УДК 628.931

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ УЛИЧНОГО ОСВЕЩЕНИЯ

Т.А. Барбасова, Е.В. Вставская, А.А. Захарова

PARAMETERS DEFINITION OF STREET LIGHTING CONTROL SYSTEM ELEMENTS OPERATION RELIABILITY

T.A. Barbasova, E.V. Vstavskaya, A.A. Zakharova

Рассматриваются вопросы нахождения параметров эксплуатационной надежности элементов систем управления уличного освещения. Представлено два варианта решения задачи: без учета ограничений и с ограничениями.

Ключевые слова: система управления, источник света, управление световым потоком, эксплуатационная надежность.

Questions about parameters definition of street lighting control system elements operate reliability. Two variants of problem solving are considered: taking into account limitation controls and without them.

Keywords: control system, light source, light steam management, operate reliability.

Введение

Многофункциональные, или сложные системы в силу динамики структуры и разнообразия выполняемых задач могут функционировать с разными уровнями качества. В таких системах появление отказов отдельных элементов приводит не к полному выходу системы из строя, а лишь к некоторому ухудшению качества функционирования и снижению эффективности системы в целом [1].

Оптимизация эксплуатационной надежности

Для оптимизации надежности СИС и СУ применяется математический аппарат теории надежности и теории оптимального управления. За критерий качества функционирования сложной АСУ принимается эффективность функционирования, характеризующая возможность выполнения сложной АСУ тех или иных частных задач. Эффективность функционирования в общем виде оценивается выражением

$$E(t) = \sum_{i=1}^{n} P(H_i) \cdot \Phi_i \,. \qquad (1)$$

Каждое состояние H_i СИС характеризуется выходным эффектом Φ_i, вероятность нахождения изделия в этом состоянии измеряется величиной $P(H_i)$. Величины Φ_i и H_i независимы.

Задача оценки количественных характеристик надежности и эффективности носит существенно вероятностный характер, поэтому приемлемым методом исследования является метод статистических исследований (например, метод Монте-Карло). Сущность последнего состоит в моделировании случайного процесса путем выбора по жребию отдельных реализаций процесса.

Для определения выходных эффектов Φ_i наиболее целесообразна экспериментальная проверка функционирования изделий, во время которой исследуется влияние отказов отдельных элементов изделия на его выходной эффект.

Задача исследования эффективности функционирования СИС в процессе разработки сводится к оптимальному проектированию, осуществляемому с позиции теории оптимального управления [2–5]. В этом случае эффективность функционирования (1) принимается за критерий оптималь-

Вставская Елена Владимировна – канд. техн. наук, доцент кафедры автоматики и управления, Южно-Уральский государственный университет; lena@ait.susu.ru

Барбасова Татьяна Александровна – канд. техн. наук, доцент кафедры автоматики и управления, Южно-Уральский государственный университет; barbasow@mail.ru

Захарова Александра Александровна – магистрант кафедры автоматики и управления, Южно-Уральский государственный университет; al_ekca@mail.ru

Vstavskaya Elena Vladimirovna – PhD, assistant professor of the Automation and control department of South Ural State University; lena@ait.susu.ru

Barbasova Tatiana Alexandrovna – PhD, assistant professor of the Automation and control department of South Ural State University; barbasow@mail.ru

Zakharova Alexandra Alexandrovna – undergraduate of the Automation and control department of South Ural State University; al_ekca@mail.ru

ности (целевая функция), а функциями ограничения являются заданные надежностные свойства и технические параметры.

Перебор всех возможных состояний с определением их вероятностей меры $P(H_i)$ возможен путем математического моделирования, которое заключается в вычислении вероятностных характеристик надежности и эффективности по математическим зависимостям, устанавливаемым при аналитических исследованиях [6].

Предположим, что АСУ состоит из $n=18$ изделий (каждый светодиодный источник света состоит из следующих изделий: 2 источника питания, 2 блока управления, матрицы светодиодов и радиатора), то общее число состояний H_i двухпозиционной математической модели равно 2^n.

Для уменьшения объема вычислений необходимо при решении задачи оптимизации, разбить АСУ на N узлов ($N<n$). Каждый узел будем рассматривать как совокупность 6 изделий, входящих в состав светодиодного источника света, каждый из которых состоит их R улучшенных изделий ($R=6$ шт.).

Вероятность безотказной работы такого узла вычисляется как

$$P_j\left(x_j\right)=\prod_{g=1}^{R}\left[1-\left(1-P_{ig}\right)^{x_{ig}}\right], \tag{2}$$

где P_{ig} – вероятность безотказной работы i-х устройств системы, соединенных в g-й узел ($g=1\div R$); x_{ig} – степень улучшения, резервирования i-го изделия g-го узла.

