2010. №4. С.23-32.

3. *Грищенко М.А., Николайчук О.А., Юрин А.Ю.* Метод создания продукционных экспертных систем на основе модельно-управляемого подхода // Четырнадцатая национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием (КИИ-2014), 24-27 сентября 2014 г., г. Казань, Россия: Труды конференции. Т.3. – Казань: РИЦ «Школа», 2014. С.100-108.

4. *Кузнецов М.Б.* Трансформация UML-моделей и ее использование в технологии MDA // Программирование. 2007. Вып. 33. С. 44-53.

5. *De Miguel M., Jourdan J., Salicki S.* Practical experiences in the application of MDA // LNCS. 2002. Vol. 2460. P. 128-139.

Software tool for development of rule-based expert systems on the basis of MDA

Maksim Andreevich Grishenko*, programmer*

Olga Anatolievna Nikolaychuk*, Dr.Sc. Senior Reseacher*

Aleksandr Innokentievich Pavlov*, Ph.D. Senior Reseacher*

Aleksandr Yurievich Yurin*, Ph.D. Head of Laboratory*

The paper describes the architecture and functions of the software tool for development of rule-based expert systems on the basis of a model-driven approach, in particular the MDA (Model Driven Architecture) methodology. The main components and stages of the technology are considered. The results of modeling and model transformations are presented.

Keywords – Rule-based expert systems, Model Driven Architecture, ontology, software tool, automation of scientific researches.

УДК 630.43

ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ЛИКВИДАЦИИ ПРИРОДНОГО ПОЖАРА

Георгий Алексеевич Доррер*, заведующий кафедрой системотехники*

Тел.: 89135341066, e-mail: g_a_dorrer@mail.ru

Сибирский государственный технологический университет

http://www.sibgtu.ru

Предложена простая модель динамики природного пожара, позволяющая решать ряд задач синтеза систем управления этим процессом.

Ключевые слова: Природный пожар, управление, оптимальный состав противопожарных сил и средств.

Введение

Г.А. Доррер

Задача оптимального использования сил и средств для ликвидации природных пожаров рассматривалась в работах G.M. Parks [1] и M. Parlar, R.G. Vicson [2]. На основе принципа максимума Понтрягина были получены выражения для оптимального закона управления противопожарными силами при постоянной скорости фронта пожара. При этом управление осуществляется в разомкнутом режиме, без учета фактического состояния системы. Не учитываются также возможные помехи и неполнота информации об объекте управления.

Таким образом, существует проблема разработки методов оптимального управления процессом борьбы с природными пожарами на основе современных методов теории управления. Известно, что с точки зрения этой теории природный пожар представляет собой объект с распределенными параметрами, а процесс борьбы с ним описывается как локализационное управление [3], что не позволяет формулировать задачи управления в терминах современной теории.

Если же в качестве единственной фазовой переменной системы рассматривать площадь пожара, то это позволяет решать задачи оптимального управления противопожарными силами и средствами. В настоящей работе проводится исследование указанной модели, что является первым этапом построения более общей теории.

1. Модель динамики природного пожара и управляющих воздействий

Исходной является модель изменения площади крупного природного пожара во времени [4]:

$$S(t) = k(t) \cdot t^{\alpha}, \tag{1}$$

где $t \in [0, T]$ – время – *сутки или часы,*

при этом $t = 0$ – время возникновения пожара, T – время ликвидации пожара,

$S(t)$ – площадь, пройденная пожаром к моменту t, *га*,

$k(t)$ - коэффициент, имеющий размерность *га/сутки*$^{\alpha}$

α – параметр, определяющий скорость возрастания площади. С этим параметром связано изменение скорости движения фронта пожара: при α =2 эта скорость постоянна, при α <2 скорость фронта со временем уменьшается, при α >2 скорость фронта возрастает.

