

УДК 630.8765

**РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ РУБОК УХОДА ЗА ЛЕСОМ**

Петровский Владислав Сергеевич  
д.т.н., профессор

Мальшев Владимир Викторович  
к.с.-х.н., доцент

Мурзинов Юрий Валерьевич  
ассистент  
*Воронежская государственная лесотехническая академия, Воронеж, Россия*

Рассмотрены методы разработки математических моделей хода роста чистых одновозрастных древостоев. Разработано математическое обеспечение автоматизированных систем управления режимами рубок ухода за лесом с целевой функцией повышения производительности древостоев. Получены по результатам исследований численные оценки показателей эффективности АСУ режимами рубок ухода за лесом

Ключевые слова: МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ, ОПТИМИЗАЦИЯ, АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ, РУБКИ УХОДА, ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ДРЕВОСТОЕВ

UDC 630.8765

**DEVELOPMENT OF AN AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF MODES OF FOREST CLEANING CUTTING**

Petrovskiy Vladislav Sergeevich  
Dr.Sci.Tech., professor

Malyshev Vladimir Victorovich  
Cand.Sci.Arg., associate professor

Murzinov Yury Valerjevich  
assistant  
*Voronezh State Academy of Forestry and Technologies, Voronezh, Russia*

In the article the methods of the development of mathematical models of growth of even-aged stands is considered. We have developed the mathematical provision of the automated control systems (ACS) of modes of cleaning cutting of a forest with the target function of the productivity of forest stands. We have also obtained the numerical performance of the ACS modes of forest cleaning cuttings by means of the results of the experiments

Keywords: MATHEMATICAL MODELS, OPTIMIZATION, AUTOMATION CONTROL SYSTEMS, CLEANING CUTTING, PRODUCTIVITY OF FOREST STANDS

Современные технологии лесного хозяйства предъявляют все более высокие требования к мероприятиям повышения производительности древостоев, направленные на увеличение объёмов стволовой древесины с 1 га за 1 год лесовыращивания. Рубки ухода за лесом являются в этой проблеме основным лесохозяйственным мероприятием, при котором удаляются ослабленные, отставшие в росте деревья. Оставленные после рубок ухода деревья получают условия интенсификации роста, что позволяет приблизить сплошную рубку при повышении производительности древостоев [2,3].

Проблема создания эффективной системы автоматизированного управления и проведения рубок ухода за лесом представляется весьма актуальной. Она решает задачи оптимизации увеличивающейся возрастной

площади питания деревьев, обеспечивающей наиболее эффективное накопление стволовой древесины древостоев. Для решения этой проблемы необходимо:

- провести моделирование хода роста, например чистых одновозрастных насаждений Ia, I, II, III классов бонитета с определением возраста технической спелости по заданному диаметру древостоя с учетом проведенных рубок ухода;

- выполнить оптимизацию режимов рубок ухода с различной периодичностью и интенсивностью изреживаний по критерию максимального объема заготавливаемой стволовой древесины с 1 га за 1 год лесовыращивания [3] путем реализации оптимальной динамики возрастания площадей питания деревьев.

Проведенные нами исследования [1, 3] дали возможность получить:

- математические модели возрастной динамики общего текущего прироста стволовой древесины растущей части в насаждении;

- динамику запасов разрезаемых древостоев;

- модели возрастного изменения средней высоты, среднего диаметра контрольного и разрезаемого древостоя;

- модели изменения количества деревьев на 1 га в зависимости от возраста и геометрических моделей древесных стволов и их параметров [2, 3, 4].

