пломному проектированию по лесной таксации. - Архангельск, 1977. - 40 с. [5]. Гусев И.И. Продуктивность ельников Севера.- Л.: ЛГУ, 1978. - 232 с. [6]. Гусев И.И., Коптев С.В. Сортиментная структура северотаежных ельников // Лесн. журн. - 1991. - № 6. - С.3 - 11. - (Изв. высш. учеб. заведений). [7]. Гусев И.И., Коптев С.В. Товарность северотаежных ельников // Повышение продуктивности лесов Европейского Севера. – Архангельск, 1992. - С.56-66. [8]. Гусев И.И., Коптев С.В. Сортиментная структура среднетаежных ельников // Лесн. журн. - 1995. - № 4-5. - С.7-20. - (Изв. высш. учеб. заведений). [9]. Лесотаксационный справочник для северо-востока европейской части СССР. - Архангельск, 1986. - 358 с. [10]. ОСТ 13-76–79. Сырье древесное для технологической переработки. - М.: Изд-во стандартов, 1979. [11]. Таксация товарной структуры древостоев / А.Г.Мошкалев, А.А.Книзе, Н.И.Ксенофонтов, Н.С.Уланов. - М.: Лесн. пром-сть, 1982. - 157 с. [12]. ТУ 13-0273685-404–89. Дровяная древесина для технологических нужд/ ВНПОлеспром, 1989.

Поступила 25 ноября 1996 г.

УДК 631.319.2.001.57

Ф.В. ПОШАРНИКОВ

Воронежская государственная лесотехническая академия

Пошарников Феликс Владимирович родился в 1938 г., окончил в 1960 г. Воронежский лесотехнический институт, доктор технических наук, профессор кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин Воронежской государственной лесотехнической академии. Имеет около 130 печатных работ в области механизации производственных процессов лесовосстановления, комплексной механизации работ в лесных питомниках.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА СТОХАСТИЧЕСКИХ АВТОМАТОВ ПРИ РЕШЕНИИ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ ЗАДАЧ С ИМИТАЦИОННЫМ МОДЕЛИРОВАНИЕМ ПРОЦЕССОВ В ЛЕСНОМ КОМПЛЕКСЕ

Изложен метод стохастических автоматов, рекомендуемый при оптимизационном моделировании сложных процессов в лесном комплексе. Приведен пример оптимизации параметров и режимов перемещения сошника лесной сеялки в почве.

The method of stochastic automats is presented, recommended for stimulation modelling of complex processes in wood-industrial area. The example of optimizing parameters and practice of supply colter displacement in the soil is given.

В лесном комплексе многие процессы плохо поддаются моделированию, так как в них сложно выделить четко коррелируемые связи между различными параметрами и режимными показателями. Выделяемые факторы трудно классифицировать по их значимости, а целевые функции часто представляются в неявном виде. Последующую оптимизацию процесса усложняет необходимость, как правило, учитывать сразу несколько критериев, которые могут функционально зависеть друг от друга.

По этой причине затруднено применение хорошо апробированных стандартных методов решения оптимизационных задач [2]. В то же время большинство из них можно успешно решить, если использовать малоприменяемый, но практически универсальный метод, известный как метод стохастических автоматов. Этим методом можно вести поиск глобальных экстремумов различных функций, используя имитационную модель Буше–Мостеллера [1]. Наложение вероятностной модели на заранее имитационно смоделированный реальный производственный процесс дает возможность воспринимать его как некоторый объект, в определенный дискретный момент времени $r = 1, 2, \ldots$ изменяющий внутреннее состояние $S(r)$ под действием на входе сигнала $y(r)$. В этом случае объект выступает как автомат, каждое состояние которого определяет значение переменной на его выходе в виде

$$x(r) = \varphi_1[S(r)]. \quad (1)$$

Входная переменная автомата считается случайной функцией его входа:

$$y(r) = y[x(\tau - 1)]. \quad (2)$$

Полагают, что переменная $y(r)$ может принимать только два значения: $y(r) = 1$, что соответствует классу благоприятных реакций, и $y(r) = 0$ – неблагоприятных. Допускают также, что число внутренних состояний автомата конечно ($S_i(r)$; $i = \overline{1, M}$) и каждому из них соответствует только один по уравнению (1) выход $x_i(r)$.

