

МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК С УЧЕТОМ ИНТЕРВАЛЬНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

О.Н. Дробязко, С.Ф. Нефедов

В статье рассмотрены методы моделирования однофункциональных систем безопасности электроустановок с учетом интервальной неопределенности части исходных данных, опирающиеся на теорию интервального анализа. Разработаны методы оптимального выбора систем безопасности электроустановок на основе сравнения интервальных представлений показателей эффективности, отвечающих различным вариантам систем.

Ключевые слова: электробезопасность, пожарная безопасность электроустановок, системы безопасности электроустановок, интервальная неопределенность исходных данных, оптимальный выбор.

В настоящее время продолжается развитие теории систем безопасности электроустановок зданий (СБЭ), определяемых как многофункциональные (комплексные) системы, обеспечивающие в пределах некоторого помещения (здания) одновременно как электробезопасность людей, так и пожарную безопасность электроустановок [1,2,3].

Выделяется два самостоятельных направления этой теории, каждое из которых изучает отдельный аспект обеспечения безопасности электроустановок: технические системы обеспечения электробезопасности (СОЭБ) и системы обеспечения пожарной безопасности электроустановок (СОПБ). В рамках каждой из них разработаны собственные математические модели и методы оптимизации. Имеется также отдельное направление этой теории, в рамках которого изучаются вопросы оптимизации СБЭ одновременно по двум указанным аспектам безопасности электроустановок.

Краткая характеристика математических моделей и двухуровневых систем показателей эффективности для двух аспектов безопасности СБЭ дана в [3].

Общая особенность разработанных многоуровневых алгоритмических топологически-вероятностных моделей состоит в том, что часть используемых при моделировании исходных данных имеет неустраиваемую неопределенность. Анализ такой неопределенности был выполнен нами в работах [4,5,6].

Для математического описания неопределенности исходных данных было принято решение об использовании двух «моделей неопределенности» – интервальной и нечеткой.

Для описания и последующего оперирования с неопределенностью второго вида нами было предложено использование аппарата нечетких чисел, рассматривающегося в рамках теории нечетких множеств.

Для этого варианта неопределенности на базе имевшихся алгоритмов (предполагающих определенность исходных данных) были разработаны специальные моделирующие алгоритмы, позволяющие, с одной стороны, учесть нечеткую неопределенность данных, вводимых на определенных уровнях моделирования, и, с другой стороны, сохранить «операционную логику» этих алгоритмов на большинстве уровней моделирования. Такие алгоритмы рассмотрены в [6].

Наряду с решением задачи моделирования, учитывающей нечеткость части исходных данных, возникла также необходимость в разработке методов однокритериальной оптимизации СБЭ (в одном аспекте безопасности), а также методов двухкритериальной оптимизации (для двух аспектов безопасности), опирающихся на использование интегральных показателей эффективности системы, представляемых в форме нечетких чисел. При этом возникла необходимость решения вспомогательной задачи сравнения значений нечетких чисел, описывающих значения показателей эффективности различных вариантов СБЭ. Решение поставленных задач было выполнено в рамках работы [6]. В работе [3] приведены идеи разработанных методов и краткие результаты решения двух поставленных задач.

Вместе с тем, до настоящего времени не получили подробного освещения разработанные в рамках [6] технологии моделирова-

ния и оптимизации СБЭ, опирающиеся на интервальное описание неопределенности исходных данных.

Целью данной статьи является изложение основных результатов разработки технологии математического моделирования процесса функционирования СБЭ с учетом интервальной неопределенности исходных данных, а также основных положений оптимального выбора вариантов СБЭ, опирающихся на интервальное представление показателей эффективности различных вариантов систем.

Рассмотрим основные положения предлагаемой технологии моделирования.

Источником (неустранимой) интервальной неопределенности исходных данных в данной предметной области являются защитные характеристики аппаратов защиты (АЗ), составляющих основу СБЭ, а также характеристики перегоя проводов, входящих с состав электропроводки помещений.

Предлагается описывать интервальную неопределенность защитных характеристик и характеристик перегоя в виде интервальных функций. Областью определения и областью изменения этих функций являются положительные действительные числа. Рассматриваемые функции являются многозначными: каждому значению аргумента соответствует множество числовых значений, которое задается его крайними границами.

Будем задавать интервальную многозначную функцию в виде двух однозначных функций, описывающих зависимость граничных точек интервалов неопределенности от аргумента интервальной функции. Будем называть их граничными функциями.