Все эти динамические модели показателей хода роста чистых сосновых древостоев представлены обыкновенными линейными дифференциальными уравнениями второго порядка с постоянными коэффициентами ( $T_1$  и  $T_2$ ) [4]:

$$T_1 T_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + (T_1 + T_2) \frac{dy}{dt} + y = y_{\text{конеч.}} \quad (1)$$

Общее и частное решение этого дифференциального уравнения имеет вид:

$$y(t) = y_{\text{конеч.}} \left[ 1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t}{T_1}} + \frac{T_2}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t}{T_2}} \right], \quad (2)$$

где  $t$  – возраст древостоя, лет;

$y(t)$  – численные значения таксационного показателя древостоя в возрасте  $t$ ;

$y_{\text{конеч.}}$  – конечные значения таксационных показателей в возрасте сплошной рубки ( $T_c$ , лет);

$T_1, T_2$  – постоянные времени (меры инерционности) показателей молодого и приспевающего возраста древостоев.

Графическая интерпретация возрастной динамики изменения таксационных показателей древостоя представлена на рис. 1, который отражает динамику роста показателей насаждений от начального до конечного возраста, при котором происходит сплошная рубка деревьев.

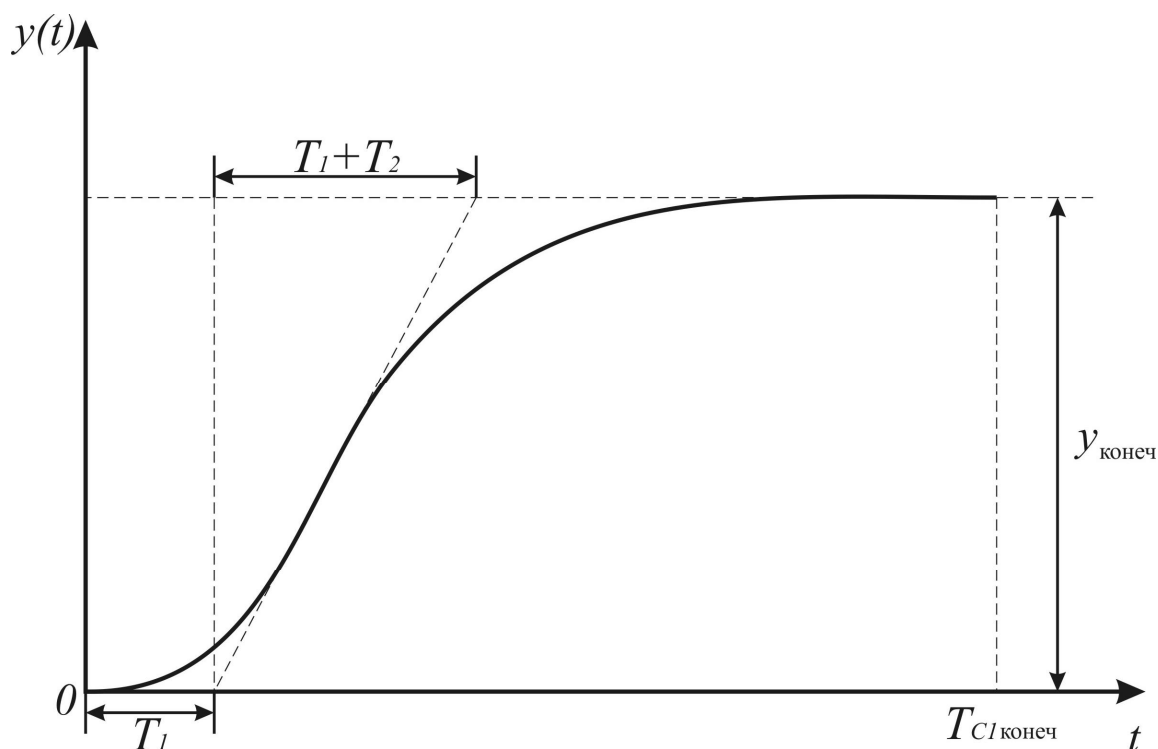


Рис.1. График возрастного изменения таксационных показателей неразрезаемых древостоев.

$T_{c1конеч.}$  – возраст сплошной рубки древостоев и графическое определение постоянных времени динамики переходного процесса роста

таксационных показателей  $T_1$  и  $T_2$  дает определенные погрешности. Целесообразно, используя таблицы хода роста древостоев, определить величины  $T_1$  и  $T_2$  для уравнения (2) методом наименьших квадратов.

