

УДК 630.6

## МОДЕЛИРОВАНИЕ АВИАЦИОННОЙ ПРОТИВОПОЖАРНОЙ ОХРАНЫ ЛЕСОВ НА БАЗЕ ФОРМАЛИЗМОВ РАСКРАШЕННЫХ СЕТЕЙ ПЕТРИ

Ю.В. Юшков

ГОУ ВПО «Сибирский государственный технологический университет»  
660049 Красноярск, пр. Мира, 82; e-mail: [yushkovYV@yandex.ru](mailto:yushkovYV@yandex.ru)

Предлагается модель для изучения процесса авиационной противопожарной охраны лесов отдельным авиазвеном на закрепленной за ним территории. Модель построена с использованием разработанного автором программного средства для имитационного моделирования вложенных раскрашенных сетей Петри (Colored Petri Nets, сокращенно CPN). Модель CPN построена на базе разработанной ранее модели бизнес – процесса.

The model of the aircraft fire protection of forests is introduced. It deals with a single air unit, to which the certain territory is assigned. The model was built using a program complex for simulation modeling of nested Colored Petri Nets (CPN). The author has developed this complex personally. The CPN model is based on earlier – built business process model.

### ВВЕДЕНИЕ

Леса являются одним из главных природных богатств Российской Федерации, и Красноярского края, в частности. Одна из главных угроз лесам в настоящий день - лесные пожары. В условиях современной российской действительности на действующие формирования лесоохраны ложится большая нагрузка, что требует тщательного планирования и организации действий лесоохраны. Целью настоящей работы является оптимизация работы звена авиационной охраны лесов, путем определения оптимального состава звена, графика и принципов использования различных летательных аппаратов, прогнозирования загруженности звена в целом и каждого аппарата в отдельности и т.д.

В настоящее время широко используется методология моделирования дискретных систем, основанная на использовании раскрашенных (цветных) сетей Петри – Coloured Petri Net (CPN). Эта методология является обобщением формализма обыкновенных сетей Петри на случай многих видов ресурсов и позволяет более эффективно моделировать сложные системы. В последнее время активно разрабатывается методология использования вложенных сетей Петри, где любой ресурс может представлять из себя отдельную сеть Петри.

До сих пор не было разработано программной реализации формализмов вложенных раскрашенных сетей Петри. Разработанное автором программное средство является первым в данной области [6].

При построении модели автор использовал модель авиационной охраны лесов от пожаров в нотации IDEF0, описанная в [1]. Вкратце задача формулируется следующим образом [1; 8; 9; 10].

Моделируется работа отдельного авиазвена, состоящего из нескольких летательных аппаратов и оперативного персонала. Авиазвено занимается охраной леса на определенной территории. На данной территории периодически возникают очаги возгорания, каждый из которых может перерасти в лесной пожар. Каждая единица авиазвена может

выполнять одну из трех типов задач: патрулирование, наблюдение, тушение, причем задача может измениться в процессе полета. Патрулирование ставит целью обнаружение очагов горения и возникших лесных пожаров. Наблюдение ведется за уже обнаруженными пожарами. В задаче тушения пожара учитываются действия наземных служб. Несколько самолетов могут заниматься одним пожаром, причем их число и задачи могут меняться [1].

Предлагаемая автором модель содержит два уровня вложенности. На верхнем уровне функционирует сеть «Авиационная охрана лесов». В ней в качестве фишек функционируют вложенные сети «Пожар» и «Летательный аппарат». Рассмотрим эти три сети подробнее.

Основная сеть «Авиационная охрана лесов» представлена на рисунке 1.

В сети в качестве фишек действуют вложенные сети Петри [6] «Пожар» и «Летательный аппарат», функционирование которых описано позже.