Такой автомат задают уравнением (1) и вектором вероятностей $\overline{p}$, каждая i-я компонента которого характеризует вероятность $\overline{p}_i$ перехода автомата в состояние S_i под воздействием входа $y(r+1)$. На r-м шаге поиска S_i характеризуется вероятностью $p_i(r) \geq 0$, $i = \overline{1, M}$, и в соответствии с суммой $\sum_{i=1}^{M} p_i(r) = 1$ выбирается очередное состояние $S(r + 1)$. В начале поиска, когда отсутствует априорная информация о функции $Q(x)$, экстремум которой отыскивается, эти вероятности считаются одинаковыми: $p_i(0) = 1/M$; $i = \overline{1, M}$. Средой, в которой функционирует автомат, является произвольная кривая $Q(x)$, которая реагирует не действие $x_i(r - 1)$ следующим образом:

$$y(r)=\begin{cases}1,\text{если} & Q\left[x_i(r-1)\right]\le Q^*\left(\text{выигрыш}\right);\\ 0,\text{если} & Q\left[x_i(r-1)\right]>Q^*\left(\text{штраф}\right).\end{cases} \qquad (3)$$

Здесь $Q^* = \min Q_j^*\ (1 \le j \le M;\ i \ne j)$;

$$Q_j^* = \min\left[A_\infty,\ Q[x_j(r-1)]\right], \qquad (4)$$

где A_∞ – положительное большое число, например верхняя оценка значений $Q(x)$;

$Q[x_j(r-1)]$ – наименьшее из значений функции $Q(x)$.

Идея поиска глобального экстремума функции при помощи вероятностного автомата с переменной структурой основана на таком перераспределении вероятностей p_i, чтобы состояние S_k соответствовало подынтервалу $[(x_k - \omega/2),\ (x_k + \omega/2)]$ (ω – ширина подынтервала), который содержит точку глобального экстремума. Значение вероятности в этом случае

$$p_k(r+1)=\max_{1\le i\le M} p_i(r+1). \qquad (5)$$

Выполнение этого условия обеспечивает асимптотически оптимальное поведение автомата, при котором с заданной точностью ε выполняется система неравенств

$$\begin{aligned}&[p_k(r)-1]\le\varepsilon,\text{если } Q[x_k(r)]<Q[x_j(r)];\\ &p_j(r)\le\varepsilon \text{ для } j=1,\overline{M},\ j\ne K.\end{aligned} \qquad (6)$$

В этом случае поведение автомата при $r \to \infty$ характеризуется условием

$$p_k(r)>p_j(r),\text{если } Q[x_k(r)]<Q[x_j(r)]. \qquad (7)$$

Условия, выраженные зависимостями (6) и (7), используют в качестве условий окончания поиска глобального экстремума.

Изменение вектора вероятностей $\overline{p}(r)$ можно характеризовать линейной моделью Буше – Мостеллера. Для формализации понятий «выигрыш» и «штраф» результат испытаний в точке $x_i(r)$ на r-м шаге поиска сравнивается с элементом $Q^*_{\min}=\min\limits_{1\le i\le M} Q^*$ (при минимизации функции). Тогда величину входа автомата $y(r+1)$ определяют по аналогии с условием по зависимости (3). На каждом шаге поиска $\overline{p}(r)$ преобразуется по формулам

$$\overline{p}(r+1)=\overline{T}_p(r);\quad \sum_{i=1}^{M} p_i(r+1)=1. \qquad (8)$$

Значение $\overline{T}$ может быть определено в виде преобразования Буше–Мостеллера:

$$\overline{T} = \lambda I+(1-\lambda)A(r), \qquad (9)$$

где I – единичная матрица;

λ – постоянная, определяющая размер шага поиска;

$A(r)$ – матрица одинаковых столбцов $\lambda(r)$ $(M \times M)$ ($\lambda(r)$ – вектор из M элементов, который определяет структуру автомата на каждом шаге).