Каждое m-е состояние системы характеризуется вероятностью пребывания изделия в этом состоянии:

$$P_m=\prod_{g=1}^{N}\left[a_{jm}P_j+\left(1-a_{jm}\right)\left(1-P_j\right)\right], \tag{3}$$

где a_{jm} – состояние j-го узла в m-м состоянии системы ($a_{jm}=0\ldots1$).

Необходимо отметить, что данное уравнение записано в предположении, что отказы узлов, определяющих состояние АСУ, являются независимыми, случайными событиями.

Эффективность функционирования определяем по формуле

$$E(t)=\sum_{\eta=1}^{\rho}\sum_{m=1}^{2^N}P_\eta P_m\Phi_m\ . \tag{4}$$

Таким образом, задача оптимизации структуры сложной АСУ по критерию эффективности функционирования сводится к m-мерной задаче динамического планирования с линейными ограничениями по стоимости системы.

Математическая модель задачи оптимизации структуры сложной АСУ формализуется следующим образом:

$$\left.\begin{aligned}&E\Leftrightarrow E=\sum_{\eta=1}^{\rho}\sum_{m=1}^{2^N}P_\eta P_m\Phi_m\Rightarrow\max;\\&C^{(0)}\ge\sum_{i=1}^{n}c_ix_i=\sum_{j=1}^{N}c_ix_i;\\&\left(\eta=\overrightarrow{1,\rho};m=\overrightarrow{1,2^N};i=\overrightarrow{1,n};j=\overrightarrow{1,N}\right).\end{aligned}\right\} \tag{5}$$

Из рассмотрения модели следует:

1) целевая и штрафная функции непрерывны, унимодальны и дифференцируемы, что подтверждается способом повышения эффективности функционирования и стоимости АСУ – пассивным резервированием и видом выражений, входящих в штрафную функцию;

2) независимые переменные $\{x_i\}$ – показатели кратности резервирования – однозначны в обеих функциях;

3) для переменных $\{x_i\}$ нижняя граница $\left\{x_{i\_\text{огр}}^{\min}=1\right\}$ очевидна, верхняя граница $\left\{x_i^{\max}=2\right\}$ задается из условий разумного удорожания системы при ее резервировании.

Поскольку целевая функция унимодальная и дифференцируемая, то для отыскания экстремума может быть применен метод наискорейшего спуска с постоянным шагом движения по направлению градиента, на котором приращение целевой функции будет максимальным:

$$\Delta E=\sum_{i=1}^{n}\frac{\partial E}{\partial x_i}\Delta x_i\Rightarrow\max\ ,$$

где Δx_i – приращение переменных.

Нахождение максимума целевой функции осуществлялось несколькими методами.

При использовании метода градиентного спуска с постоянным шагом выбирали начальную точку $\overline{x^0}$ из области определения функции $f=E(\overline{x})$.

Координаты новой точки вычисляли по формуле

$$\overline{x^{k+1}}=\overline{x^k}-h_k\nabla f(\overline{x^k})\ ,$$

где k – номер итерации $k=0,\ 1,\ \ldots;$ h_k – величина шага; $\nabla f(\overline{x^k})$ – градиент функции $f(\overline{x})$ в точке x^k,

$$\nabla f(\overline{x^k})=\left(\frac{\partial f(\overline{x^k})}{\partial x_2},\frac{\partial f(\overline{x^k})}{\partial x_3},\ldots,\frac{\partial f(\overline{x^k})}{\partial x_n}\right).$$

Начальная величина шага h_0 принята равной 0,1. Точность поиска ε приняли в размере 0,0001.

Проверка условия окончания поиска заключается в нахождении близости к нулю нормы градиента:

$$\left\|\nabla f(\overline{x^k})\right\|\le\varepsilon\ .$$

Для определения координат вектора градиента $\nabla f(\overline{x^k})$ использовалась разностная формула

$$\frac{\partial f(\overline{x^k})}{\partial x_1} \approx$$
$$\approx \frac{f(x_1^k, x_2^k, \ldots, x_i^k + \Delta x_i^k, \ldots, x_n^k) - f(x_1^k, x_2^k, \ldots, x_i^k, \ldots, x_n^k)}{\Delta x}.$$

Относительный шаг дифференцирования принят равным $\Delta x_i^k = 0{,}0001$.

Полученные коэффициенты приводят к удорожанию системы автоматического регулирования системой уличного освещения почти в 2 раза.

С использованием метода неопределенных множителей Лагранжа при решении задачи нахождения максимума целевой функции учитываются ограничения на удорожание элементов системы автоматического регулирования системы уличного освещения.