На рис. 2 рассмотрим графики возрастного изменения, например запас ствольной древесины на 1 га  $V(t)$  контрольного (неразрезаемого) древостоя и древостоя, где рубками ухода (разреживанием) обеспечивается оптимальная возрастная динамика площади питания деревьев.

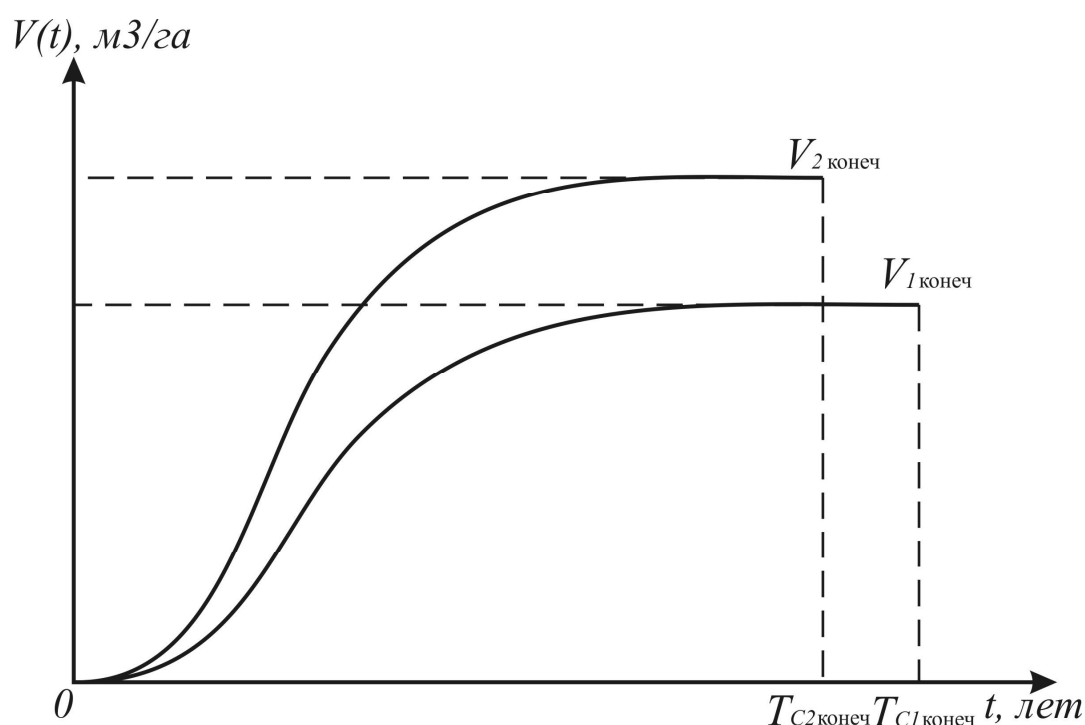


Рис. 2. Графики возрастной динамики накопления запаса ствольной древесины на 1 га  $V(t)$  контрольного (неразрезаемого) древостоя  $V_1(t)$  и разреживаемого древостоя с оптимальными режимами рубок ухода  $V_2(t)$ , обеспечивающими оптимальное возрастание площади питания деревьев.

Графики рис. 2 показывают, что реализация системы оптимального возрастания площади питания деревьев дает возможность увеличить производительность древостоев  $\Delta V = V_{2\text{конеч.}} - V_{1\text{конеч.}}$ , м<sup>3</sup>/га и снизить возраст технической спелости насаждений  $T_c = T_{c1\text{конеч.}} - T_{c2\text{конеч.}}$ , лет.

Но возраст технической спелости зависит от заданного целевого диаметра технической спелости древостоев, который определяется целевым назначением лесовыращивания, например, на выпуск пиловочника, баланса и др.