Обозначим эти функции символами $f^l(x)$ и $f^b(x)$. В этих обозначениях x – аргумент интервальной функции, $f^l(x)$ – функция, описывающая зависимость нижних (меньших) значений интервалов неопределенности от аргумента x (функция нижних границ интервалов неопределенности), $f^b(x)$ – функция, описывающая зависимость верхних (больших) значений интервалов неопределенности от аргумента x (функция верхних границ интервалов неопределенности) (рисунок 1).

На их основе построим уровневые однозначные интервальные функции, определяемые параметром ω , изменяющимся на отрезке $[0,1]$. Граничные значения этого параметра отвечают граничным функциям.

Любое значение неопределенной интервальной величины в некоторой точке x^* может

быть подсчитано в виде суммы двух слагаемых. Первое из них представляет собой значение нижней границы интервала неопределенности (значение функции $f^l(x^*)$), второе – расстояние точки, отражающей конкретное значение фактора (значение $f^\#(x^*)$), от нижней границы интервала неопределенности.

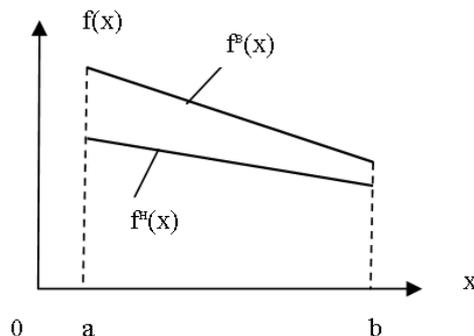


Рисунок 1 – Задание интервальной функции

При задании второго слагаемого будем использовать две величины: длину интервала неопределенности, ограничиваемого справа выделенной точкой характеристики $f^\#(x^*)$, и отношение указанной длины к длине интервала неопределенности $\Delta f(x^*)$. Обозначив последнее отношение символом ω , получим,

$$\omega = (f^\#(x^*) - f^l(x^*)) / \Delta f(x^*) = (f^\#(x^*) - f^l(x^*)) / (f^b(x^*) - f^l(x^*))$$

Тогда конкретное значение фактора в «сечении» интервальной функции, отвечающем значению аргумента x^* , может быть представлено в следующем виде

$$f^\#(x^*) = f^l(x^*) + \omega \cdot \Delta f(x^*).$$

Таким образом, значение фактора для заданного значения аргумента может быть определено как сумма значений нижней границы и некоторой части интервала неопределенности. Величина ω может трактоваться как доля длины интервала неопределенности (отсчитываемая от его начала), участвующая в задании значения уровневой функции $f^\#(x^*)$ (рисунок 2).

Перейдем к технологии моделирования электробезопасности при интервальной неопределенности характеристик. При решении этой задачи учитывается соотношение между номерами электроустановок, находящимися в концах участка сети и номерами аппаратов, обеспечивающих безопасность человека при

МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК С УЧЕТОМ ИНТЕРВАЛЬНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

возникновении коротких замыканий в указанных КЗ в этих точках позволяют определить длительности срабатывания АЗ с учетом величины этих токов и защитных характеристик (при моделировании учитываются действия как основных, так и резервных АЗ). Структура систем электроснабжения и систем безопасности электроустановок определяет векторы соответствий аппаратов защиты участкам сети, в конце которых могут произойти однофазные замыкания на корпус. При использовании на объекте Z аппаратов защиты учитывается Z защитных характеристик, которые могут быть представлены в виде вектор-функции вида:

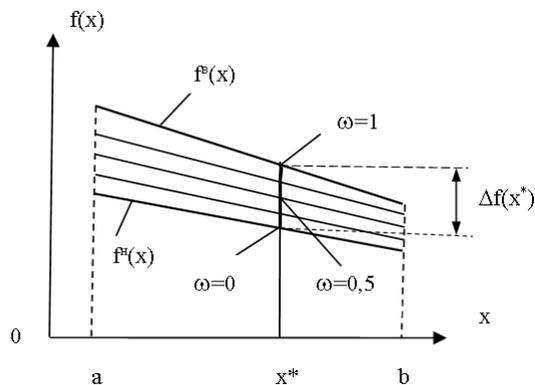


Рисунок 2 – Использование величины ω для задания уровней функций

$$T_{cp}(I) = \{t_{cp}(I)_1, t_{cp}(I)_2, \dots, t_{cp}(I)_Z\}$$

Компоненты этой функции, описывают зависимости времени срабатывания z-го АЗ ($z=1,2,\dots,Z$) от величины тока, протекающего по соответствующему АЗ. При моделировании определяется конкретное значение тока, протекающего через каждый АЗ.