Исходя из материалов в [2;7;12;13] в сети обозначены 7 позиций. Позиции Airbase, Fighting, Watching, Patrol обозначают нахождение летательных аппаратов соответственно на авиабазе, на тушении, наблюдении и патрулировании. Burn\_caus – содержит в себе потенциальные пожары, Fire – действующие пожары, Fought – предотвращенные, потушенные или потухшие пожары.

Все переходы в сети синхронизированы [6] с переходами во вложенных сетях. То есть если срабатывающий переход в основной сети включен в группу синхронизации, то для каждой из задействованных при этом фишек, представляющей вложенную сеть, вызывается срабатывание одного из переходов, находящихся в той же группе синхронизации (если такие есть). Если же срабатывание ни одного такого перехода в какой либо вложенной сети невозможно, то переход в основной сети тоже невозможен.

Состав групп синхронизации описан в разделе о вложенных сетях.

Переходы в сети имеют следующие смысловые нагрузки.

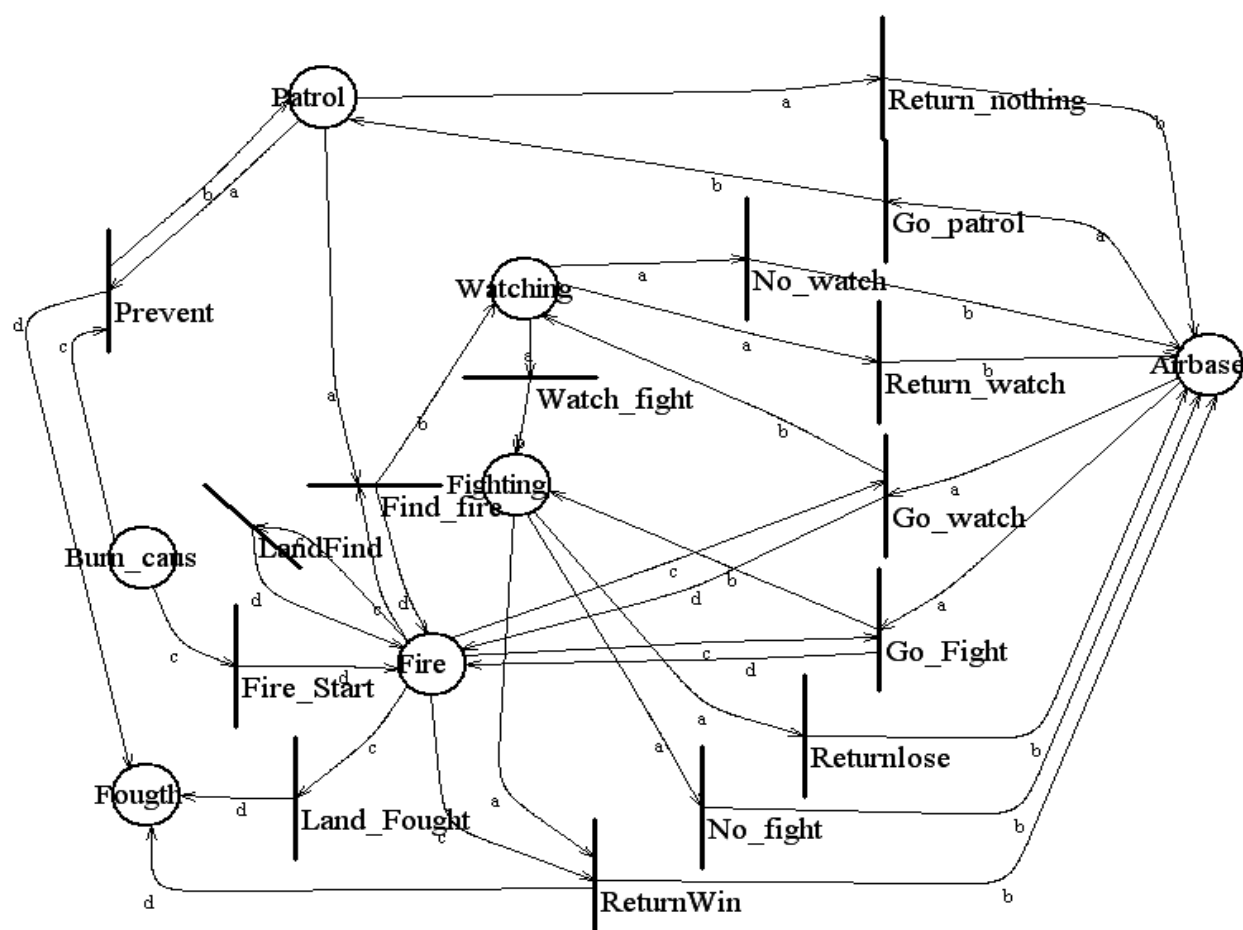


Рисунок 1 – Основная сеть CPN «Авиационная охрана лесов»

Fire\_start – возгорание, переход пожара из статуса потенциального в статус действующего.

Go\_patrol – вылет на патрулирование, Return\_nothing – возврат с патрулирования (в том случае если не обнаружено новых действующих пожаров).

Go\_watch и Go\_fight – соответственно вылет на наблюдение или тушение пожара. При этом из позиции fire выбирается пожар, и его номер заносится во вложенную сеть «Авиа единица».