Для решения этой проблемы авторы провели исследования и получили численные оценки показателей эффективности режимов рубок ухода за лесом.

Разработаны алгоритмы, программное обеспечение моделирования хода роста одновозрастных сосновых насаждений с оптимизацией режимов проведения рубок ухода за лесом [3]. Всё это дало возможность решить проблему оптимизации режимов рубок ухода и конечной сплошной рубки с максимизацией среднегодового пользования стволовой древесиной с реализацией целевой функции управления лесовыращиванием:

$$Q = \frac{V_c + \sum_p V_p}{T_c} \rightarrow \max \quad (3)$$

где  $Q$  – объем пользования стволовой древесиной, м<sup>3</sup>/га в год;

$V_c$  – запас стволовой древесины разреживаемого древостоя на момент сплошной рубки, м<sup>3</sup>/га;

$\Delta V_p$  – объем вырубленной древесины от  $p$ -ой рубки ухода, м<sup>3</sup>/га;

$T_c$  – возраст насаждения на момент заключительной, сплошной рубки, лет;

$p$  – количество рубок ухода за лесом, шт.

Проведенные исследования и расчеты показали эффективность лесовыращивания с проведением рубок ухода при максимизации выхода стволовой древесины с 1 га за 1 год лесовыращивания (табл. 1).

Таблица 1 – Показатели эффективности рубок ухода за лесом в сосновых одновозрастных древостоях

Класс бонитета		Ia	I	II
Оптимальный целевой диаметр технической спелости $D_{ц}$ , см		35	35	36
Для вариантов с рубками ухода	$T_{с2}$ , лет	71	74	77
	$Q$ , м <sup>3</sup> /га/год	10,9	9,7	8,4
Для вариантов без рубок ухода	$T_{с1}$ , лет	82	91	113
	$Q$ , м <sup>3</sup> /га/год	8,1	6,7	5,2
Снижение возраста технической спелости разреживаемого насаждения по сравнению с контрольным, лет		11	17	36
Увеличение среднегодового объема пользования стволовой древесиной для вариантов с рубками ухода по сравнению с контрольным, м <sup>3</sup> /га/год		2,8	3,0	3,2

Представленные в таблице 1 результаты показывают реальную эффективность оптимизации режимов рубок ухода за лесом в чистых одновозрастных сосновых древостоях.

Таблица 2 – Рубки ухода за лесом для целевого диаметра технической спелости 24 см

Класс бонитета I	Рубки ухода (прореживания)			Сплошная рубка
	25	33	41	
Возраст насаждения, лет	25	33	41	52
Средний диаметр, см	10,2	14,8	19,1	24,4
Средняя высота, м	10,1	14,6	18,6	23,4
Количество деревьев на 1 га	3024	1672	1127	775
Запас стволовой древесины на 1 га, м <sup>3</sup>	130,4	199,4	269	363,6
Процент выборки по запасу, %	23	17	17	100
Объем вырубki, м <sup>3</sup> на 1 га	30,0	33,9	45,8	363,6
Количество удаляемых деревьев на 1 га	1352	545	352	775
Производительность древостоев, м <sup>3</sup> /га/год	9,103			
Площадь питания остающихся деревьев, м <sup>2</sup>	6	8,9	13	13

Научный и практический интерес представляют результаты исследований возрастной динамики роста оптимальной площади питания деревьев в зависимости от класса бонитета и целевого диаметра деревьев технической спелости.