Интервальная неопределенность защитных функций приводит к тому, что будет сформирован вектор $T_{cp}(I_{AZ})$, каждая компонента которого представляет собой интервальную неопределенную величину:

$$T_{cp}(I_{AZ}) = \{t_{cp}(I_{AZ1})_1, t_{cp}(I_{AZ2})_2, \dots, t_{cp}(I_{AZZ})_Z\}$$

В процессе функционирования системы каждая из величин, входящей в эту Z-мерную величину, может принять любое значение из своего интервала неопределенности. Необходимо учитывать все возможные комбинации значений таких величин.

Пространство всех возможных значений Z-мерного неопределенного фактора пред-

ставляет в виде прямого произведения множеств, каждый компонент которого представляет собой неопределенный интервал длительностей срабатывания z-го АЗ:

$$\Delta T_{cp}(I_{AZ}) = \Delta t_{cp}(I_{AZ1})_1 \times \Delta t_{cp}(I_{AZ2})_2 \times \dots \times \Delta t_{cp}(I_{AZZ})_Z$$

Общее количество возможных значений многомерного неопределенного фактора представляет собой бесконечное множество.

Предлагается моделировать пространство неопределенности только в тех точках, в которых будут достигнуты граничные значения показателей эффективности системы.

Для нахождения таких точек необходимо выполнить анализ влияния значений неопределенных факторов на значения показателей эффективности.

В результате выполненного анализа установлено, что такие точки отвечают значениям $\omega = 0$ и $\omega = 1$, принимаемым для всех АЗ, установленных на объекте.

Такие варианты задания неопределенности могут быть записаны с помощью Z-мерных векторов Ω следующего вида:

$$\Omega_H = \{0, 0, \dots, 0\} \quad \Omega_B = \{1, 1, \dots, 1\}$$

Новый алгоритм моделирования в условиях неопределенности строится на основе исходного. Начиная с этапа определения соответствующих элементарных «вкладов» в показатели опасности однофункциональной СБЭ и до этапа получения соответствующего конечного показателя, расчетные действия выполняются двух «точках» пространства неопределенности, описывающихся векторами Ω_H и Ω_B .

Для СОЭБ при косвенном прикосновении это будет группа вероятностей электропоражения человека на различных участках сети с учетом связей электроустановок по нулевому защитному проводу. Для СОЭБ при прямом прикосновении это будут вероятности электропоражения человека при касании им токоведущих частей для всех электроустановок объекта, находящихся под напряжением.

Затем вычисляются границы интервалов неопределенности для каждого человека на производственном объекте. Совокупность интервалов представляется в виде вектора:

$$P(\text{ЭП})^{H,B} [ZX] = \{[P(\text{ЭП})_1^H, P(\text{ЭП})_1^B], [P(\text{ЭП})_2^H, P(\text{ЭП})_2^B], \dots, [P(\text{ЭП})_N^H, P(\text{ЭП})_N^B]\}$$

В результате моделирования получают следующие интегральные интервальные показатели:

- $[M[n_{ЭП}]^H, M[n_{ЭП}]^B]$ – интервал значений математического ожидания числа электропоражений людей на объекте за время T ;
- $[P(ЭП)_{cp}^H, P(ЭП)_{cp}^B]$ – интервал значений средней вероятности электропоражений людей на объекте за время T ;
- $[P(ЭП)_{max}^H, P(ЭП)_{max}^B]$ – интервал значений наибольшей вероятности электропоражений людей на объекте за время T .

Перейдем к технологии моделирования пожаробезопасности при интервальной неопределенности характеристик.

Как указывалось ранее, при моделировании пожаробезопасности приходится одновременно учитывать интервальную неопределенность двух видов, обусловленную использованием защитных характеристик АЗ и характеристик пережога.

На начальном этапе моделирования осуществляется расчет значений токов 1, 2 и 3-х фазного КЗ в начале и в конце каждого из участков сети. Далее устанавливается соответствие между номером участка сети и номером АЗ. Для каждого участка сети выбираются соответствующая защитная характеристика и характеристика пережога. Они порождают пространство интервально-неопределенных факторов, отнесенных к каждому участку сети.

Такое пространство имеет сложную теоретико-множественную структуру и имеет как «токовое», так и «временное» измерения.

Начальный этап алгоритма моделирования пожаробезопасности исходного алгоритма предусматривает определение пересечения двух указанных характеристик для каждого участка сети.

Наличие интервальной неопределенности характеристик приводит к появлению множества возможных точек их пересечения. Вариант такой области пересечения представлен на рисунке 3.

