

Ю.І. Грицюк, д-р техн. наук, професор; Т.Є. Рак, канд. техн. наук, доцент, І.О. Малець, канд. техн. наук, доцент (Львівський державний університет безпеки життєдіяльності)

ОСОБЛИВОСТІ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ ЛІКВІДАЦІЇ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ

Розглянуто особливості розв'язання задачі оптимального управління процесом ліквідації лісових пожеж, яка є складовою частиною інформаційно-аналітичної системи, що забезпечує оперативне і довготермінове планування заходів з охорони лісів від пожеж. Встановлено, що використання методів теорії оптимального управління та прийняття рішень дає змогу розглядати процес гасіння лісової пожежі як динамічну систему і оцінювати найрізноманітніші ситуації взаємозв'язку процесів розповсюдження лісової пожежі з безпосереднім нарощуванням сил і засобів для її ліквідації.

Ключові слова: лісові пожежі, лісовий займистий матеріал, пожежно-рятувальні служби, інформаційно-аналітична система, методи теорії оптимального управління.

Постановка задачі. Аналіз процесу гасіння великих лісових пожеж (ЛП), які відбулися не так давно як на території України [4], так і за її межами, показав, що це проблема не стільки технічна, скільки організаційна. При гасінні таких пожеж необхідно у короткі терміни організувати структуру, здатну управляти і контролювати діяльність великої кількості гасильників за умов, коли для гасіння пожежі задіяно значну кількість людей, більшість з яких до цього ніколи не працювали разом і не мають навиків гасіння лісових пожеж. В процесі ліквідації лісової пожежі змінюються обсяги виконуваних робіт, умови процесу гасіння і, залежно від реальної обстановки, скорочуються або нарощуються сили і засоби кваліфікованих пожежно-рятувальних команд. Тільки на дуже крупних пожежах структура організації процесу ліквідації лісової пожежі може стабілізуватися для виконання різних завдань протягом тривалого періоду.

Проблема ліквідації лісових пожеж полягає також у тому, що обмежені матеріально-грошові ресурси, які виділяються в Україні для їх запобігання [3, 4], не забезпечують належну охорону лісів на всій пожежонебезпечній території. Водночас, наявність суб'єктів лісової охорони та їх оснащеність є основним при виявленні лісових пожеж на якомога ранній їх стадії та своєчасному залученні сил і засобів для їх ліквідації. Тому актуальною проблемою для лісової території України є створення системи лісової охорони (рис. 1), основним завданням якої мало б бути оптимальне управління боротьбою з лісовими пожежами, які б загалом мінімізували екологічні та економічні збитки.

Аналіз останніх досліджень. Роботи з вирішення проблеми оптимального управління боротьбою з лісовими пожежами ведуться вже достатньо давно як у нашій країні [3, 4, 5], так і за її межами [1, 2, 6]. У цих дослідженнях дається детальний аналіз різних заходів щодо уникнення лісових пожеж, наводяться сучасні методи і засоби їх ліквідації. Всі вони орієнтовані на класичний підхід до побудови математичних моделей, які базуються на використанні систем алгебричних і диференціальних рівнянь. При такому підході приймаються деякі допущення та спрощення відомих тактичних дій щодо ліквідації лісових пожеж, що значно обмежує практичне використання отриманих результатів.

На сучасному рівні розвитку інформаційних технологій та телекомунікаційних систем потрібно використовувати нові підходи до організації процесу ліквідації лісових пожеж. При цьому необхідно брати до уваги усіх суб'єктів цього процесу, включаючи саму пожежу, що зазвичай стихійно розповсюджується лісовими масивами, та залучення можливих сил і засобів на її ліквідацію. Такий підхід можна представити у вигляді структурної схеми (див. рис. 1), яка пов'язує організовані дії суб'єктів ліквідації лісової пожежі з сукупністю зовнішніх випадкових чинників.