Экстремум целевой функции лежит на плоскости ограничения, поэтому как выбор начальной точки движения x_0, так и самодвижение по градиенту целесообразнее всего в условиях данной задачи осуществлять в плоскости ограничения. Таким образом, на движение по градиенту, точнее на приращение переменных $\{\Delta x_i\}$, в рассматриваемой задаче накладываются следующие ограничения:

$$\left.\begin{aligned} &\sum_{i=1}^{n} c_i \Delta x_i = 0; \\ &\sum_{i=1}^{n} (\Delta x_i)^2 = L^2. \end{aligned}\right\} \qquad (6)$$

Первое ограничение в системе (6) определяет условие движения в плоскости ограничения, второе – заданную длину вектора приращений, обеспечивающую нахождение в границах плоскости ограничений.

Для нахождения приращения независимых переменных $\{\Delta x_i\}$ целесообразно использовать метод неопределенных множителей Лагранжа, согласно которому предварительно составляется вспомогательная функция

$$F(\Delta x_i) = \left(\sum_{i=1}^{n} \frac{\partial E}{\partial x_i} \Delta x_i\right) - \lambda_1 \left[\sum_{i=1}^{n} (\Delta x_i)^2 - L^2\right] -$$
$$-\lambda_2 \sum_{i=1}^{n} c_i (\Delta x_i),$$

где второй член является формальной функцией связи, а λ_1 и λ_2 – неопределенные множители Лагранжа. Затем составляется система уравнений для нахождения неизвестных:

$$\frac{\partial F(\Delta x_i)}{\partial(\Delta x_i)} = \frac{\partial E}{\partial x_i} - 2\lambda_1(\Delta x_i) - \lambda_2 c_i (i = \overrightarrow{1,n}). \qquad (7)$$

Умножая каждое из уравнений системы (7) на c_i и суммируя все уравнения, получаем с учетом первого ограничения из системы (6) следующее выражение для второго множителя Лагранжа:

$$\lambda_2 = \left(\sum_{i=1}^{n} c_i^2\right)^{-1} \sum_{i=1}^{n} c_i \frac{\partial E}{\partial x_i}.$$

Перенося в каждом из уравнений системы (7) $2\lambda_1(\Delta x_i)$ в левую часть, возводя в квадрат обе части и суммируя все уравнения, получаем с учетом второго ограничения из системы (6) следующее выражение для первого множителя Лагранжа:

$$\lambda_1 = \frac{1}{2L}\left[\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial E}{\partial x_i} - \lambda_2 c_i\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}.$$

Из системы уравнений (7) получаем также

$$\Delta x_i = \frac{1}{2\lambda_1}\left(\frac{\partial E}{\partial x_i} - \lambda_2 c_i\right) =$$
$$= L\left(\frac{\partial E}{\partial x_i} - \lambda_2 c_i\right)\left[\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial E}{\partial x_i} - \lambda_2 c_i\right)^2\right]^{-\frac{1}{2}} (i = \overrightarrow{1,n}). \quad (8)$$

Система уравнений (8) позволяет определить приращения независимых переменных $\{\Delta x_i\}$ для движения по градиенту в плоскости ограничения. Значение длины L вектора приращений градиента E в системе (8), при котором $E \to \max$, определяется с помощью правила «золотого сечения».

На первом этапе вводим в ЭВМ исходную информацию. Информация о количестве переменных n, количестве узлов N, числе информационных каналов G, ограничивающей общей стоимости $C^{(0)}$ и точности определения вектора приращений $\varepsilon = 0{,}01$ вводится в виде чисел. Информация о выходных эффектах работоспособных каналов Φ_m, стоимости изделий (ПСУ и СА) c_i и узлов $C_j = \sum c_i$, вероятностях безотказной работы узлов $\{p_j(x_j)\}$, матрица изделий (ПСУ и СА) AX и матрица каналов AK вводятся в виде массивов.

Далее происходит выбор начальной точки:

$$X_0 \Leftrightarrow \{x_{0i}\}.$$

Затем осуществлено движение вдоль поверхности ограничения $C \Leftrightarrow \sum_{i=1}^{n} c_i x_i \le C^{(0)}$ методом наискорейшего спуска.

Улучшения и резервирование ведут к удорожанию пропорционально кратности произведенных улучшениям:

$$C(x_i) = c_i x_i,$$

где c_i – стоимость нерезервированных ПСУ и СА в l-м канале.