Returnwatch и Returnlose – возврат с наблюдения/тушения при условии того что пожар еще действует. Returnwin – возврат с тушения при условии погашения пожара данным самолетом (возможно в сочетании с другими самолетами и/или наземными службами).

No\_watch и No\_fight – возврат на базу, если пожар потушен другим самолетом или наземными службами. Данные переходы имеют наивысший в сети приоритет, т.е. считается, что после ликвидации пожара все задействованные самолеты покидают место тушения. Условием срабатывания является отсутствие в позиции fire фишек, в которых номер пожара равен номеру пожара для текущего самолета (см. раздел о вложенных сетях).

Переход Prevent моделирует предотвращение потенциального пожара.

Переход LandFind моделирует обнаружение пожара наземными средствами.

Переход Find\_fire моделирует обнаружение действующего пожара и переход к наблюдению за

ним. Переход Watch\_fight моделирует переход от наблюдения к тушению пожара.

Переход Land\_Fought моделирует затухание пожара по естественным причинам либо ликвидацию его наземными службами.

Вложенная сеть «Пожар» представлена на рисунке 2.

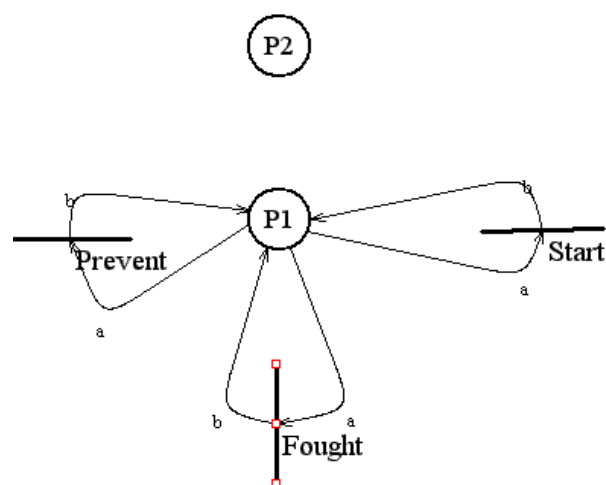


Рисунок 2 - Вложенная сеть «Пожар»

В сети обозначены 2 позиции. Позиция P2 - это служебная позиция, в которую заносится из основной сети номер пожара. При дальнейшем развитии модели в данной позиции будет храниться вся информация о пожаре служебного характера.

Позиция P1 – это статус лесного пожара. Он определяется номером статуса (тип позиции integer). На текущем этапе выделено 4 статуса: 0 – пожар может начаться, 1 – пожар горит и обнаружен, 2 – пожар потушен, 3 – пожар горит но еще не обнаружен, 4 – возгорание предотвращено.

