

**А.М. Ханов, А.Е. Кобитянский, А.В. Шафранов,
А.В. Пепельшев**

Пермский государственный технический университет

ПРОГРАММА ПО РАСЧЕТУ ДИНАМИКИ ШПИНДЕЛЬНЫХ УЗЛОВ НА ОПОРАХ КАЧЕНИЯ

Изложены структура и особенности программы расчета динамики шпиндельного узла с учетом параметричности и нелинейности его математической модели.

В работах [1, 2] представлена математическая модель динамики шпиндельных узлов на опорах качения, учитывающая взаимосвязь между электродвигателем, передаточным механизмом, валом шпинделя и инструментом. Особенность этой модели заключается в учете параметричности и нелинейности коэффициентов жесткостей опор.

Соотношения, характеризующие уравнения движения системы, после ряда преобразований представляются в виде:

$$[A] \times [\ddot{Y}] + [B(Y, t)] \times [\dot{Y}] + [C] \times [Y] + [F(Y, t)] = [Q(Y, t)],$$

где $[A]$ – матрица постоянных инерционных коэффициентов;

$[B]$ – матрица коэффициентов демпфирования;

$[C]$ – матрица коэффициентов жесткостей системы;

$[F]$ – вектор-столбец параметрических и нелинейных составляющих коэффициентов жесткостей правой и левой опоры шпинделя;

$[Q]$ – вектор-столбец обобщенных сил.

Следует отметить, что вектор $[Q]$ формируется с учетом заданной схемы резания (подвод инструмента, врезание и т.д.).

Изучение системы шпиндельных узлов и оценка влияния различных параметров на динамическую точность процесса обработки осуществляется в процессе математического моделирования. С этой целью разработана программа, позволяющая в диалоговом режиме проводить соответствующие расчеты.

В основу метода решения выбран метод Рунге – Кутты четвертого порядка. Алгоритм решения задачи представлен на рис. 1.