Рис. 1. Структурна схема системи лісової охорони

Таблиця

Категорії суб'єктів ліквідації лісової пожежі та їх характеристика

Категорії суб'єктів	Характеристики показників
Початкові дані про лісову пожежу	Місце виникнення лісової пожежі. Час виявлення лісової пожежі. Площа горіння у момент виявлення лісової пожежі. Інтенсивність процесу горіння. Метеорологічні умови у момент виявлення лісової пожежі. Розрахункові показники складності лісової пожежі.
Лісорослинні умови	Рельєф місцевості, тип лісу, надґрунтовий покрив. Типи лісових займистих матеріалів.
Метеорологічні умови	Комплексний показник засухи. Температура і вологість повітря станом на 13 год. Вітер: швидкість, напрям, профіль. Опади протягом доби, прогноз на момент ліквідації ЛП.
Топографія та інфраструктура місцевості	Карти рельєфу місцевості, під'їзних доріг тощо. Наявність особливих об'єктів: населені пункти, трубопроводи, нафто- та газосховища, ЛЕП, склади ПММ, боєприпасів тощо.
Протипожежні сили та засоби	Тип устаткування, кількість, продуктивність. Особовий склад: кількість, кваліфікація.
Штаб ліквідації лісової пожежі	Місце розташування штабу, склад і місце дислокації команд. Протипожежні заходи, наявність засобів зв'язку.
Методи і моделі підтримки управлінських рішень	Інформаційні бази даних про лісові займисті матеріали. Картографічні бази даних місцевості. Моделі процесу евакуації населення. Моделі процесу протипожежної охорони особливих об'єктів. Моделі процесу горіння та поширення ЛП. Моделі розрахунку продуктивності протипожежних сил і засобів залежно від складності ЛП. Моделі процесу локалізації та ліквідації ЛП. Моделі розрахунку збитків від наслідків ЛП.

Сукупність параметрів конкретної лісової пожежі та зовнішніх умов створюють проблему оптимального управління процесом її ліквідації, яку можна класифікувати за категоріями суб'єктів і характеристиками показників (див. таблицю). Наведена схема сприяє формулюванню ряду постановок задач і розробленню алгоритмів їх розв'язання, пов'язаних з ідентифікацією лісової пожежі та виробленням управлінських дій щодо її подолання, охороною території і подальшого моніторингу за нею.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо постановку задачі оптимального управління процесом ліквідації лісової пожежі, узагальнена математична модель якої наведена у роботі [1]. Основним допущенням при цьому є гіпотеза про те, що інтенсивність надходження і відведення протипожежних сил і засобів є неперервною функцією часу в заданих межах (рис. 2).

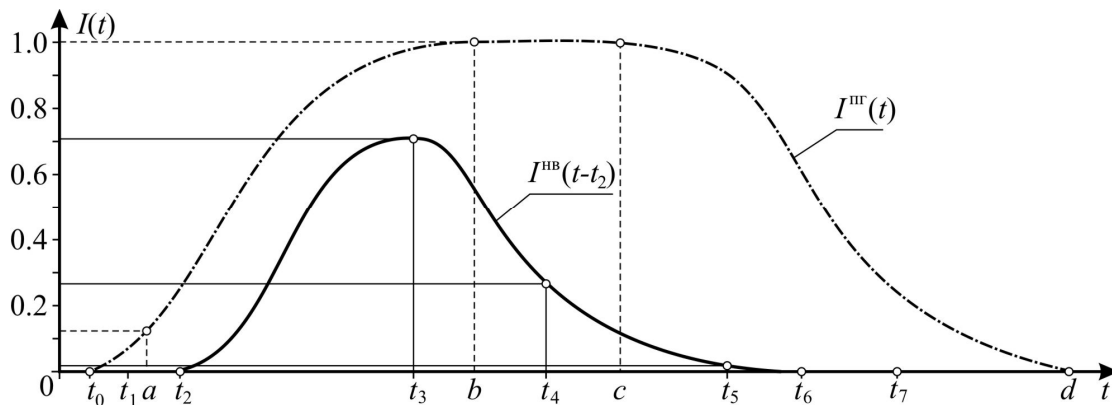


Рис. 2. Схема інтенсивності надходження та відведення протипожежних сил і засобів:

$I^{III}(t)$ – інтенсивність процесу горіння ЛЗМ; $I^{HB}(t)$ – інтенсивність надходження і відведення протипожежних сил і засобів

Введемо такі позначення для різних моментів часу перебігу лісової пожежі: t_0 – виникнення ЛП; t_1 – виявлення ЛП; t_2 – початок організації процесу ліквідації ЛП; t_3 – зупинка ЛП; t_4 – локалізація ЛП; t_5 – завершення ліквідації ЛП; t_6 – охорона території; t_7 – моніторинг території. Позначимо також через $S(t)$ площу лісової пожежі (га), яку вона може займати у момент часу t незалежно від того, чи ведеться боротьба з нею, чи вона затухає самостійно. Вважається [1, 2], що швидкість розповсюдження лісової пожежі зростає лінійно з часом t , тобто її можна представити у такому вигляді:

$$R(t) = a_0 + a_1 \cdot t, \text{ га/год,}$$

де a_0, a_1 – константи для однорідної ділянки лісу, які визначаються лісорослинними і погодними умовами. До моменту часу t переважно $S(t) = t \cdot R(t)$.

Згідно з цим виразом, лісова пожежа може тривати безмежно, інтенсивність процесу горіння якої з часом t тільки зростає. Проте ця думка є хибною, позаяк пожежа може тривати тільки деякий проміжок часу (t_n), протягом якого вигорає тільки певний тип лісового займистого матеріалу (ЛЗМ), після чого вона повільно затухає. Інколи лісова пожежа затухає різко у певний момент часу t_{n-1} внаслідок несприятливих погодних умов. У будь-якому випадку вона змінюється нелінійно, тобто поділяється на декілька фаз (див. рис. 2).

Спочатку лісова пожежа поступово розгорається протягом часу $t \in [t_0, a]$, тобто горить тільки суха трава, опалі сухі гілки тощо. За наявності високого підліску, підросту, які межують з кронами шпилькових дерев, відбувається друга фаза горіння протягом часу $t \in [a, b]$. З плином часу $t \in [b, c]$ вона набуває критичної маси, внаслідок чого процес горіння сягає найбільшої інтенсивності. Протягом цієї фази вигорає практично увесь ЛЗМ на значній терито-

рії. На останній фазі ($t \in [c, d]$) відбувається згасіння лісової пожежі, протягом якої догорають рештки ЛЗМ, тліють вогкі або мало займисті матеріали.

Основне завдання системи охорони лісів полягає в тому, щоб якомога швидше виявити лісову пожежу з моменту її виникнення. Після цього потрібно найшвидше організувати сили і засоби для її локалізації та ліквідації, завершити процес гасіння та здійснити охорону території. Від швидкості та інтенсивності виконання цих дій залежать збитки, які наносить лісова пожежа (рис. 3).

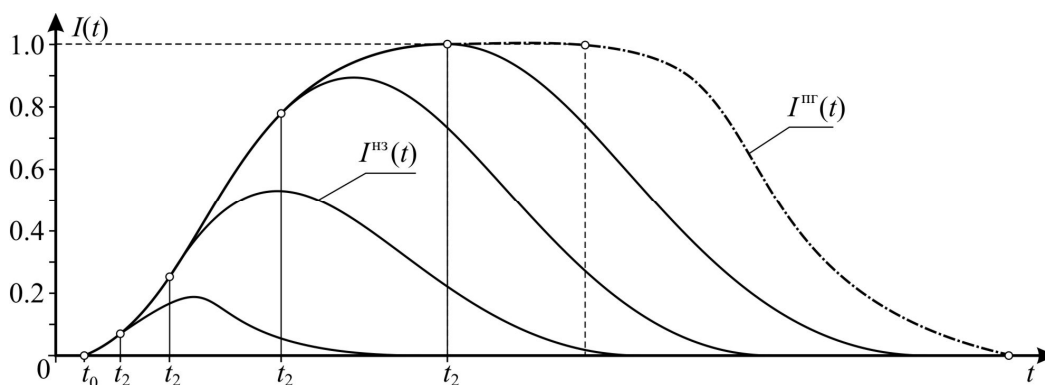


Рис. 3. Схема інтенсивності нанесення збитків залежно від початку ліквідації ЛП

Вважаємо, що швидкість розповсюдження лісової пожежі змінюється нелінійно з плином часу t , тобто її можна представити у такому вигляді:

$$R(t) = a_0 \cdot t^{a_1} \cdot e^{a_2 \cdot t}, \text{ га/год}, \quad (1)$$

де a_0, a_1, a_2 – константи для однорідної ділянки лісу, які визначаються лісорослинними і погодними умовами.

Зміна площі лісової пожежі з плином часу t , що знаходиться під дією протипожежних сил і засобів, визначається за такою формулою, га:

$$S(t) = t \cdot \begin{cases} R(t), & \text{якщо } t < t_2; \\ R(t) - P(t - t_2, V, m), & \text{якщо } t_2 \leq t \leq t_4, \end{cases} \quad (2)$$

де $P(t - t_2, V, m)$ – продуктивність протипожежних сил і засобів (га/год), задіяних для ліквідації лісової пожежі, приведена до швидкості зміни площі її розповсюдження. Ця функція залежить від таких чинників: $t - t_2$ – пройденого часу від початку процесу гасіння пожежі; $V = V(N)$ – сумарної швидкості локалізації кромки лісової пожежі, м/год; m – вибраного варіанта тактики ліквідації лісової пожежі; $N = N(t)$ – сумарної кількості протипожежних сил і засобів, задіяних для ліквідації лісової пожежі у момент часу t .

При цьому

$$N(t) = \int_{t_2}^t U(\tau) d\tau, \text{ од.}, \quad (3)$$

де $U(t)$ – інтенсивність надходження протипожежних сил і засобів для ліквідації ЛП, од./год. Значення $U(t) > 0$ відповідає прибуттю сил і засобів на місце пожежі, $U(t) < 0$ – їх поверненню на базу. Ця функція обмежена максимально допустимою інтенсивністю маневрування силами і засобами, тобто $|U(t)| \leq U_{\max}$.

Вважається [1, 2, 5], що швидкість зменшення площі лісової пожежі $P(t)$ від кількості задіяних сил і засобів є лінійною. Проте в реальній ситуації така залежність є набагато складнішою та визначається типом задіяних сил і засобів, вибором тактики ліквідації лісової пожежі та іншими чинниками:

$$P(\Delta t, V, m) = b_0 \cdot \Delta t^{b_1} \cdot V^{b_2} \cdot m^{b_3} \cdot e^{b_4 \cdot \Delta t + b_5 \cdot V + b_6 \cdot m}, \text{ га/ГОД}, \quad (4)$$

де: b_0, \dots, b_6 – константи для однорідної ділянки лісу, значення яких залежать від лісорослинних і метеорологічних умов.

Рівняння (2) необхідно розглядати за таких початкових умов:

$$\mathbf{t}_2 \cdot \mathbf{R}(\mathbf{t}_2) = \mathbf{S}_0, \mathbf{N}(\mathbf{t}_2) = 0, \quad (5)$$

де \mathbf{S}_0 – площа лісової пожежі у момент початку її гасіння, га.

Стратегічна мета ліквідації лісової пожежі полягає в якнайшвидшій її зупинці (\mathbf{t}_3) та локалізації (\mathbf{t}_4). Тому інтенсивність надходження сил і засобів $\mathbf{U}(\mathbf{t})$ і їх кількість $\mathbf{N}(\mathbf{t})$ треба вибирати так, щоб при $\mathbf{t} = \mathbf{t}_4$ площа поширення лісової пожежі залишалася сталою ($\mathbf{S}(\mathbf{t}_4) = \text{const}$), при цьому

$$\mathbf{R}(\mathbf{t}_4) - \mathbf{P}(\mathbf{t}_4, \mathbf{V}, \mathbf{m}) = 0. \quad (6)$$

