Методы управления восстановлением поврежденных элементов сетей связи в условиях многократных разрушающих воздействий

Е. Н. Хохлачёв, доктор технических наук, профессор, г. Москва
В. В. Митропов, кандидат военных наук, доцент, г. Москва
К. Р. Станчев, г. Москва

Опыт эксплуатации сетей связи последних лет показывает, что они часто подвергаются разрушающим воздействиям различного характера. Это и природные воздействия техногенного характера и противоправные действия (вандализм) с целью хищения элементов аппаратуры или драгоценных металлов. Вполне понятно, что это в первую очередь влияет на их устойчивость. Известные задачи, посвященные восстановлению сетей связи, больше частью ориентированы на планирование и организацию восстановительных работ, как правило, после однократного разрушающего воздействия. Кроме этого, в опубликованных работах [1, 2] недостаточно полно отражены вопросы научного обоснования оптимальных процессов управления восстановлением, когда необходимо неоднократно оперативно корректировать ранее принятые решения и планы с учетом изменяющейся обстановки. Для формальной постановки задачи, направленной на разрешение этих вопросов, будем использовать адекватную модель управляемого процесса восстановления сети связи.

Решаемая задача может быть сформулирована следующим образом.

Определены исходные данные d = {N, Г, Z_0, k, $T_п$, V}, включающие:

- число N объектов управления;
- модель Г (графическая, матричная или аналитическая) сети связи, с помощью которой можно определять:
  1) наличие или отсутствие хотя бы одного пути связи между лицом, принимающим решение (ЛПР), и объектом управления при восстановлении или повреждении элементов сети связи;
  2) значения коэффициентов важности W_r восстанавливаемых элементов сети связи в зависимости от формируемого плана восстановления [2];
- исходное состояние сети связи Z_0, при котором все элементы сети связи не повреждены и выполняют свои функции, т.е. $Z_0 = \{z_{0j} = 1\}$, j = 1, 2, …, m; где z_{0j} – состояние элемента j в исходном состоянии сети; m – общее число элементов; $z_{0j} = 1$, если элемент j не поврежден, $z_{0j} = 0$ – в противном случае; число расчетов восстановления k, способных выполнять работы на всех поврежденных элементах сети связи; матрица времен перемещения $T_п = \|\tau_{ij}\|$ расчетов восстановления из исходного положения (i = 0) и от i–го элемента к j–му; i, j = 0, 1, 2, …, m; возможности системы восстановления $V = \{V_i\}$, $V_i = \{ Z_i, J_i, T_{вi}, u_i\}$, позволяющие:
  - производить оценку состояния сети связи Z_i после каждого воздействия в момент t_i и определять множество поврежденных элементов J_i, i = 1, 2,…, n, где n – число воздействий;
  - определять время выполнения восстановительных работ на поврежденных элементах $T_{вi} = \{\tau_{вj}\}_i$, $j \in J_i$;
  - разрабатывать план восстановления поврежденных элементов $u = \{u_i, i = 1, 2,…, n\}$, включающий частные планы $u_i = \{J_{ir}, \tau_{ir}\}$, r = 1, 2, …, s_i, формируемые после каждого воздействия, где J_{ir} - упорядоченное множество индексов поврежденных элементов, $J_{ir} \in J_i$; τ_{ir} - моменты времени их восстановления; s_i – число поврежденных элементов после i–го воздействия;
  - управлять процессом восстановления поврежденных элементов путем реализации управляющих воздействий u_i, соответствующих выбранному частному плану.

Требуется разработать такой план восстановления $u^* = \{u_1^*, u_2^*,…, u_n^*\}$ и реализовать соответствующие ему управляющие воздействия, при которых среднее число управляемых объектов на всем интервале эксплуатации (либо отдельно выбранном отрезке времени) будет максимальным, т.е.

$$n_{cp}(u^*) = \max_{u \subset U} [1/T \int_0^T n(t, u)dt]. \qquad (1)$$

Соотношение (1) преобразуется в следующий критерий:

$$g(u_1^*, u_2^*,\dots u_n^*) = \max_{ui \subset Ui} \sum_{i=1}^{n} \int_{ti}^{ti+1} n(t, u_i)dt = \max_{ui \subset Ui} \sum_{i=1}^{n} S_i(u_i), \qquad (2)$$

т.е. задача сводится к максимизации соответствующей суммы частных площадей $S_i(u_i)$ фигур, ограниченных сверху кривыми $n(t, u_i)$ и границами интервалов (t_i, t_{i+1}). Принимаем, что $t_1 = 0$ и $t_{n+1} = T$, а после последнего воздействия в момент t_n завершается полное восстановление сети и число управляемых объектов достигает первоначального значения N (рис. 1).

