

УДК 674.055:620.933

В.В. Раповец¹, И.К. Клепацкий¹, С.В. Медведев², Г.Г. Иванец²

(V.V. Rapovets¹, I.K. Klepackij¹, S.V. Medvedev², G.G. Ivanec²)

(¹БГТУ, ²ОИПИ, г. Минск, РБ)

E-mail для связи с авторами: dosy@bstu.unibel.by, medv@newman.bas-net.by

**РАСЧЁТ ПОЛЕЗНОЙ МОЩНОСТИ РЕЗАНИЯ
В ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СРЕДЕ LS-DYNA
ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ ДРЕВЕСИНЫ**

**CALCULATION OF USEFUL CUTTING CAPACITY
IN THE LS-DYNA CALCULATOR
AT THE HIGH-SPEED MILLING OF WOOD**

Объектом исследований являются математические методы мультипроцессорной вычислительной среды LS-DYNA для построения и анализа модели оптимизации технологических процессов при цилиндрическом фрезеровании древесины и древесных материалов.

Прогнозные предположения о развитии объекта исследования – полученные результаты выполнения НИР [1–4] – могут использоваться для моделирования и оптимизации параметров сложных высокоскоростных процессов механической обработки древесины и древесных материалов при выполнении научных исследований, что позволят существенно повысить эффективность действующего производства.

Changing the working conditions of the tool in each particular case leads to a change in the characteristics of the cutting process. To optimize high-speed processes it is necessary to model and develop methods for constructing the main dependencies of the technical and economic characteristics of such processes.

The object of the research is the mathematical methods of the multiprocessor computing environment LS-DYNA for constructing and analyzing the model of optimization of technological processes for cylindrical milling of wood and wood materials. Predictive assumptions about the development of the research object – the obtained results of the research can be used to model and optimize the parameters of complex high-speed processes of mechanical processing of wood and wood materials in the performance of scientific research that will significantly improve the efficiency of exist-ing production.

Основной целью проводимых исследований в рамках данной работы является разработка метода и математической модели многокритериальной оптимизации режимов деревообработки на основе базы данных зависимостей характеристик процесса резания от технологических режимов обработки, сформированной посредством натуральных и вычислительных экспериментов.

Разработана методика аппроксимации экспериментальных зависимостей и предназначена для использования в системах поддержки принятия решений при выборе оптимальных режимов высокоскоростной лезвийной обработки древесных материалов.

Научная значимость разработанных методик расчета мощности резания состоит в возможности ее прогноза с помощью суперкомпьютерных технологий.

Практическая направленность заключается в возможности применения разработанных методик при разработке баз данных оптимальных режимов резания для различных древесных материалов.

Экономическая эффективность работы заключается в снижении стоимости и длительности проведения натуральных экспериментов за счет моделирования процесса резания в высокопроизводительных вычислительных системах и многокритериальной оптимизации технологических параметров обработки.

В результате расчета в пакете LS-DYNA получается файл `srcforce`, содержащий значения сил в узлах закрепленного основания. Структура файла представлена на рисунке 1.

```

NUMBER3
      ls-dyna smp.113621 d      date 01/19/2017
single point constraint forces
output at time = 0.00000E+00

node= 1103588 local x,v,z forces = -2.3593E-07 -1.4610E-07 5.2416E-08 setid= 0
      force resultants = -2.3734E-03 3.8925E-02 -1.0487E-09
output at time = 6.40000E-01
node= 207611 local x,y,z forces = -3.8345E-08 -1.8892E-08 -6.8534E-09 setid= 0
node= 207612 local x,y,z forces = -3.9288E-08 -1.9050E-08 -6.9117E-09 setid= 0
node= 207613 local x,y,z forces = -4.0266E-08 -1.9264E-08 -6.9902E-09
    
```

Рис. 1. Структура файла `srcforce`

Данный файл обрабатывается с помощью программы LS-PREPOST. Получается график изменения суммы вертикальных составляющих силы для всех выбранных узлов, другими словами, вертикальной составляющей реакции опоры (рис. 2).