Для оцінки успішності прикладених зусиль в боротьбі з лісовою пожежею необхідно врахувати заподіяний нею збиток і витрати на її гасіння. У наведеній нижче моделі враховано такі структурні компоненти:

- витрати на приведення в бойову готовність та транспортування протипожежних сил і засобів до місця пожежі і назад, C_0 , грн/од. засобів;
- заподіяний збиток – пропорційний до площі лісової пожежі, враховує вартість пошкоджених лісових ресурсів і витрати на лісовідновлення, C_S , грн./га;
- понесені витрати – пропорційні загальному часу ліквідації лісової пожежі, враховує заробітну плату пожежних команд, амортизацію устаткування, пальне і інші витратні матеріали, C_T , грн/(год·од. засобів).

При цьому загальні збитки від лісової пожежі до моменту завершення її ліквідації t_6 визначаються за таким виразом:

$$Z_1(t_2, t_6) + Z_2(t_4) + Z_3(t_2, t_6) = C_0 \cdot \int_{t_2}^{t_6} |U(\tau)| d\tau + C_S \cdot S(t_4) + C_T \cdot \int_{t_2}^{t_6} |N(\tau)| d\tau, \quad (7)$$

де $Z_1(\mathbf{t}_2, \mathbf{t}_6)$ – витрати на мобілізацію і транспортування протипожежних сил і засобів;

$Z_2(\mathbf{t}_4)$ – збиток, нанесений ЛП до завершення її локалізації;

$Z_3(\mathbf{t}_2, \mathbf{t}_6)$ – витрати на утримування протипожежних сил і засобів за час її ліквідації.

Виходячи з моделі (7), можна сформулювати таку постановку задачі оптимального управління процесом ліквідації лісової пожежі. Задано функціонал

$$F(t_2, t_6) = \int_{t_2}^{t_6} (C_0 |U(\tau)| + C_T |N(\tau)|) d\tau + C_S S(t_4) \rightarrow \min, \quad (8)$$

а також умови перебігу лісової пожежі (1)–(6). Потрібно знайти таке управління $U(t), t \in [t_2, t_6]$ і такий момент часу t_6 , при яких забезпечується мінімальне значення функціонала $F(\mathbf{t}_2, \mathbf{t}_6)$.

Сформульована постановка задачі є задачею оптимального управління процесом ліквідації лісової пожежі, у якій управління $\mathbf{U}(\mathbf{t})$ визначене на невідомому проміжку часу $[t_2, t_6]$. У разі лінійної залежності між зміною швидкості зменшення площі лісової пожежі $\mathbf{P}(\mathbf{t}_4 - \mathbf{t}_2, \mathbf{V}, \mathbf{m})$ та кількістю задіяних протипожежних сил і засобів $N(t)$ оптимальна тактика управління полягає у визначенні двох моментів часу – t', t'' ($t_2 \leq t' < t'' \leq t_4$). Знаючи їх, можна визначити оптимальне управління $\hat{U}(t)$, яке має такий вигляд:

$$\hat{U}(t) = \begin{cases} +N(t), & \text{якщо } t_2 \leq t \leq t'; \\ 0, & \text{якщо } t' \leq t \leq t''; \\ -N(t), & \text{якщо } t'' \leq t \leq t_4. \end{cases} \quad (9)$$

Тобто, тут розглядаються три етапи ліквідації лісової пожежі. На першому етапі протипожежні сили потрібно нарощувати з максимально можливою швидкістю, на другому їх кі-

лькість практично не змінюється, а на третьому етапі сили потрібно виводити з місця пожежі також з максимальною швидкістю.

Шкода, але в такому управлінні не передбачено зворотного зв'язку за фактичним станом процесу локалізації пожежі. Зазвичай поведінка лісових пожеж часто є непередбачуваною, тому заздалегідь розрахована кількість протипожежних сил і засобів та вибрана тактика її ліквідації вимагає динамічного коректування. Отже процес прийняття управлінських рішень щодо тактики ліквідації лісової пожежі повинен бути покроковим, базуватися як на аналізі поточного стану перебігу подій, так і на прогнозі їх розвитку чи згортання.