Таблица 3 – Рубки ухода за лесом для целевого диаметра технической спелости 34 см

Класс бонитета I	Рубки ухода (прореживания)			Сплошная рубка
	25	35	49	
Возраст насаждения, лет	25	35	49	72
Средний диаметр, см	10,2	16,0	23,6	34,3
Средняя высота, м	10,1	15,7	22,7	31,2
Количество деревьев на 1 га	3024	1470	793	432
Запас стволовой древесины на 1 га, м <sup>3</sup>	130,4	217,4	339,6	508,4
Процент выборки по запасу, %	29	27	27	100
Объем вырубki, м <sup>3</sup> на 1 га	37,8	58,7	91,7	508,4
Количество удаляемых деревьев на 1 га	1554	677	361	432
Производительность древостоев, м <sup>3</sup> /га/год	9,676			
Площадь питания остающихся деревьев, м <sup>2</sup>	6,8	12,6	23,0	23,0

Таблица 4 – Рубки ухода за лесом для целевого диаметра технической спелости 38 см

Класс бонитета I	Рубки ухода (прореживания)			Сплошная рубка
	25	37	54	
Возраст насаждения, лет	25	37	54	79
Средний диаметр, см	10,2	17,3	26,6	37,8
Средняя высота, м	10,1	17,0	25,4	33,7
Количество деревьев на 1 га	3024	1288	634	358
Запас стволовой древесины на 1 га, м <sup>3</sup>	130,4	235,7	379,4	549,1
Процент выборки по запасу, %	35	31	25	100
Объем вырубki, м <sup>3</sup> на 1 га	45,8	73,1	94,8	549,1
Количество удаляемых деревьев на 1 га	1736	654	276	358
Производительность древостоев, м <sup>3</sup> /га/год	9,653			
Площадь питания остающихся деревьев, м <sup>2</sup>	7,7	15,8	28,0	28,0

Полученные результаты определяют оптимальное количество вырубаемых и оптимальное количество оставляемых деревьев. Эти показатели зависят от целевого диаметра и технической спелости древостоев.

Таблица 5 – Рубки ухода за лесом для целевого диаметра технической спелости 40 см

Класс бонитета I	Рубки ухода (прореживания)			Сплошная рубка
	25	37	54	
Возраст насаждения, лет	25	37	54	84
Средний диаметр, см	10,2	17,3	26,6	39,8
Средняя высота, м	10,1	17,0	25,4	35,0
Количество деревьев на 1 га	3024	1288	634	329
Запас стволовой древесины на 1 га, м <sup>3</sup>	130,4	235,7	379,4	577,0
Процент выборки по запасу, %	35	31	29	100
Объем вырубki, м <sup>3</sup> на 1 га	45,8	73,1	94,8	549,1
Количество удаляемых деревьев на 1 га	1736	654	305	329
Производительность древостоев, м <sup>3</sup> /га/год	9,593			
Площадь питания остающихся деревьев, м <sup>2</sup>	7,7	15,9	30,4	30,4

После проведения исследований и расчетов по Ia, I, II классам бонитета получены интересные для науки и практики результаты. В качестве примера для I класса бонитета по трем целевым диаметрам технической спелости сосновых древостоев полученные результаты показаны в таблицах 2–6.

Таблица 6 – Рубки ухода за лесом для целевого диаметра технической спелости 44 см

Класс бонитета I	Рубки ухода (прореживания)				Сплошная рубка
	25	37	56	72	
Возраст насаждения, лет	25	37	56	72	97
Средний диаметр, см	10,2	17,3	27,8	35,1	43,6
Средняя высота, м	10,1	17,0	26,4	31,9	37,2
Количество деревьев на 1 га	3024	1288	584	405	287
Запас стволовой древесины на 1 га, м <sup>3</sup>	130,4	235,7	394,1	509,4	638,5
Процент выборки по запасу, %	35	35	15	15	100
Объем вырубki, м <sup>3</sup> на 1 га	45,6	82,5	59,1	76,4	638,5
Количество удаляемых деревьев на 1 га	1736	704	179	118	287
Производительность древостоев, м <sup>3</sup> /га/год	9,300				
Площадь питания остающихся деревьев, м <sup>2</sup>	7,8	17,1	24,7	25,8	25,8



В качестве примера на рис. 3 показаны объёмы запасаемой древесины для хвойных насаждений различных бонитетов при различных условиях выращивания. На диаграмме видно, что выращивание сосновых насаждений с использованием АСУ ТП позволяет получить больший объём запасаемой древесины.