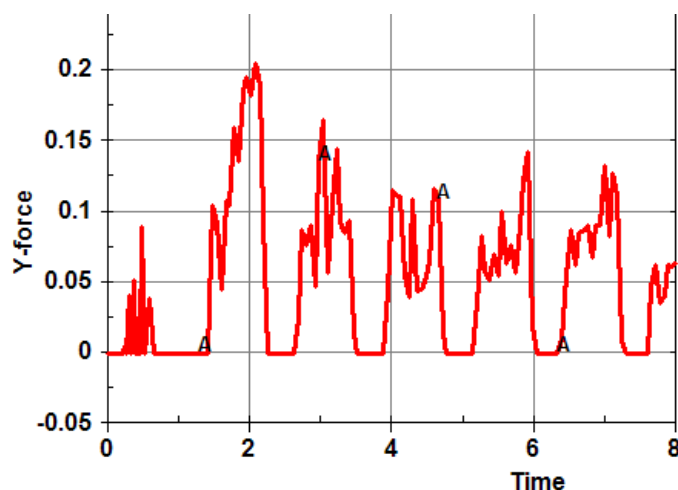


Рис. 2. График изменения силы при резании фрезой

График сохраняется в файле `y-force.txt` (рис. 3).

Значения меньше 0,0 001 Кн можно считать таковыми для времени, когда зуб не находится в контакте с заготовкой. Далее для каждого зуба в этом файле выделяется группа строк со значениями сил больших 0,0 001 Кн. В группу включается по одной ограничивающей строке в начале и в конце группы, где значения силы меньше 0,0 001 Кн (рис. 4).

```

Curveplot
NUMBER3
Time
Y-force
Node Ids
Comb. Y-force #pts=140
* Minval= -4.219534e-005 at time= 0.5200
* Maxval= 2.055270e-001 at time= 2.0800
0.000000e+000 0.000000e+000
4.000000e-002 0.000000e+000
1.000000e-001 0.000000e+000
1.600000e-001 0.000000e+000
2.100000e-001 -7.074328e-006
2.400000e-001 5.066515e-003
2.700000e-001 -1.697937e-008
3.000000e-001 4.120263e-002
3.300000e-001 -8.662589e-006
3.600000e-001 5.193780e-002
3.900000e-001 -1.539381e-005
4.200000e-001 -2.230025e-005
4.500000e-001 -1.653212e-008
4.800000e-001 9.002686e-002
    
```

Рис. 3. Структура табличной кривой изменения силы при резании фрезой

1.360000e+000	8.093764e-009
1.420000e+000	8.093764e-009
1.480000e+000	1.047329e-001
1.540000e+000	9.145191e-002
1.600000e+000	4.540900e-002
1.660000e+000	1.080350e-001
1.720000e+000	1.049544e-001
1.780000e+000	1.597973e-001
1.840000e+000	1.357684e-001
1.900000e+000	1.858765e-001
1.960000e+000	1.954544e-001
2.020000e+000	1.832061e-001
2.080000e+000	2.055270e-001
2.140000e+000	1.900487e-001
2.200000e+000	9.379216e-002
2.260000e+000	-8.602638e-008
2.320000e+000	-6.507162e-008

Рис. 4. Схема расчета угла ALFA

Данные из фрагмента заносятся в табличный файл EXCEL (рис. 5).

	A	B	C
1		1,42	0,00
2		1,48	0,10
3		1,54	0,09
4		1,60	0,05
5		1,66	0,11
6		1,72	0,10
7		1,78	0,16
8		1,84	0,14
9		1,90	0,19
10		1,96	0,20
11		2,02	0,18
12		2,08	0,21
13		2,14	0,19
14		2,20	0,09
15		2,26	0,00
16			

Рис. 5. Зоны приложения бокового давления, имитирующего предварительно-напряженное состояние обрабатываемой древесины после сушки

Фактически в столбцах $C[N-1]$, $C[N]$ и содержатся значения силы, которые соответствуют временному участку от $B[N-1]$ до $B[N]$, где N – номер строки. Значение $C[N]$ считается как мгновенное значение силы на этом участке.

Для нахождения мгновенной скорости в программе LS-PREPOST строится график перемещения вершины зуба. В качестве вершины выбирается центр округления резца. Нижнее положение зуба соответствует началу резания (рис. 6).