Розглянута у роботі постановка задачі та математичне її формулювання є складовою частиною інформаційно-аналітичної системи, яка забезпечує оперативне і довготермінове планування заходів щодо охорони лісів від пожеж. Використання методів теорії оптимального управління та прийняття управлінських рішень дає змогу розглядати процес гасіння лісової пожежі як динамічну систему і оцінювати при цьому найрізноманітніші ситуації взаємозв'язку процесів розповсюдження лісової пожежі з безпосереднім нарощуванням сил і засобів для її ліквідації. Актуальність такого взаємозв'язку особливо стосується великих лісових пожеж, тривалість яких сягає декількох тижнів, а кількість сил і засобів, що беруть участь у процесі її гасіння, є достатньо великою.

Список літератури:

1. Главацкий Г.Д. Информационная модель и задачи оптимизации процесса борьбы с лесными пожарами / Г.Д. Главацкий, В.М. Груманс // Лесное хозяйство. – 2002. – № 1. – С. 36-41.
2. Доррер Г.А. Математические модели динамики лесных пожаров. – М. : Изд-во "Лесн. пром-сть", 1979. – 161 с.
3. Зібцев С.В. Аналіз особливостей лісопожежної обстановки та стану протипожежної охорони лісу в зонах радіаційного забруднення / С.В. Зібцев // Наукові доповіді НАУ. – 2006. – Вип. 4(5). – 17 с. [Електронний ресурс]. – Доступний з <http://www.nbu.gov.ua/e-Journals/nd/2006-4/06zsvcbr.pdf>
4. Національна доповідь про стан техногенної та природної безпеки в Україні // Офіційний сайт МНС України. [Електронний ресурс]. – Доступний з http://www.mns.gov.ua/content/national_lecture.html
5. Свириденко В.Є. Лісова пірологія / В.Є. Свириденко, О.Г. Бабіч, А.Й. Швиденко. – К. : Агропромвидав України, 1999. – 172 с.
6. National Fire danger Rating System (NFDRS). [Електронний ресурс]. – Доступний з <http://www.wrh.noaa.gov/sew/fire/olm/nfdrs.htm>.

Ю.И. Грыцук, д-р техн. наук, профессор, Т.Е. Рак, канд. техн. наук, доцент, И.О. Малец, канд. техн. наук (Львовский государственный университет безопасности жизнедеятельности)

ОСОБЕННОСТЬ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ЛИКВИДАЦИИ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

Рассмотрены особенности решения задачи оптимального управления процессом ликвидации лесных пожаров, являющаяся составной частью информационно-аналитической системы, которая обеспечивает оперативное и долгосрочное планирование мероприятий по охране лесов от пожаров. Установлено, что использование методов теории оптимального управления и принятия решений дает возможность рассматривать процесс тушения лесного пожара как динамическую систему и оценивать самую разнообразную ситуацию взаимосвязи процессов распространения лесного пожара с непосредственным наращиванием сил и средств для ее ликвидации.

Ключевые слова: лесные пожары, лесной возгораемый материал, пожарно-спасательные служба, информационно-аналитическая система, методы теории оптимального управления.

Yu.I. Grytsyuk, Doctor of Sciences (Engineering), Professor; T.Ye. Rak, Candidate of Sciences (Engineering), Assistant Professor; I.O. Malets', Candidate of Sciences (Engineering) (Lviv State University of Vital Activity Safety)

PECULIARITIES OF PROBLEM SOLVING OF THE OPTIMUM CONTROL OF FOREST FIRES EXTINGUISHING

The article deals with peculiarities of problem solving of optimum control of forest fires extinguishing, which is the part of information analytical system for providing the operative and long-term planning of measures of forest protection against fires. Using of theory methods of optimum control and making decision enables to examine the process of forest fire extinguishing as dynamic system and estimate various situation of processes correlation of distribution of forest fire with the direct increase of force and facilities for its liquidation is established.

Key words: forest fires, forest inflammable material, fire-rescue services, information-analytical system, methods of theory of control