Используя преобразование Буше–Мостеллера (9), в котором $\overline{T}$ является стохастической матрицей и вектор $\lambda(r)$ удовлетворяет условию $\sum_{i=1}^{M}\lambda_i(r) = 1$, можно вероятности выбора состояний $S_j\,(j = 1, \overline{M})$ перераспределить таким образом, чтобы вероятность появления i-го состояния, обеспечивающего выигрыш, увеличивалась, а при штрафе оставалась без изменений. С учетом этого разрабатывают стратегию поиска глобального экстремума и с помощью автомата Буше–Мостеллера составляют алгоритмы для имитационной модели какого-либо процесса в лесном комплексе.

В качестве примера можно рассмотреть оптимизацию параметров и режимов перемещения сошника лесной сеялки в почве. Вначале необходимо выполнить имитационное моделирование этого процесса. Для проведения многофакторного эксперимента из варьируемых показателей были взяты угловые параметры анкерного коробчатого сошника лесной сеялки СПП-3Ш в виде угла вхождения α и угла раствора боковых граней Θ. В качестве варьируемых режимных факторов выбраны глубина хода сошника a и плотность почвы p. Значения факторов и уровней их варьирования представлены в табл. 1.

Образование борозд на лесных почвах относится к сложным процессам. Поэтому для более полного его раскрытия было выбрано несколько оценочных критериев: тяговое сопротивление сошника R, показатель устойчивости хода в виде заглубляющего момента $M_з$, ширина зоны деформации сошника $B_д$, продольное смещение почвы в зоне движения сошника $l_{пр}$.

При оптимизации параметрических и режимных показателей работы сошника использовали композиционный B - план второго порядка, для

Таблица 1

Фактор	Обозначение		Интервал варьирования факторов, %	Уровни варьирования факторов				
	натуральное	нормализованное		Отрицательное звездное плечо $(-\alpha)$	Нижний (-1)	Центр эксперимента (0)	Верхний $(+1)$	Положительное звездное плечо $(+\alpha)$
Угол вхождения в почву, град	α	x_1	20	40	50	60	70	80
Угол раствора боковых граней, град	θ	x_2	20	30	40	50	60	70
Глубина хода сошника, см	a	x_3	3	4	5,5	7	8,5	10
Твердость почвы, Н/см^2	p	x_4	9,9	1,2	4,35	9,9	15,45	21

построения матрицы которого планировалось проведение 31 опыта (N), включая восемь звездных точек ($2K$) и семь опытов в центре плана (n_0). Уменьшение систематической ошибки достигалось рандомизацией опытов. Полученное уравнение регрессии для плана Бокса имеет вид

$$y = a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_5x_5 + a_6x_6 + a_7x_1x_4 + a_8x_2x_3 + \\ + a_9x_2x_4 + a_{10}x_3x_4 + a_{11}x_1^2 + a_{12}x_2^2 + a_{13}x_3^2 + a_{14}x_4^2 + a_{15}. \quad (10)$$

Это уравнение решали с помощью стандартного пакета MIC POSTA. Уравнение регрессии для критерия y_2 (M_3) составляли в соответствии с (10). Для остальных критериев уравнения регрессии представляли в виде функции $y = e^z$, где Z раскрывали по выражению (10).