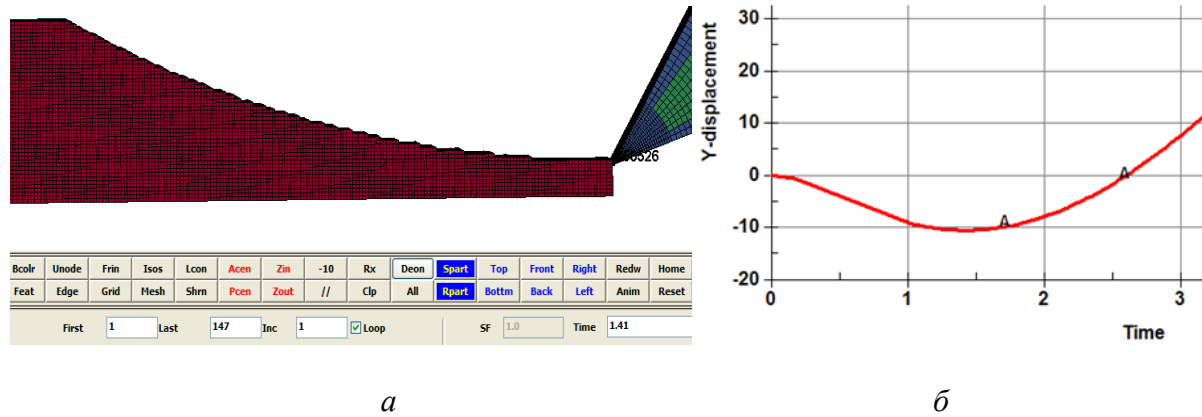


Рис. 6. Исходное состояние для второго зуба перед резанием (а) и график перемещения второго зуба по оси Y (б)

График сохраняется в виде файла табличной кривой $y - displzN$, где N – номер зуба. В сохраненном файле выделяется группа строк временного интервала, определенно на шаге измерения мгновенных сил. Отметки границ и разность времени между строками может незначительно отличаться от данных фрагмента для силы. При передаче данных в EXCEL табличный файл нужно и привести в соответствие с временными интервалами силы. Далее рассчитываются значения приращений по времени dt и перемещения dy . Для расчета перемещений используются средства программы EXCEL расчета данных столбцов по формулам.

Для каждого моделирования резания при заданных параметрах аналогичным образом выполняются расчеты средней мощности еще как минимум для трех зубьев (рис. 7).

t	y	dy	dt	v	t	F	v	N=F*v
2,68	-38,25	-0,03			2,74	0,09	0,487	0,042803
2,74	-38,22	0,03	0,06	0,487	2,80	0,08	1,465667	0,112527
2,80	-38,13	0,09	0,06	1,465667	2,86	0,09	2,362333	0,213289
2,86	-37,99	0,14	0,06	2,362333	2,92	0,05	3,397833	0,162453
2,92	-37,79	0,20	0,06	3,397833	2,98	0,14	4,192833	0,567915
2,98	-37,54	0,25	0,06	4,192833	3,04	0,17	5,136333	0,851706
3,04	-37,23	0,31	0,06	5,136333	3,10	0,06	6,311333	0,358744
3,10	-36,85	0,38	0,06	6,311333	3,16	0,11	7,067833	0,758344
3,16	-36,43	0,42	0,06	7,067833	3,22	0,15	7,9955	1,161095
3,22	-35,95	0,48	0,06	7,9955	3,28	0,09	8,872333	0,822226
3,28	-35,41	0,53	0,06	8,872333	3,34	0,09	9,803167	0,833623
3,34	-34,83	0,59	0,06	9,803167	3,40	0,09	10,62033	0,994248
3,40	-34,19	0,64	0,06	10,62033	3,46	0,02	11,53	0,177037
3,46	-33,50	0,69	0,06	11,53	3,52	0,00	12,34217	-1E-06
3,52	-32,76	0,74	0,06	12,34217			Среднее	0,470401

Рис. 7. Отчетные таблицы по расчету мощности резания

Далее проводятся вычислительные эксперименты для построения графиков и вывода аналитических зависимостей. Методика рассматривается на примере вывода закона изменения при постоянной скорости шпинделя 6 000 об/мин от скорости подачи. Принимается правило, что при наличии значений экспериментов для вывода формулы использовать нужно именно их. В программе EXCEL при построении графика выводим линию тренда вместе с уравнением и величиной достоверности аппроксимации (рис. 8–9).