Проекция области пересечения на ось токов КЗ задает неопределенный интервал значений абсцисс точек пересечения характеристик ΔI .

Таким образом, формируется «вторичная» интервальная неопределенность исходных данных, выражающаяся в неопределенности интервалов, образуемых пересечениями «первичных» интервалов неопределенности.



Рисунок 3 – Вариант пересечения защитной характеристики и характеристики пережога

Интервал токов ΔI описывает зону возможных пережогов провода на участке сети. В общем случае в пределах интервала токов КЗ $[I_n, I_k]$, возможных на участке сети при различных положениях точек КЗ, имеется три характерных интервала токов: зона гарантированного пережога, зона возможного пережога и зона защиты (зона отсутствия пережога). При этом первая и третья зоны могут иметь различную упорядоченность вдоль оси токов.

С использованием исчисления предикатов [7] множество областей пересечений неопределенных значений времени пережога на s -ом участке сети и времени срабатывания аппарата защиты, отнесенного к этому участку сети, отвечающих значениям тока I , принадлежащим области пересечений характеристик на этом участке сети ΔI_s может быть описано в следующем виде:

$$\forall I \in \Delta I_s (\Delta t_{пер}(I)_s \cap \Delta t_{cp}(I)_{z(s)}).$$

На основе вычисленных граничных значений интервала ΔI определяются минимальная и максимальная длины зон пережога с учетом возможного наличия зоны гарантированного пережога и двойного проявления свойств зоны возможного пережога.

Для различных вариантов зон токов определяются границы интервала неопределенности промежуточных данных, описанные как зоны пережога.

В результате анализа различных соотношений характеристик установлены варианты сочетаний зон гарантированного пережога и возможного пережога, при которых достигается наибольшая и наименьшая пожарная

МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК С УЧЕТОМ ИНТЕРВАЛЬНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

опасность на участках сети и на объекте в целом.

На начальных этапах моделирующего алгоритма определяются границы зоны пересечения характеристик и границы зон гарантированного пережога и возможного пережога. Далее, для каждого вида КЗ осуществляется по два сеанса расчета показателей эффективности системы на каждом участке сети. Это позволяет определить интервалы индивидуальных показателей пожарной опасности на участках сети, а на их основе с помощью интервальной арифметики – интегральные интервальные показатели пожарной опасности для всего объекта.

Перейдем к методам оптимизации СБЭ при интервальной неопределенности. При постановке задачи многокритериальной оптимизации используются два частных критерия оптимальности или векторный критерий оптимальности [1,6]. На основе векторного критерия оптимальности строится скалярный аддитивный критерий оптимальности. При этом принимается положение о том, что оба частных критерия оптимальности являются равнозначными. При построении скалярного критерия выполняется операция нормирования каждого частного критерия (по Сэвиджу). Значения каждого из нормированных таким образом критериев изменяется в пределах отрезка $[0,1]$. Скалярный аддитивный критерий строится в виде суммы частных нормированных критериев.

Итак, разработка методов оптимизации СБЭ при интервальной неопределенности предусматривает решение следующих четырех задач:

1. Задача сравнения значений частных критериев оптимальности, описанных как интервальные неопределенные величины.
2. Задача выбора экстремального (минимального) интервала из множества интервалов, описывающих значения критериев эффективности на множестве вариантов системы.
3. Задача построения интервального векторного критерия оптимальности СБЭ в форме аддитивного скалярного критерия.
4. Задача, представляющая собой совокупность первой и второй задач, рассматриваемых применительно к аддитивному скалярному критерию.

При решении первой задачи примем во внимание то, что в роли интервальной неопределенной величины могут выступать либо

значения критерия оптимальности системы в аспекте электробезопасности, либо значения критерия оптимальности в аспекте пожаробезопасности. Предположим, что вычислены значения таких критериев для заданного множества вариантов СБЭ. Ставится задача сравнения неопределенных значений критерия и выбора наименьшего (или наибольшего) из них.

Для решения этой задачи используем метод, приводимый в [8,9]. Он основывается на детерминированных операциях непрерывной логики и определяет понятие сравнимости интервалов и требования, позволяющие построить алгоритм выделения экстремальных интервалов.

Поясним предлагаемый метод на условном примере. Предположим, что выполнено моделирование семи различных вариантов СБЭ. В результате этого получено семь неопределенных значений некоторого показателя эффективности системы, являющиеся одновременно и значениями критерия оптимальности системы.

Расположим полученные интервалы возможных значений критериев на числовой оси (рисунок 4). Для удобства сравнения интервалов будем строить над ними прямоугольники произвольной высоты. Пронумеруем интервалы в соответствии с принятой нумерацией вариантов СБЭ.