После расчета данных регрессионного анализа по указанной программе с учетом значимости коэффициентов были получены следующие уравнения:

$$y_2 = -0{,}229x_1 + 0{,}027x_2 + 1{,}13x_3 + 0{,}043x_4 + 0{,}002x_1^2 + \\ + 0{,}0014x_2^2 + 0{,}001x_1x_2 - 0{,}008x_2x_3 - 0{,}006x_3x_4; \quad (11)$$

$$Z_1 = 0{,}0715x_1 + 0{,}049x_2 + 0{,}843x_3 - 2{,}4x_2^2 + 0{,}9x_1x_2 - 0{,}7x_2x_3 - 5{,}97; \quad (12)$$

$$Z_3 = -0{,}011x_1 - 0{,}015x_2 + 0{,}057x_3 + 0{,}002x_4 + 0{,}0001x_1^2 + \\ + 0{,}0002x_3^2 - 0{,}0003x_1x_4 + 3{,}636; \quad (13)$$

$$Z_4 = 0{,}051x_1 + 0{,}035x_2 + 0{,}083x_3 + 0{,}003x_4 - 0{,}004x_1^2 + \\ + 0{,}0003x_1x_2 - 0{,}0001x_1x_4 + 0{,}0007x_4 + 2{,}368. \quad (14)$$

Экстремальные точки целевых функций находили изложенным методом стохастических автоматов по составленному алгоритму глобального поиска экстремумов функции с использованием преобразования Буше–Мостеллера. В соответствии с этим алгоритмом была разработана и программа оптимизации.

Трудность решения данной конкретной задачи оптимизации (что потребовало применения специального метода стохастических автоматов) заключается в том, что оптимальные значения варьируемых факторов существенно разнятся в зависимости от принятых оценочных критериев (табл. 2).

Например, оптимальные значения углового параметра α получены в области, близкой к минимуму по критериям y_1 и y_2: $\alpha = 40{,}17...41{,}94°$ – по y_1 и $\alpha = 40{,}07...42{,}81°$ – по y_2. В то же время по критериям y_3 и y_4 оптимальные значения α, напротив, смещены в область максимума: $\alpha = 59{,}97...79{,}80°$ – по y_3 и $\alpha = 77{,}39...79{,}77°$ – по y_4.

Такой разброс оптимумов α, в частности, объясняется тем, что при малых углах α облегчается скольжение почвы и снижается R. Наблюдаемое при этом удлинение носка сошника приводит к росту M_3 за счет добавочного давления вниз деформируемой почвы. Но при малых углах α возрастают размеры зоны скалывания почвы, а это приводит к увеличению $B_д$ и $l_{пр}$. Поэтому по критериям y_3 и y_4 оптимумы смещаются в области максимальных значений.

Таблица 2

Фактор	Обозначение натуральное	Обозначение кодированное	Глубина хода сошника, см	Оптимальные значения факторов по критериям y_1	y_2	y_3	y_4
Угол вхождения в почву, град	α	x_1	4	40,17	40,07	77,35	77,39
			6	41,90	41,41	79,80	79,68
			10	41,94	42,81	59,97	79,77
Угол раствора боковых граней, град	θ	x_2	4	30,05	67,77	48,64	30,44
			6	68,21	69,99	45,53	31,17
			10	68,80	69,78	36,61	31,35
Глубина хода сошника, см	a	x_3	-	4,13	4,07	4,01	4,21
Твердость почвы, Н/см^2	p	x_4	4	6,08	6,98	20,98	20,06
			6	6,25	6,14	19,55	20,15
			10	6,48	6,05	6,24	17,67

Как видно из табл. 2, оптимальные значения углового параметра Θ также неоднозначны по разным y_i и даже при разной глубине хода сошника a_i. При небольшой величине a = 4 см по критерию y_1 получается минимальное значение Θ = 30,05°. При таком угле Θ создаются лучшие условия для скольжения почвы, что приводит к снижению R. Но при a = 6...10 см оптимум Θ смещается в сторону больших углов, равных 68,21...68,80°. Это объясняется тем, что при малых углах Θ значительно возрастает длина боковых граней сошника и соответственно площадь их контакта с почвой, что приводит к увеличению R. Такая же закономерность была выявлена нами при исследованиях деформаций почвы с помощью специального сошника с динамометрическими датчиками [3]. Снижение R с ростом Θ приводит к увеличению заглубляющего момента $M_з$, и оптимум Θ по критерию y_2 смещается в область больших углов Θ: Θ = 67,77...69,99°. Минимальные значения $B_д$ и $l_{пр}$ получены при небольших значениях Θ = 36,61...48,64° – по критерию y_3 и Θ = 30,44...31,35° – по критерию y_4. Создание лучших условий для скольжения почвы при этих значениях Θ ведет к меньшему вспучиванию почвы в зоне работы сошника и меньшему ее протаскиванию.

