; n \ne k$; существование тождественности $S = 1; R_n = 0 \; \forall \; n = \overline{1,N};$ наличие большой предпочтительности $R_k + S = 1; R_k \ge S; R_n = 0; S = 0 \; \forall \; n = \overline{1,N}; \; n \ne k$; наличие возможной предпочтительности $R_k \ge S; R_k > R_n \; \forall \; n = \overline{1,N}; \; n \ne k$; отсутствие предпочтительности $S > R_n; S \ne 1 \; \forall \; n = \overline{1,N};$ безразличие $R_k = R_n \pm \varepsilon; \; S < 0{,}5 \; \forall \; n = \overline{1,N}; \; n \ne k$, здесь ε является степенью недоверия. Она рассматривается в виде исходных данных. Вытекает это из требования того, чтобы было рассогласование в ходе сравнения. Для вычисления численные оценки по степеням предпочтительности альтернатив R_n и их тождественности S требуется, чтобы были сделаны такие шаги.

1. Значения критериев $f(i,n)$ будут пронормированы к единице таким образом

$$f(i,n) = V_i \, f(i,n) / \sum_{i=1}^{N} f(i,n) \tag{16}$$

Кроме того они будут проранжированы относительно убывания значимости.

2. Будет проверено условие $f(i,n) \ne 0 \;\; \forall n$. Когда оно не будет выполнено с точки зрения соответствующего альтернативного распределения [10], тогда будет увеличение на единицу значение соответствующего индекса i. Когда $i \le I \; \forall n$, тогда будет повторная проверка относительно условия 2.

3. При выполнении условия 2, а также $i \le I \; \forall n$, по заданным i будут найдены $u = \min f(i,n) \;\; \forall n$. Когда будет равенство по всем индексам i, тогда вычисляются значения $S=S+u$. Когда индекс i в единственной альтернативе a_n не будет больше, чем другие, тогда вычисляем $R_n=R_n+u$. Если индексы i по нескольким kальтернативных распределениям будут совпадать и меньше других, в таких случаях по таким альтернативам вычисляем $R_n=R_n+u/k$.

4. На базе заданных i вычисляем новые значения $f(i,n) = f(i,n) - u \; \forall n$.

5. Когда $i<I \; \forall n$, тогда будем возвращаться к процедуре 2, в противном случае будет операция выхода.

Важное условие, когда используются указанные шаги при выборе альтернативы, связано с монотонностью в росте или убывании предпочтительности альтернативы по мере роста или убывания оценок $f(i,n)$ в рамках шкалы E. По мере роста значения $f(i,n)$, можно говорить о большей предпочтительности в выборе в альтернативе $a_n \in A$. Но можно наблюдать, что на практике часто такое условие не выполняется. Когда увеличивается $f(i,n)$, тогда может быть уменьшение в предпочтительности в выборе альтернативы a_n. Первый вариант можно считать нормальным, когда используются данные шаги (припишем ей знак T со значением 1, т.е. $T_j=l$). Второй вариант будет обратным к предыдущему (припишем для него значение признака $T_j=0$). При универсальном применении шагов для разных ситуаций появляется необходимость в нормализации значений критериев $f(i,n)$. Она проводится на основе такого правила:

$$\forall i: \; f(i,n) = \begin{cases} f(i,n) \big| T_j = 1 \\ \max\limits_{\forall n} f(i,n) - f(i,n) \big| T_j = 0, \end{cases} \tag{17}$$

здесь $\max\limits_{\forall n} f(i,n)$ является максимальным значением $f(i,n)$ из n.

Когда в критериях акцентируется значимость в зависимости от того, какой информационный вклад в результат анализа для каждого из них требуется приписать соответствующий вес V_i, тогда

$$f(i,n) = V_i f(i,n). \tag{18}$$

Весовые коэффициенты будут учитывать процесс, который связан с нормированием параметров:

$$f(i,n)=V_i\, f(i,n)\Bigg/\left\{\sum_{i=1}^{I}\left[V_i\, f(i,n)\right]\right\} \tag{19}$$

Необходимо отметить, что на основе метода нечетких отношений предпочтений и его последующего развития при неограниченном множестве альтернатив можно получить верную оценку предпочтительности только для такого случая. В нем нет необходимости учитывать абсолютные значения критериев. Это связано с условием того, предварительным образом нормируются значения критериев к единице. Например, пусть проводится исследование, по двум альтернативам $a,\ b \in A$ при значениях критериев $\overline{P_a}=\{10;20;30\}$ и $\overline{P_b}=\{1;2;7\}$. В таких случаях в результате использования процедур определения оценок предпочтительности получается, что анализируемые распределения будут тождественными. Это связано с тем, что после нормирования значений критериев к единице для обеих альтернатив будут получены одни и те же [12] исходные распределения $\overline{P}=\{0{,}1;\,0{,}2;\,0{,}7\}$.