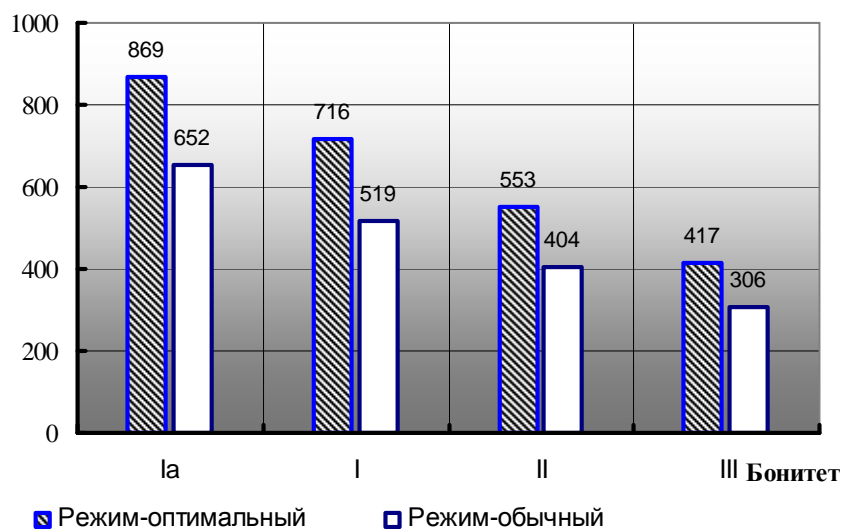


Рис. 3. Диаграмма сравнения объёмов запаса (для возраста завершающей рубки  $T = 80$  лет) разреживаемого (оптимального) и не разреживаемого (контрольного) сосновых насаждений для различных бонитетов

Проведенные исследования и научные разработки выполнялись в рамках проекта Федеральной целевой программы «Разработка информационных технологий эффективного управления рациональным лесопользованием для повышения производительности древостоев, с мониторингом и прогнозированием таксационных показателей, предотвращением техногенного лесоводственного ущерба от механизированных рубок ухода за лесом» № 2012-1.2.1-12-000-2007. Полученные результаты показали, что обеспечение деревьям оптимальной возрастной площади питания дает возможность для чистых одновозрастных древостоев:

- Ia, I, II классов бонитета снизить возраст технической спелости для целевого диаметра 35 см соответственно на 11, 17, 36 лет;

- увеличить производительность сосновых древостоев Ia, I, II классов бонитета соответственно на 2,7; 3; 3,4 м<sup>3</sup>/га/год.

- чем больше целевой диаметр технической спелости древостоев, тем больше оптимальная площадь питания деревьев;

- учёт класса бонитета, возраста древостоев и целевого диаметра технической спелости насаждений позволяет при использовании автоматизированных систем управления рубками ухода за лесом обеспечивать повышение производительности древостоев и снижается возраст их технической спелости.

## Литература

1. Малышев, В. В. Математическое моделирование и оптимизация режимов выращивания лесных культур сосны [Текст]: Монография / В. В. Малышев, В. С. Петровский, В. К. Попов, А. И. Журихин. – Воронеж: изд. ВГУ, 2004. – 211 с.
2. Петровский, В. С. Оптимальная раскряжовка лесоматериалов [Текст]: Монография / В. С. Петровский. – М.: Лесн. пром-сть, 1989. – 288 с.
3. Петровский, В. С. Автоматизированное проектирование режимов и выбора машин для проведения рубок ухода за лесом [Текст]: Монография / В. С. Петровский, В. В. Малышев, Ю. В. Мурзинов. – М.: Флинта: Наука, 2012. – 216 с.
4. Петровский, В. С. Автоматизированные системы учета лесоматериалов [Текст]: Монография / В. С. Петровский, М. В. Филиппов: М-во образования и науки РФ, ФГБОУ ВПО «ВГЛТА». – Воронеж, 2012. – 228 с.