В то же время в сложном процессе работы сошника имеют место однозначные явления. Так, достаточно определенным можно считать получение оптимума по всем критериям y_i для небольшой величины a. Чем меньше глубина хода сошника, тем меньше его тяговое сопротивление, размеры зон деформаций почвы и лучше заглубляемость сошника. Выявляется и малозначимое влияние отдельных факторов. Так, твердость почвы p при всех выбранных нами режимах работы сошника не оказывает существенного влияния на изменение критериев y_i, о чем, кроме данных табл. 2, свидетельствует отсутствие члена с x_4 в уравнении регрессии (12). Предварительное уплотнение почвы только несколько положительно сказывается на снижении размеров зон деформации почвы – оптимальные значения $B_д$ и $l_{пр}$ получены при p = 17,67...20,88 Н/см^2, т. е. при значениях p, близких к максимальному p = 21 Н/см^2.

Поскольку анализируемое оптимизационное поле содержит несколько, в том числе разнящихся по знакам, экстремумов, потребовалось ввести обобщенный критерий с количественной оценкой значимости каждого частного критерия.

Для свертки отдельных критериев в обобщенный можно применять способ, основанный на взвешивании каждого из них [2]. Вес отдельного критерия устанавливают в зависимости от его важности для качества работы сошника. При посеве лесных семян большое значение имеет выдерживание постоянной глубины их заделки. Поэтому наиболее существенным следует считать способность сошника устойчиво перемещаться на любой заданной глубине. С учетом этого максимальный вес устанавливают для критерия y_2, оценивающего заглубляющие свойства сошника по моменту $M_з$, а далее по степени значимости располагаются остальные критерии: k_2 = 0,45; k_3 = 0,25; k_1 = 0,2; k_4 = 0,1. В этом случае обобщенный критерий y определяют по формуле

$$\begin{aligned} y &= k_1 y_1 + k_2 y_2 + k_3 y_3 + k_4 y_4 = \\ &= 0{,}2 y_1 + 0{,}45 y_2 + 0{,}25 y_3 + 0{,}1 y_4 . \end{aligned} \tag{15}$$

Данные расчетов по обобщенному критерию приведены в табл. 3.

Оптимизация по обобщенному критерию y для различных режимов работы сошника по глубине a = 4...10 см позволила выйти на достаточно узкие оптимизационные интервалы : α = 40,46...42,94°, Θ = 68,97...69,61°. Твердость почвы при этом оказалась в пределах от 6,2 до 11,4 Н/см^2.

Аналогичные сложные противоречивые процессы наблюдаются при взаимодействии рабочих органов машин не только с такой анизотропной средой, как почва, но и с древесиной, которая также обладает неоднородными свойствами. Поэтому аналогичные трудности ожидают исследователей при обосновании параметров и режимных показателей рабочих органов машин на лесосечных работах, нижних лесных складах, при комплексной переработке древесины и т. п.

Таблица 3

Фактор	Обозначение		Оптимальные значения факторов по обобщенному критерию y при a, см		
	натуральное	кодированное	4	7	10
Угол вхождения в почву, град	α	x_1	40,46	42,83	42,94
Угол раствора боковых граней, град	θ	x_2	69,61	69,02	68,97
Глубина хода сошника, см	a	x_3	4,2	6,04	9,05
Твердость почвы, Н/см^2	p	x_4	11,14	6,74	6,62