Поэтому естественно в качестве функции штрафа для решения задачи оптимизации структуры сложной АСУ использовать выражение

$$C \Leftrightarrow \sum_{i=1}^{n} c_i x_i \le C^{(0)},$$

где $C^{(0)}$ – допустимая стоимость улучшения АСУ, являющаяся плоскостью ограничения штрафной функции.

Определяем переменные, для которых $\Delta x_i = 0$, т. е. переменные, не получающие приращения. Допустимое значение длины вектора приращений

$$L = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (\Delta x_i)^2},$$

т. е. такое значение L, при котором вектор, соответствующий направлению наискорейшего спуска, не выходит за пределы фазового пространства $x_{0n} < 1 \vee x_{0n} > 2$. Это значение определяется как оптимальное из всех значений длин L_i, найденных по переменным $\{\Delta x_i\}$, для которых $\Delta x_i \ne 0$. Затем определяем поиск экстремума целевой функции в локальной области по правилу «золотого сечения», ибо в области локального экстремума возможен одномерный оптимальный поиск, что ускоряет решение задачи оптимизации. Делим отрезок $AB = (0, L_{\min})$ с помощью правила «золотого сечения» на отрезки L_1 и L_2, определяет соответствующие значения переменных x_{1i} и x_{2i} и функции E_1 и E_2, вычисленные в точках x_{1i} и x_{2i}.

Логически сравниваем значения функций E_1 и E_2. Если $E_2 > E_1$, то отбрасывается отрезок, лежащий левее точки L_1, и в качестве крайней левой точки отрезка, на котором разыскивается максимум функции E, берется значение $A = L_1$. Если $E_2 < E_1$, то отбрасывается отрезок, лежащий правее точки B, и принимается $B = L_2$. Процедура продолжается до тех пор, пока уменьшающийся отрезок AB не станет меньше заданной величины ε.

После этого окончательное значение длины L вектора градиента определяется как середина отрезка AB и находится вектор $X_{2i} \Leftrightarrow \{x_{2i}\}$, соответствующий этому значению L.

Если $L > \varepsilon$, то производится дальнейшее движение по градиенту функции E в плоскости ограничения. Если $L < \varepsilon$, то предполагается, что точка локального максимума целевой функции достигнута. Поэтому вычисляем целевую функцию в найденной точке и выводим на печать значения $E_{\max}$ и $\{x_{i\_\text{опт}}\}$.

Программа оптимизации структуры сложной АСУ по критерию эффективности функционирования при ограничении по стоимости реализована на языке C++Builder.

Полученные коэффициенты приводят к удорожанию изделий системы автоматического регулирования системы уличного освещения: источников питания в 1,5189 раза, блоков регулирования в 1,015 раза, светодиодной матрицы в 1,505 раза, радиатора в 2,01 раза.

Следовательно, возможно увеличивать в используемых в системе автоматизации светодиодных источников света массу радиатора в 2 раза и усовершенствовать импульсные источники питания путем замены конденсаторов на более надежные с удорожанием источника в 1,589 раза [5].

Заключение

Аналитические методы и методы вычислительного моделирования, применяемые для расчета и анализа показателей надежности элементов и системы автоматизации, могут быть применены для установления эффективности функционирования сложных АСУ. Данная методика рекомендуется к применению в реальных автоматизированных системах управления наружным освещением.

Литература

1. *Надежность технических систем: справ. / под ред. И.А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985. – 608 с.*
2. *Выбор оптимального режима работы светодиодных излучателей / В.И. Константинов, Е.В. Вставская, Т.А. Барбасова, В.О. Волков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2010. – Вып. 11, № 2(178). – С. 46–51.*
3. *Проектирование светодиодных источников света по максимуму функционального резерва при ограничении на весогабаритные характеристики / Л.С. Казаринов, Е.В. Вставская, В.И. Константинов, Т.А. Барбасова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2011. – Вып. 13, № 2(219). – С. 74–81.*
4. *Автоматизированные системы управления энергоэффективным освещением: моногр. / Л.С. Казаринов, Д.А. Шнайдер, Т.А. Барбасова и др.; под ред. Л.С. Казаринова. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ: Издатель Т. Лурье, 2011. – 208 с., ил.*
5. *Управление режимами работы светодиодных светильников с передачей информации по питающей сети / Е.В. Вставская, В.И. Константинов, Т.А. Барбасова, Е.В. Костарев // Физика и технические приложения волновых процессов: Материалы IX Междунар. науч.-техн. конф. 13–17 сентября 2010. – Челябинск: Челябинский государственный университет, 2010.*
6. *Буловский, П.И. Надежность приборов систем управления / П.И. Буловский, М.Г. Зайденберг: справ. пособие. – Л.: Машиностроение, 1975. – 328 с.*

Поступила в редакцию 18 мая 2011 г.