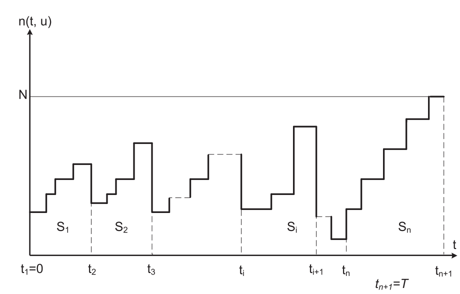

Рис. 1. Процесс изменения числа управляемых объектов

Для обоснования метода решения поставленной задачи выделим произвольный интервал (t_i, t_{i+1}), рассмотрим полный процесс восстановления всех поврежденных элементов сети связи после воздействия в момент t_i и определим момент времени T_i, заведомо больший конечного времени восстановления для любого частного плана u_i (рис. 2). При этом момент завершения полного процесса восстановления может превышать момент t_{i+1} следующего разрушающего воздействия.

1. Существует конечное множество вариантов плана восстановления $u_i \in \{u_{i1}, u_{i2}, …, u_{iv}…, u_{ik}\}$ для заданного множества поврежденных элементов сети связи J_i при любом i–м разрушающем воздействии. Действительно, так как

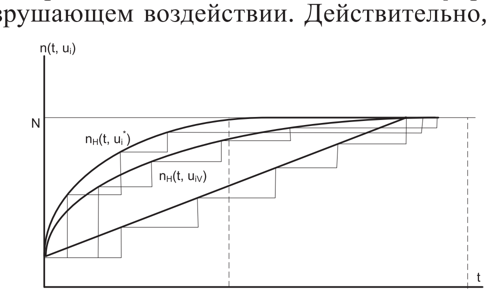

Рис. 2. Полный процесс восстановления после воздействия в момент t_i

множество поврежденных элементов всегда конечно, то каждый вариант плана будет определяться соответствующей перестановкой данных элементов. Число таких перестановок в предельном случае $k = s_i!$.

Примем следующие условия:

2. Каждый v-й вариант плана характеризуется ступенчатой функцией $y = n(t, u_{iv})$, определяющей приращение числа управляемых объектов после восстановления соответствующего элемента сети связи.

3. Существует оптимальный план u_i^*, выбираемый из множества вариантов и характеризуемый максимальным значением среднего числа управляемых объектов на интервале (t_i, T_i), где $T_i > \tau_{isi}$ для любого i, т.е.

$$\mathbf{n_{cp}(u_i^*) = \max_{ui} [(1 / (T_i - t_i) \int_{ti}^{Ti} n(t, u_i)dt].} \qquad (3)$$

4. Оптимальному плану u_i^* соответствует максимальное значение площади $S(u_i^*)$, ограниченной сверху кривой $n(t, u_i^*)$. Действительно, т.к. величина $1/(T_i - t_i)$ не зависит от u_i, то оптимальный план может быть получен из условия:

$$\mathbf{S(u_i^*) = \max_{ui} \int_{ti}^{Ti} n(t, u_i)dt = \max_{ui} S(u_i).} \qquad (4)$$

5. Все ступенчатые функции $y = n(t, u_{iv})$ аппроксимируются непрерывными монотонно возрастающими функциями $y_н = n_н(t, u_{iv})$, при этом $n_н(t, u_i^*) \geq n_н(t, u_{iv})$ для всех $t \in (t_i, T_i)$ и существуют моменты t, где неравенство является строгим. Оптимальный план также удовлетворяет соотношение:

$$\mathbf{S_н(u_i^*) = \max_{ui} \int_{ti}^{Ti} n_н(t, u_i)dt = \max_{ui} S_н(u_i).} \qquad (5)$$

Данное условие является допущением, однако при формировании оптимального плана, с целью максимизации площади $S_н(u)$, всегда добиваются, чтобы для всех точек $t \in (t_i, T_i)$ значение функции $y_н = n_н(t, u_i^*)$ превышало значения остальных функций $y_н = n_н(t, u_{iv})$, соответствующих неоптимальным планам.