Борьба с пожаром начинается в момент $t_1 > 0$, при этом противопожарные меры приводят к уменьшению параметра $k(t)$ до того момента, когда площадь пожара перестанет увеличиваться, при этом производная $\dot{S}(t)$ в момент $t_л$ становится равной нулю, что соответствует локализации пожара. При этом выражение для площади принимает вид

$$S(t) = \begin{cases} k_0 t^{\alpha}, t \le t_1, \\ k_0 t_1^{\alpha} + \int\limits_{t_1}^{t} \dot{S}(\tau) d\tau, t_1 \le t \le t_л. \end{cases} \tag{2}$$

Из (1) следует, что скорость увеличения площади при $t \ge t_1$ равна

$$\dot{S}(t) = \alpha k(t) t^{\alpha - 1} + \dot{k}(t) t^{\alpha} = \frac{\alpha}{t} S(t) + \dot{k}(t) t^{\alpha}, \quad t \ge t_1, \ k(0) = k_0 \tag{3}$$

Также видно, что управляющим воздействием в данной модели является производная $\dot{k}(t)$, т.е. скорость изменения коэффициента $k(t)$.

В рассмотренных ниже задачах изменен отсчет времени t, он начинается с момента начала ликвидации пожара t_1, т.е. время фактически равно $t + t_1$.

Сформулируем теперь задачу ликвидации природного пожара в терминах теории управления. Общепринятая модель управляемой системы в данном случае имеет вид

$$\dot{x}(t) = A(t) x(t) + t^{\alpha} B(t) u(t). \tag{4}$$

При этом, как следует из уравнения (3), фазовая переменная $x(t) = S(t)$,

Начальные условия для системы (4) имеют вид: при $t = 0$ $x(0) = k t_1^{\alpha}$.

Рассмотрим остальные компоненты системы (4), соответствующие исходной системе (3).

$$A(t) = \alpha(t + t_1)^{-1}, \tag{5}$$

$$B(t)u(t) = \dot{k}(t). \tag{6}$$

Представим управляющие воздействия по тушению пожара в виде вектора

$$u(t) = \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ u_3(t) \end{bmatrix}, \qquad \text{где} \tag{7}$$

$u_1(t)$ – количество сил, воздействующих на пожар ручными средствами,

$u_2(t)$ – количество сил, воздействующих на пожар механизированными средствами,

$u_3(t)$ – количество сил, воздействующих на пожар авиационными средствами.

Интенсивность воздействия на пожар каждого из видов сил и средств задается вектором $B(t) = \lfloor b_1 \quad b_2 \quad b_3 \rfloor$, компоненты которого определяют величину снижения прироста площади пожара на единицу соответствующих сил и средств в единицу времени.

В дальнейшем будем считать, что $x(t)$ – это площадь пожара, рассчитанная по модели. Кроме того, понадобится переменная $y(t)$, которой будет обозначаться фактически наблюдаемая площадь пожара.

Рассмотрим теперь различные постановки задачи оптимального управления силами и средствами при тушении пожара.

2. Задача оптимального быстродействия при разомкнутом управлении и отсутствии помех

Особенность рассмотренной ниже постановки состоит в том, что задача решается аналитически, она позволяет оценить время локализации пожара при максимальном использовании имеющихся ресурсов. Однако в задаче не учитываются затраты на управление, ущерб, нанесенный пожаром и планируемое время локализации пожара.

Рассмотрим задачу оптимального быстродействия для рассмотренной выше системы (4), (5) при ограничениях на величины управляющих воздействий:

$$|u_i(t)| \le M_i \quad i = 1,2,3, \tag{8}$$

где M_i – максимально допустимые значения управляющих воздействий. Составим функцию Гамильтона для системы (4):

$$H(p,x,u) = p(t)(A(t)x(t) + t^{\alpha} B(t)u(t)). \tag{9}$$

Сопряженная переменная $p(t)$ с учетом (4), (5) определяется уравнением

$$\dot{p}(t) = -\frac{\partial H}{\partial x} = -p(t)(\alpha(t+t_1)^{-1}), \; p(0) = p_0 < 0, \tag{10}$$

и его решение имеет вид

$$p(t) = p_0 \left(\frac{t_1}{t + t_1} \right)^{\alpha} < 0 \quad .$$

Следовательно, для достижения максимума функции (9) необходимо выбрать максимально возможные значения управления: $u_i(t) = -M_i, i = 1,2,3.$ При этом суммарное управляющее воздействие будет равно $B(t)u(t) = \dot{k} = \sum_{i=1}^{3} b_i(-M_i) = -U.$