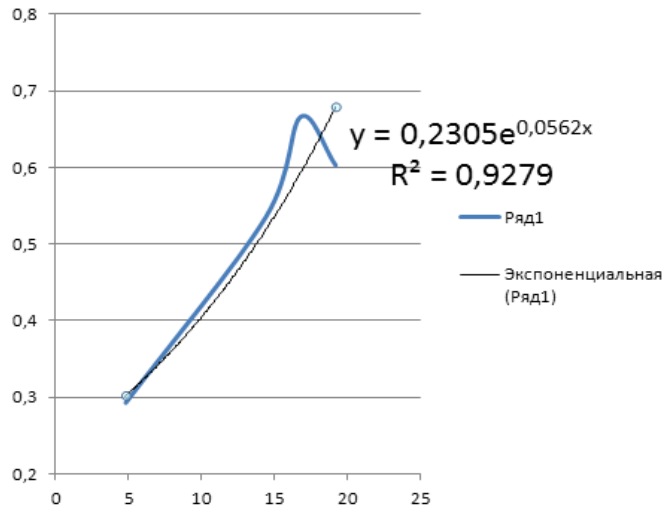


Рис. 8. Линия тренда по экспоненциальной зависимости

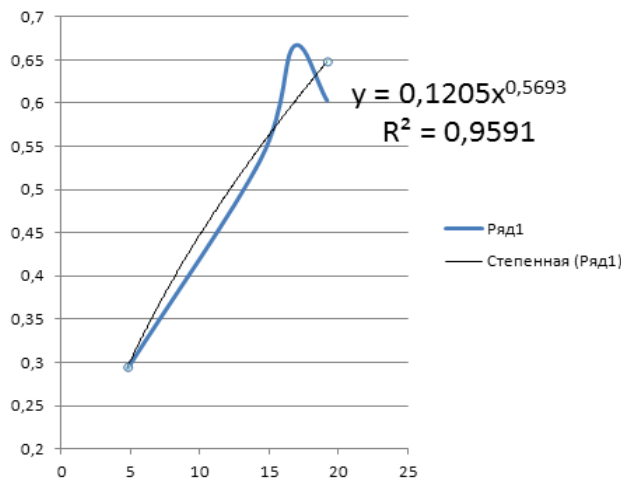


Рис. 9. Линия тренда по степенной зависимости

Исходя из величины достоверности аппроксимации, выбирают формулу аналитической зависимости $y = 0,1205 x^{0,5693}$.

При выводе зависимости мощности от скорости резания при постоянной подаче использовались данные виртуальных испытаний для оборотов шпинделя от 5 000 до 10 000 в минуту. Причем в первом случае данные натуральных испытаний не учитывались ввиду их малого количества для подачи 19,2 м/мин.

Получена формула полиномиальной зависимости:

$$y = 6e^{-12}x^3 - 2e^{-7}x^2 + 0,0015x - 3,787. \quad (1)$$

Во втором случае учтены данные натуральных испытаний, получилась формула (не учитывались ввиду их малого количества для подачи 19,2 м/мин). Получена формула полиномиальной зависимости:

$$y = 2e^{-12}x^3 - 7e^{-8}x^2 + 0,0009x - 2,3961. \quad (2)$$

Иллюстрация вывода формул показана на рисунке 10.

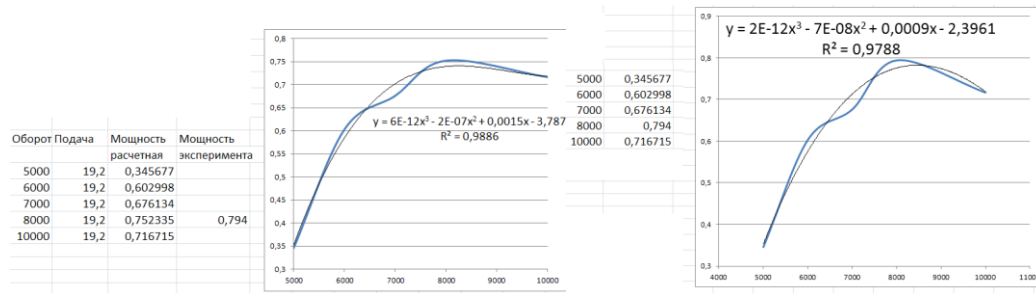


Рис. 10. Вывод формулы зависимости мощности резания от скорости резания (обороты шпинделя) при постоянной подаче 19,2 м/мин

Для другой толщины съема при тех же скоростях резания и подачи нужно проводить новые расчеты и выводить другие формулы. Так, для толщины слоя 3 мм получена формула полиномиальной зависимости:

$$y = 9e^{-5}x^2 + 0,0113x - 0,3047. \quad (3)$$

Вывод формулы зависимости мощности резания от подачи при постоянной скорости резания (обороты шпинделя 6 000 об/мин) и толщине снимаемого слоя 3 мм представлен на рисунке 11.