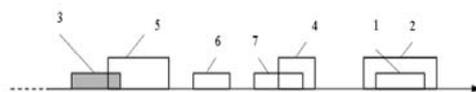


Рисунок 4 - Пример расположения интервальных значений критерия оптимальности

В общем случае интервалы могут иметь разную ширину и различное положение на числовой оси. Часть интервалов могут пересекаться.

При наличии пересечения экстремального интервала с соседним в области их пересечения могут быть такие реализации неопределенных величин, при которых точка из соседнего (условно) «правого» интервала окажется (условно) левее точки экстремального минимального интервала. В этом случае пересечение интервалов образует интервал неразличимости (толерантности) критериев.

Следует также обратить внимание на ситуацию, когда при сравнении критериев оптимальности имеется вариант такого их расположения, при котором один интервал полностью поглощается другим. В этом слу-

чае два интервала оказываются несравними, что препятствуют нахождению соответствующего экстремума.

Предлагается два способа нейтрализации этого эффекта:

1. Исследования методик использования других видов неопределенности, имеющих «дифференциацию достоверности» значений величин в пределах интервала их возможных значений. В качестве таких видов, в первую очередь, выступает нечеткая неопределенность.

2. Отсевание вариантов решения поставленной задачи, «разброс» значений критериев которых приводит к ситуации неразличимости в задаче оптимизации.

Таким образом, нами разработаны и рассмотрены методы моделирования и оптимизации СБЭ в условиях интервальной неопределенности части исходных данных.

Последующей задачей, подлежащей решению в рамках теории систем безопасности электроустановок, является задача одновременного учета при моделировании и оптимизации двух видов неопределенности исходных данных – интервальной и нечеткой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дробязко, О.Н. Оптимальные стратегии создания систем безопасности электроустановок агропромышленного комплекса [Текст] дис. ... докт. техн. наук : 05.20.02 : защищена 22.12.06 : утв. 7.09.07 / О.Н. Дробязко. – Барнаул, 2006. – 395 с.

2. Системы безопасности электроустановок зданий / О.К. Никольский, А.А. Сошников, О.Н. Дробязко, В.С. Германенко, Л.В. Тен, А.Л. Тен, Э.Ф. Аунапу, Г.Н. Москаленко. - Барнаул, 2004.-82 с. В кн. Правила устройства, эксплуатация и безопасность электроустановок. – Нормативно-технический сборник. -Барнаул,- 2004.

3. Дробязко, О.Н. Разработка методов оптимального выбора систем безопасности электроустановок с учетом неопределенности исходных данных / О.Н. Дробязко, С.Ф. Нефедов // Ползуновский вестник, -2011.-№ 4.-С.13.

4. Дробязко, О.Н. Учет неопределенности исходных данных в задачах оценки эффективности систем безопасности электроустановок /О.Н. Дробязко, С.Ф. Нефедов // Ползуновский вестник, -2009.-№ 4.-С.26.

5. Нефедов, С.Ф. Построение оптимальных систем безопасности электроустановок зданий с учетом степени неопределенности исходной информации / С.Ф. Нефедов, О.Н. Дробязко // Механизация и электрификация сельского хозяйства.-2009.- № 5.-С. 6-7.

6. Нефедов, С.Ф. Построение оптимальных систем безопасности электроустановок объектов агропромышленного комплекса в условиях неопределенности [Текст] дис. ... канд. техн. наук : 05.20.02 : защищена 22.06.12 : ... / С.Ф. Нефедов. – Барнаул, 2012. – 184 с.

7. Кузнецов, О.П. Дискретная математика для инженера / О.П. Кузнецов, Г.М. Адельсон-Вельский. - М.: «Энергия», 1980.-334 с.

8. Левин В.И. Логический подход к оптимизации при интервальной неопределенности параметров [Электронный ресурс].- Электрон. текст. дан. - Режим доступа: <http://raai.org/resurs/pepers/Kolomna2009/> Загл. с экрана.

9. Левин В.И. Интервальный подход к оптимизации в условиях неопределенности [Электронный ресурс]. - Электрон. текст. дан. – Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/56155.html> / Загл. с экрана.

Дробязко Олег Николаевич, д.т.н., проф., АлтГТУ им. И.И. Ползунова, E-mail: drolnik@list.ru
Нефёдов Сергей Федорович, к.т.н, АлтГТУ им. И.И. Ползунова, зав. лабораториями каф. ЭПБ, E-mail: nfdv@inbox.ru