На основе уравнения (6) определим значение параметра $k(t).$ Имеем

$$k(t) = k_0 - U \cdot t. \qquad (11)$$

Из уравнения (3) с учетом (11) получаем выражение для скорости прироста площади пожара

$$\dot{S}(t) = \alpha(k_0 - U \cdot t)t^{\alpha-1} - U \cdot t^{\alpha} \qquad (12)$$

Теперь определим время локализации $t_л$, когда $\dot{S}(t_л) = 0.$

Решая уравнение

$$\alpha(k_0 - U \cdot t)t^{\alpha-1} - U \cdot t^{\alpha} = 0,$$

получим время, за которое локализован пожар:

$$t_л = \frac{\alpha k_0}{(\alpha+1)\cdot U}, \qquad (13)$$

а с учетом времени свободного распространения t_1 общее время существования пожара будет равно:

$$t_2 = t_1 + t_л = t_1 + \frac{\alpha k_0}{(\alpha+1)\cdot U}.$$

Можно подсчитать площадь пожара после начала локализации. Интегрируя выражение (12) на интервале от 0 до $t_л$, получим

$$S(t_л) = \int_0^{t_л} \dot{S}(\tau)d\tau = k_0 t_л^{\alpha} - U \cdot t_л^{\alpha+1} = (k_0 - U \cdot t_л)\cdot t_л^{\alpha} = \frac{k_0}{\alpha+1} t_л^{\alpha}$$

а общая площадь, пройденная огнем, равна

$$S(t_2) = S(t_1) + S(t_л) = k_0 t_1^{\alpha} + \frac{k_0}{\alpha+1} t_л^{\alpha} = k_0(t_1^{\alpha} + \frac{1}{\alpha+1} t_л^{\alpha}). \qquad (14)$$

Площадь леса, сохраненная при локализации пожара, равна

$$\Delta S(t_2) = k_0 t_2^{\alpha} - S(t_2) = k_0(t_2^{\alpha} - t_1^{\alpha} - \frac{1}{\alpha+1}\cdot t_л^{\alpha}). \qquad (15)$$

Пример

Примем для расчета параметры пожара, полученные по данным системы ИСДМ-Рослесхоз [2]:

$k_0 = 5{,}56$ *га/час*$^{\alpha}$; $\alpha = 2$; t_1=3*час*; $S(t_1) = 50$ *га* ; $U = 1$ *га/час*$^{\alpha+1}$.

Тогда

$$t_л = \frac{\alpha k_0}{(\alpha+1)\cdot U} = 3{,}73\,\textit{час}, \qquad S(t_л) = \frac{k_0}{(\alpha+1)}\cdot t_л^{\alpha} = 25{,}78\,\textit{га}$$

$$S(t_2) = S(t_1) + S(t_л) = k_0(t_1^{\alpha} + \frac{1}{(\alpha+1)}\cdot t_л^{\alpha}) = 75{,}82\,\textit{га}.$$

При отсутствии локализации $S_0(t_2) = k_0(t_1 + t_л)^{\alpha} = 251{,}8$ *га.*

Сохраненная площадь леса $\Delta S(t_2) = 251{,}8 - 75{,}78 = 176$ *га.*

3. Оценка оптимального количества противопожарных сил с учетом затрат на тушение пожара и стоимости поврежденного леса

Общий объем ущерба, наносимого природным пожаром, можно в простейшем случае оценить как сумму стоимости поврежденного леса и затрат на ликвидацию пожара. Упростим задачу, полагая, что в локализации участвует только один вид противопожарных средств. Обозначим

$$U = k_1 x, \tag{16}$$

где x - количество единиц противопожарных средств,

k_1 *га/час* $^{\alpha\text{-1}}$*.ед* – интенсивность снижения скорости прироста площади на единицу средств. Общий объем ущерба от пожара к моменту $t_л$ равен

$$D(t_л, x) = C_1 x + C_2 S(t_л, x), \tag{17}$$

где C_1 *руб/ед* – затраты, связанные с эксплуатацией одной единицы противопожарных средств, C_2 – ущерб, нанесенный пожаром в расчете на 1 гектар, *руб/га.* С учетом (13), (14) и (17) имеем