За изменение статуса отвечают следующие переходы: Start – пожар загорается (синхронизирован с переходом Fire\_Start в основной сети), Fought – пожар потушен (синхронизирован с переходами ReturnWin и Land\_Fought в основной сети и переходом Return\_Fight в сети «Авиа единица»), Prevent – пожар предотвращен (синхронизирован с переходом Prevent в основной сети). Дерево разметок имеет следующий вид:

```
m_00001 (P1:[0] P2:[])
├─Start m_00002 (P1:[1] P2:[])
├─Fought mt00003 (P1:[2] P2:[])
└─Prevent mt00003 (P1:[2] P2:[])
```

То есть изначально пожар готов к возгоранию, далее он может возникнуть либо быть предотвращен. Если пожар возник, то рано или поздно он будет потушен (или погаснет сам, что в данном случае не принципиально).

Сеть является безопасной, т. е. ни в одной позиции число фишек не превысит единицы.

Вложенная сеть «Летательный аппарат» представлена на рисунке 3.

В состав рассматриваемого авиазвена входят 4 летательных аппарата. Это самолет Ан-74, вертолет Ми-26Т и два вертолета Ми-8. Эти аппараты являются типовыми для авиазвеньев лесоохраны. Исходя из технических характеристик аппаратов, запаса топлива и нормативов авиационной охраны лесов, среднее время одного вылета составляет соответственно 5, 3 и 2 часа [3, 4, 5, 10]. Каждому из летательных аппаратов присвоен уникальный идентификатор (бортовой номер), позволяющий впоследствии выбирать данные именно по этому аппарату.

В сети обозначены 4 позиции. P1 – летательный аппарат находится на базе, P2 – летательный аппарат находится на вылете. При этом P2 имеет тип integer, и значение фишки определяет задачу, выполняемую летательным аппаратом: 1 – патрулирование, 2 – тушение пожара, 3 – наблюдение за пожаром.

В P3 содержится номер пожара, на котором действовал летательный аппарат (кроме случая патрулирования). Данные в P3 приходят из основной сети.

В Tth содержатся необходимые технические характеристики аппарата. В данной модели это бортовой номер и среднее время одного вылета. При моделировании разметка данной позиции остается неизменной.

Переходы в сети несут следующую смысловую нагрузку:

Go\_patrol – летательный аппарат вылетает на патрулирование, Return\_Nothing – возврат с патрулирования. Синхронизированы с одноименными переходами в основной сети.

Go\_fight – вылет с базы на тушение пожара, синхронизирован с одноименным переходом в основной

сети. Return\_fight – возврат с тушения пожара. Синхронизирован с переходами No\_fight, ReturnWin и ReturnLose в основной сети.

Go\_watch – вылет с базы на наблюдение за пожаром, Return\_watch – возврат с наблюдения за пожаром. Синхронизированы с одноименными переходами в основной сети. Return\_watch так же синхронизирован с переходом No\_watch.

Find\_fire – обнаружение пожара и переход к наблюдению за ним, watch\_fight – переход от наблюдения за пожаром к тушению. Синхронизированы с одноименными переходами в основной сети.

Вероятности срабатывания переходов различаются. Так, вероятность вылета на тушение пожара (при наличии обнаруженных пожаров) в два раза выше чем вероятность вылета на патрулирование или наблюдение за пожаром. Различие вероятностей диктуется смыслом задачи.