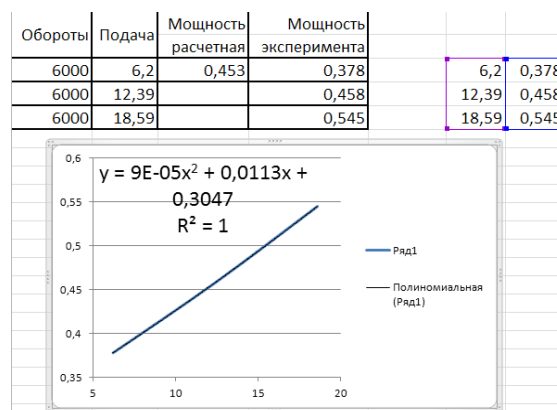


Рис. 11. Вывод формулы зависимости мощности резания от подачи при постоянной скорости резания (обороты шпинделя 6 000 об/мин) и толщине снимаемого слоя 3 мм

Таким образом, изменяя технологически значимые параметры высокоскоростного процесса лезвийной обработки и проводя соответствующие расчеты, описанные выше, по разработанным методикам в совокупности с экспериментальными данными, осуществляется формирование баз данных.

Выводы

Таким образом, представленная методика позволяет рассчитать мощность для заданных параметров режимов резания, сравнивать результаты расчета с мощностью, полученной в натуральных экспериментах при этих же режимах, верифицировать расчетную модель, а затем использовать расчетную модель для получения значений мощностей, при комбинации параметров, для которых не производились натурные испытания. Если проводить расчеты при одном изменяющемся параметре, зафиксировав остальные, то получаются данные, позволяющие строить графики зависимости мощности от значений этого параметра.

В программе EXCEL такой график можно аппроксимировать аналитической зависимостью. Аналитические зависимости можно использовать в системах оптимизации режимов резания с критерием оптимизации по мощности резания.

Библиографический список

1. Huang J.M. An Evaluation of Chip Separation Criteria for FEM Simulation of Machining // Journal of Manufacturing Science and Engineering. 1996. Pp. 545–554.
3. Методика моделирования процесса механической обработки древесных материалов фрезерованием в пакете LS-DYNA / В.В. Раповец, А.А. Гришкевич, С.В. Медведев, Г.Г. Иванец // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века: труды X Междунар. евразийск. симпозиума. Екатеринбург, 2015. С. 170–176.
4. Вычислительные эксперименты высокоскоростной лезвийной обработки древесины / В.В. Раповец, И.К. Клепацкий, С.В. Медведев, Г.Г. Иванец // Труды БГТУ. 2017. № 2 (198): Лесная и деревообаб. пром-сть. С. 360–364.

УДК 676.05(06)

В.П. Сиваков, С.Н. Вихарев
(V.P. Sivakov, S.N. Vikharev)
(УГЛТУ, г. Екатеринбург, РФ)

E-mail для связи с авторами: sivakov.vp@yandex.ru

ОБОСНОВАНИЕ РЕМОНТА ОБОРУДОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВА ЦЕЛЛЮЛОЗЫ И ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ МАССЫ МЕТОДАМИ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

THE RATIONALE FOR THE REPAIR OF EQUIPMENT THE PRODUCTION OF CELLULOSE AND THERMO MECHANICAL PULP METHODS OF TECHNICAL DIAGNOSTICS

В работе рассмотрены модели обоснования ремонтов оборудования производства целлюлозы и термомеханической массы. Показано, что модель обоснования ремонтов на основе диагностирования технического состояния узлов элементов обладает существенным преимуществом, так как в этой модели не применяют событие «отказ» оборудования. Оценку работоспособного состояния оборудования производят в режиме эксплуатации с некоторым запасом по времени до события «отказ». Предложено при диагностировании сложные объекты условно расчленять на элементы, а элементы – на узлы. Такой подход позволяет по параметрическому диагнозу узлов производить последующие непараметрические диагнозы элементов. Показано, что при