Чтобы устранить такой недостаток, применим следующий подход. Исходим из того, что есть N альтернативных распределений $a_n \in A$ ($n=\overline{1,N}$ – индекс альтернативы). При этом указаны значения критериев $f(i,n)$ ($i=\overline{1,I}$ – индекс критерия). В таком случае для каждой альтернативы будет определяется коэффициент пропорциональности k_n:

$$\forall n: k_n=\frac{\sum\limits_{\forall i} f(i,n)}{\max\limits_{\forall n}\sum f(i,n)} \tag{20}$$

Затем осуществляется нормирование значений критериев к единице. Исходя из указанного ранее алгоритма происходит вычисление оценок предпочтительности R_n и тождественности S альтернатив a_n. В зависимости от значений коэффициентов k_n происходит уточнение полученных оценок:

$$R_n^{'}=k_n R_n;\ S^{'}=1-\sum_{\forall n} R_n^{'},$$

Если их нормировать к единице, тогда

$$R_n=\frac{R_n^{'}}{\sum\limits_{\forall n} R_n^{'}+S^{'}};\quad S=\frac{S_n^{'}}{\sum\limits_{\forall n} R_n^{'}+S^{'}}$$

они становятся нормализованными и определяются на интервале [0, 1].

4. Результаты

Было рассмотрено 18 технических систем. В них должны обслуживаться 118 энергетических компонентов. Задавалось среднее время обслуживания по соответствующим операциям – 0.5 час. Пропускная способность технической системы – 1 энергетическая компонента в 2 часа. Был рассмотрен вариант, когда энергетические компоненты произвольным образом распределялись между техническими системами. После этого, был использован разработанный оптимизационный алгоритм. Было определено 2 главных альтернативы. Это дало возможность повысить эффективность обслуживания на 20%.

5. Заключение

Оптимизация распределения материальных ресурсов в структуре технических систем должна осуществляться по критерию их максимального использования. При этом учитываются приоритеты их компонентов и ресурсные ограничения, когда формируются задачи прямого и двойственного линейного программирования. В качестве компромисса решения определяется рациональный вариант и его детализация на уровне компонентов и временных интервалов. Рациональный выбор структуры обслуживания энергетических компонент в технических системах позволяет трансформировать полученную информацию в структуру экспертно-оценочных и статистических данных. При этом будет рациональный выбор спектра работ в текущем интервале планирования, а также с учетом прогнозных моделей для того, чтобы определять потенциальные возможности работ на будущий период.

Литература

1. *Клименко Ю.А., Преображенский А.П.* Разработка устройства измерения параметров электрической сети / Ю.А. Клименко, А.П. Преображенский. // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций. 2020. № 3. С. 152.
2. *Тульский В.Н.* Управление качеством электроэнергии в электрических сетях / В.Н. Тульский, И.И. Карташев, М.Г. Симуткин, Х.Б.Назиров, Н.М. Кузнецов // Горный журнал. – 2012. – №12. – С. 52-55.
3. Управление качеством электрической энергии / *И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов и др.*; под ред. Ю.В. Шарова. – М.: Издат. дом МЭИ, 2006. – 320 с.
4. *Савина Н.В.* Системный анализ потерь электроэнергии в электрических распределительных сетях: моногр. / Н.В. Савина; отв. ред. Н.И. Воропай. – Новосибирск: Изд-во Наука, 2008. – 228 с.
5. *Клименко Ю.А.* Адаптивная система управления для устранения несимметричности нагрузки фаз в трёхфазной сети 0,4 кВ./ Клименко Ю.А., Преображенский А.П., Чопоров О.Н. // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2019. Т. 7. № 4 (27). С. 9-10.
6. *Александров А. Г.* Оптимальные и адаптивные системы /А. Г. Александров. – М.: Высшая школа, 2003. –287 с.
7. *Klimenko Y., Preobrazhenskiy A.P., Lvovich I.Y.* Optimization of technological process of monitoring of power quality in distribution networks 10/0,4 kV. / Klimenko Y., Preobrazhenskiy A.P., Lvovich I.Y. // В сборнике: Proceedings - 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2019 2019. С. 422-427.
8. *Дед А.В.* Сравнение методов расчета коэффициентов учета несимметрии распределения нагрузок при оценке потерь мощности. / Дед А.В., Паршукова А.В.// Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – № 9 (часть 2) – С. 221-225.
9. *Клименко Ю.А.* Об оценке потерь электроэнергии в распределительных сетях 10/0,4 кВ / Клименко Ю.А., Преображенский А.П. //Актуальные вопросы энергетики. 2019. № 1. С. 6-15.
10. *Жежеленко И.В.* Оценка надёжности электрооборудования при пониженном качестве электроэнергии / И.В. Жежеленко, Ю.Л. Саенко, А.В. Горпинич // Вести в электроэнергетике. – 2006. – №6. – С. 13-17.