Фрагмент дерева разметок имеет следующий вид:

```
mc00001 (P1:[0] P2:[] P3:[1,2])
├─Go_fight mp00002 (P1:[] P2:[2] P3:[1,2])
├─Return_fight mp00003 (P1:[0] P2:[] P3:[2])
├─Go_patrol mt00004 (P1:[] P2:[1] P3:[2])
├─Go_watch mt00007 (P1:[] P2:[3] P3:[2])
├─Go_fight mt00011 (P1:[] P2:[2] P3:[2])
├─Return_fight mp00008 (P1:[0] P2:[] P3:[1])
├─Go_patrol mt00009 (P1:[] P2:[1] P3:[1])
├─Go_fight mt00010 (P1:[] P2:[2] P3:[1])
├─Go_watch mt00012 (P1:[] P2:[3] P3:[1])
├─Go_patrol mc00005 (P1:[] P2:[1] P3:[1,2])
├─Return_nothing mc00001 (P1:[0] P2:[] P3:[1,2])
├─Go_watch mp00006 (P1:[] P2:[3] P3:[1,2])
├─Go_fight mp00002 (P1:[] P2:[2] P3:[1,2])
├─Go_patrol mc00005 (P1:[] P2:[1] P3:[1,2])
├─Find_fire mp00006 (P1:[] P2:[3] P3:[1,2])
├─watch_fight mp00002 (P1:[] P2:[2] P3:[1,2])
├─return_watch mp00003 (P1:[0] P2:[] P3:[2])
├─return_watch mp00008 (P1:[0] P2:[] P3:[1])
├─Go_watch mp00006 (P1:[] P2:[3] P3:[1,2])
├─watch_fight mp00002 (P1:[] P2:[2] P3:[1,2])
├─Return_fight mp00008 (P1:[0] P2:[] P3:[1])
├─Return_fight mp00003 (P1:[0] P2:[] P3:[2])
├─return_watch mp00003 (P1:[0] P2:[] P3:[2])
├─Go_patrol mt00004 (P1:[] P2:[1] P3:[2])
├─Go_watch mt00007 (P1:[] P2:[3] P3:[2])
├─Go_fight mt00011 (P1:[] P2:[2] P3:[2])
├─return_watch mp00008 (P1:[0] P2:[] P3:[1])
├─Go_fight mt00010 (P1:[] P2:[2] P3:[1])
├─Go_patrol mt00009 (P1:[] P2:[1] P3:[1])
└─Go_watch mt00012 (P1:[] P2:[3] P3:[1])
```

Данное дерево показывает пример функционирования сети. Например, разметка mt00010 (P1:[] P2:[2] P3:[1]) означает, что аппарат вылетел на Тушение (задача с индексом 2 в P2) пожара с порядковым номером 1 (содержимое P3).

Разметка позиции TTH здесь не отражена, т.к. в ней находятся неизменные данные.

Следует отметить, что при использовании данной сети в качестве вложенной, начальная разметка имеет вид mc00001 (P1:[0] P2:[] P3:[]), то есть позиция P3 пуста. При таком ограничении, а так же при том что P3 пополяется только из основной сети, данная сеть также будет ограниченной во всех пози-

циях.

Модели были построены и протестированы имитационным моделированием с использованием пакета IMCPN(nested), подробно описанного в [11].

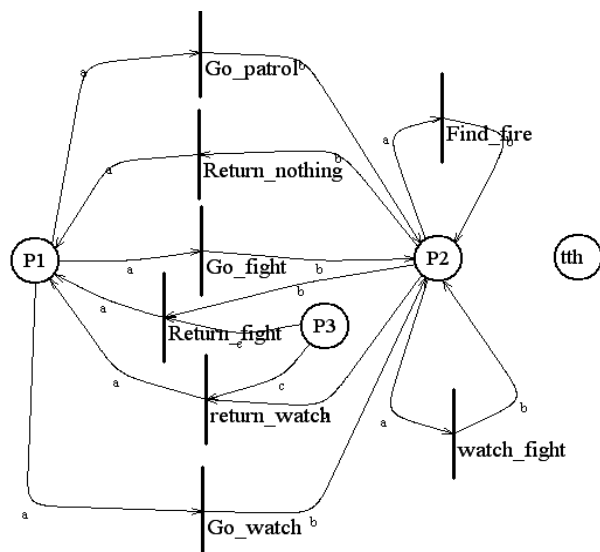


Рисунок 3 - Вложенная сеть «Летательный аппарат»