Из перечисленных условий вытекает следующая теорема.

Теорема. Если для функций $y_н = n_н(t, u_{iv})$, определяющих формируемые планы восстановления u_{iv}, на интервале (t_i, T_i), выполняется условие $n_н(t, u_i^*) \geq n_н(t, u_{iv})$, $t \in (t_i, T_i)$, u_i^* — оптимальный план, и существуют $t \in (t_i, T_i)$, где данное неравенство является строгим, то для любых $t_{i+1} \in (t_i, T_i)$, $i = 1, 2, \dots, n$; $t_1 = 0$, $t_{n+1} = T$,

$$\mathbf{= \int_{ti}^{ti+1} n(t, u_i^*)dt, \;\; S_i(u_{iv}) = \int_{ti}^{ti+1} n(t, u_{iv})dt,} \qquad (6)$$

и хотя бы одно из неравенств является строгим.

Доказательство теоремы основано на известном свойстве определенных интегралов: если интегрируемая функция первого интеграла превышает интегрируемую функцию второго интеграла на всем интервале интегрирования, то первый интеграл превышает второй [3].

Таким образом, пусть после любого разрушающего воздействия в момент t_i сформирован оптимальный план u_i^*, учитывающий как поврежденные элементы после этого воздействия, так и еще не восстановленные элементы после предыдущих воздействий в моменты $t_1, t_2, \dots, t_{i-1}$ (возможно с учетом времени их остаточного восстановления). Следующее воздействие в момент t_{i+1} произведено до окончания времени реализации этого плана. Однако отрезок графика восстановления $n(t, u_i^*)$ на интервале (t_i, t_{i+1}) также будет соответствовать оптимальному плану u_i^*, обеспечивать максимальное значение площади $S_i(u_i)$ и максимальное значение среднего числа управляемых объектов на этом интервале.

На основании теоремы и данного утверждения разработан алгоритм решения поставленной задачи. Обобщенная блок – схема алгоритма (рис. 3) включает в себя следующие основные:

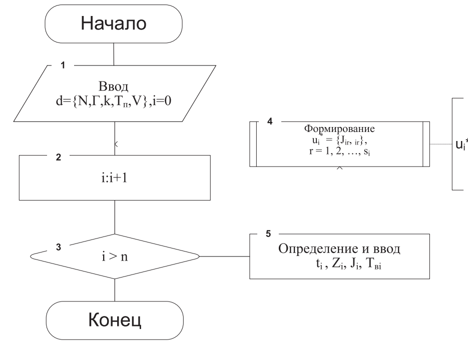

Рис. 3. Обобщенная блок-схема алгоритма формирования планов восстановления

Блоки: блок 1 вводит исходные данные, соответствующие решаемой задаче, и определяет начальные условия; блок 2 осуществляет переход к формированию плана после следующего воздействия противника и является счетчиком; блок 3 проверяет условие сходимости алгоритма за случайное, но конечное число итераций n; блок 4 определяет последствия разрушающего воздействия в момент t_i и вводит данные для формирования плана u_i^*; блок 5 является подпрограммой, реализующей известные алгоритмы формирования оптимальных планов u_i^* после однократных воздействия [1, 2]. Получаемый план u_i^* выводится на печать в форме графиков и таблиц и используется для восстановления сети связи после разрушающего воздействия в момент t_i.

Алгоритм реализован в виде программного кода экспертной системы и прошел экспериментальную проверку с использованием возможных сценариев длительного разрушающего воздействия техногенного характера, так и действий “вандалов”. Время формирования каждого плана u_i^* с учетом ввода исходных данных менее пяти минут. При этом, если число поврежденных элементов не более 10, то задача решается методом полного перебора вариантов плана и обеспечивает точное решение. При превышении этого числа используется метод усеченного перебора.

Литература

1. Хохлачев Е.Н. Теоретические основы управления. Часть 2. Анализ и синтез систем управления. –М: МО РФ, 1996.
2. Москвитин Г.И., Хохлачев Е.Н. Методические основы оценки качества и эффективности процессов управления системой и войсками связи. –М: МО РФ, 2003.
3. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. – М.: Наука, 1984.