$$D(t_л, x) = C_1 x + C_2 \frac{k_0}{(\alpha+1)} \cdot t_л^{\alpha} \tag{18}$$

Оптимальное количество противопожарных сил x_{opt} можно получить из условия $\partial D(t_л, x)/\partial x = 0$. Из (13) и (18) следует

$$\begin{aligned} \partial D(t_л, x)/\partial x &= C_1 + C_2 \frac{\partial}{\partial x} S(t_л, x) = C_1 + C_2 \frac{\alpha k_0}{\alpha+1} \cdot t_л^{\alpha-1} \frac{\partial}{\partial x} t_л = \\ &= C_1 - C_2 \left(\frac{\alpha k_0}{\alpha+1}\right)^3 \frac{1}{k_1^2 x^3}. \end{aligned} \tag{19}$$

Приравняв выражение (19) к нулю, получим формулу для оптимального количества противопожарных сил:

$$x_{opt} = \frac{\alpha k_0}{\alpha+1} k_1^{-2/3} \left(\frac{C_1}{C2}\right)^{1/3} \tag{20}$$

Пример

Вернемся к предыдущему численному примеру, в котором положим $k_1 = 0.1$, $x = \{1, 2, ..., 10\}$, $C_1 = \{1000, 500, 100\}$ *тыс. руб/1 ед*; $C_2 = 2$ *тыс. руб/га.*

В таблице приведен расчет затрат на локализацию пожара при различной стоимости единицы противопожарных средств. Мы видим, что при каждой величине C_1 существует оптимальное число команд, обеспечивающее минимум общих затрат. Эти значения выделены в таблице цветом.

Таблица

Затраты на локализацию пожара при различной стоимости противопожарных средств

x	$t_л$	$S(t_л,x)$	$D(t_л,x)$ C_1=1000	$D(t_л,x)$ C_1=500	$D(t_л,x)$ C_1=100
1	37,1	2546	6093	5590	5190
2	18,5	636,6	3273	2270	1470
3	12,4	282,9	3566	2060	865
4	9,27	159,1	41318	2320	718
5	7,41	101,8	5200	2700	703
6	6,18	70,7	6140	3140	741
7	5,29	52,0	7104	3600	803
8	4,63	39,8	8080	4080	879
9	4,12	31,4	9060	4560	962
10	3,7	25,5	10000	5050	1051

Расчет по формуле (20) дает следующие значения: при C_1=1000 x_{opt}=2.168, при C_1=500 x_{opt}=2.736, при C_1=100 x_{opt}=4.663, что при округлении до целых чисел совпадает с данными Таблицы 1.

Заключение

Рассмотренная модель и решенный на ее основе ряд задач позволяют оценивать оптимальный размер сил и средств при управлении борьбой с природными пожарами. Кроме того, предложенная теория может явиться основой для синтеза систем управления, в том числе, в условиях неполной информации и помех на основе теории аналитического конструирования регуляторов (АКОР) с использованием фильтра Калмана для текущей оценки состояния объекта управления.

Литература

1. *Parks G.M.* Development and application of a model for suppression of forest fires / G.M. Parks //Manage Science. 1964. Vol. 10. N. 4. P. 760-766.

2. *Parlar M.* Optimal Forest Fire Control an Extension of Park’s Model / M.Parlar, R.G. Vicson // Forest Science. 1982. Vol. 28. N. 2. P. 760-766.

3. *Доррер Г.А.* Динамика лесных пожаров. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. 404 с.

4. *Коморовский В.С.* Методика расчета параметров лесных пожаров как динамических процессов на поверхности Земли с использованием данных космического мониторинга / В. С. Коморовский, Г. А. Доррер // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2010. Вып. 3 (29). С. 47-51.

Optimal control scopes of wildfire suppression

***Georgii Alekseevich Dorrer**, head of system engineering, Siberian State Technological University*

A simple model of wild fire dynamics is proposed. This model permits to investigate some problems of such process managing.

Key words: Wildfire, managing, optimal staff of fire crews.