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью программного средства IMCPN(nested) автором было проведено имитационное моделирование процесса работы авиазвена в ограниченный период времени. В сети рассматривались четыре летательных аппарата и пять потенциальных лесных пожаров. По результатам моделирования автором были рассчитаны средние трудоемкости тушения пожаров в зависимости от времени появления (первого из возникших, второго из возникших и т.д.). Средняя трудоемкость составила 6,67 полетных часа, из них 3,29 это наблюдение и 3,38 тушение.

Автором были также рассчитаны среднее суммарное время полета каждого летательного аппарата. Для самолета Ан-74 это составило 18,83 часов, для Ми 26Т 11,26 часов, для Ми-8 в среднем 7,53 часа. Эти данные позволяют сделать вывод о неравномерной загрузке летательных аппаратов, и позволяют предположить что, например, для патрулирования (составляющего значительную часть общего времени) разумно Ми-8 привлекать чаще, чем другие летательные аппараты.

Результаты моделирования позволяют сказать,

что сеть адекватно описывает работу авиазвена, и значит, модель может найти практическое применение при планировании и улучшении авиационной охраны лесов. Расширение и улучшение модели (как основной сети так и вложенных) позволят учитывать процесс охраны с любой требуемой детализацией, вплоть до учета технического состояния самолетов, учета экипажей и т.д.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Коляда, А.В. Система поддержки принятия решений при тушении лесных пожаров силами авиационной охраны лесов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.В. Коляда. - Красноярск: СибГТУ, 2002. - 20 с.
2. Доррер, Г.А. Математические модели динамики лесных пожаров / Г.А. Доррер. - М.: Лесн. пром-сть, 1979. - 161 с.
3. Инструкция по авиационной охране лесов - М.: 1997. - 94 с.
4. Инструкция по определению ущерба, причиненного лесными пожарами - М.: Федеральная служба лесного хозяйства России, 1998. - 30 с.
5. Курбатский, Н.П. Техника и тактика тушения лесных пожаров / Н.П. Курбатский - М.: Гослестехиздат, 1962. - 153 с.
6. Ломазова, И.А. Вложенные сети Петри: моделирование и анализ распределенных систем с объектной структурой [текст] / И.А. Ломазова. - М.: Научный мир, 2004. - 208с.
7. Луданов, В.В. Применение математических методов и ЭВМ при проектировании и организации оперативных отделений авиационной охраны лесов от пожаров: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В.В. Луданов - СибТИ - Красноярск, 1975. - 27 с.
8. Указания по обнаружению и тушению лесных пожаров: Гослесхоз СССР. - М.: Лесн, пром-сть, 1976. - 110 с.
9. Управление лесными пожарами на экорегиональном уровне. Материалы Международного научно-практического семинара (Хабаровск. Россия. 9-12 сентября 2003 г.). - М.: Издательство «Алекс», 2004. - 208 с.
10. Червонный, М.Г. Охрана лесов / М.Г. Червонный - М.: Лесная пром-сть, 1977. - 127 с.
11. Юшков, Ю.В. Язык моделирования систем на базе формализмов раскрашенных сетей Петри / Ю.В. Юшков // Вестник СибГТУ - в печати.
12. Parks, G.M. Development and application of a model for suppression of forest fires / G.M. Parks // Manage Science - 1964. - V.10. - N4. - P. 760-766.
13. Parlar, M. Optimal Forest Fire Control: an Extension of Park's Model / M. Parlar, R.G. Vicson // Forest Science - 1982. - V.28. - N2. - P. 345-355.

Поступила в редакцию 28 сентября 2007 г.  
Принята к печати 26 ноября 2007 г.