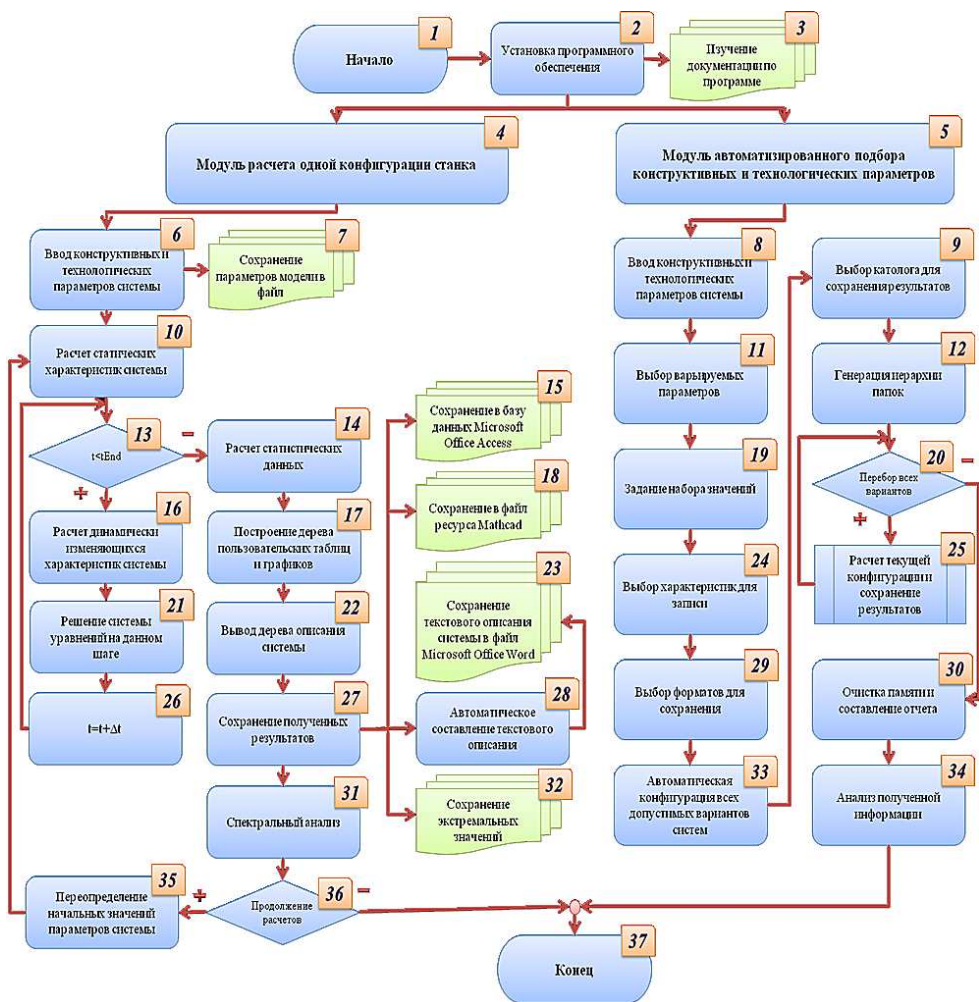


Рис. 1. Принципиальный алгоритм решения задачи

Процесс расчета содержит два основных модуля:

- 1) расчет и прогнозирование виброхарактеристик существующих шпиндельных узлов (рис. 1, блок 4);
- 2) подбор режимов резания и проектирование элементов конструкции шпиндельных узлов (рис. 1, блок 5).

Решение задач первого модуля состоит из трех частей: задание параметров модели, расчет, вывод и анализ результатов моделирования, а именно: виброперемещений, виброскоростей, виброускорений, спектров собственных частот характерных точек шпинделя и инструмента и силовых характеристик опор. Весь расчет модели условно можно разделить на две части: расчет статических параметров системы (рис. 1, блок 10); расчет динамически изме-

няющихся параметров (рис. 1, блок 16) и решение системы уравнений (рис. 1, блоки 13, 21, 26).

После расчета системы дифференциальных уравнений производится статистическая обработка результатов (рис. 1, блок 14), спектральный анализ (рис. 1, блок 31) и составляется текстовое и графическое описание системы (рис. 1, блоки 17, 22). Предусмотрено разбиение и расчет на относительно небольшие интервалы по времени (рис. 1, блоки 35, 36). Для обработки результатов моделирования в различных пакетах предусмотрен ряд вариантов сохранения (рис. 1, блоки 15, 18, 23, 32).

Алгоритм реализации задач второго модуля по автоматизированному подбору конструктивных и технологических параметров заключается в следующем: на первом этапе вводятся параметры системы (рис. 1, блоки 8, 11, 19). После этого формируется план численного эксперимента и составляется иерархия папок (рис. 1, блоки 12, 33). Расчет всех комбинаций проводится по алгоритму, представленному выше (рис. 1, блок 4) с анализом полученной информации (рис. 1, блок 34).

Предложенный алгоритм осуществлен в виде пакета программ. Разработка программного обеспечения велась средствами языка программирования C# в среде разработки Visual Studio.NET. Пакет предназначен для решения конструкторских и технологических задач, связанных со шпиндельными узлами (проектирование конструкции, выбор режимов резания и т.д.).

Для корректной работы производится установка необходимых приложений (в том числе .Net Framework), в автоматическом режиме. Контекстная справка позволяет в кратчайшее время обучиться работе с программой. Для ввода параметров модели доступны два варианта: ввод вручную и загрузка из файла. Произвольное расположение инструмента, опор и передачи позволяет использовать модель для большого спектра шпиндельных узлов. От выбора шага интегрирования по времени зависит устойчивость системы. Поэтому следует обратить особое внимание на выбор шага интегрирования. Предлагается автоматическое деление шага с учетом заданной погрешности.

При написании программы каждый пункт структурной схемы реализован в виде совокупности классов, интерфейсов и делегатов. Использование классов-«одиночек» позволило разделить ввод, вывод и расчет модели на независимые части, что дает возможность, при необходимости, в кратчайшие сроки адаптировать программу под любую операционную систему (MS DOS, Linux, Unix, Windows 95 и т.д.).

Решение систем методом Рунге – Кутты написано в виде динамически подключаемой библиотеки. Система уравнений передается в виде списка делегатов, это позволяет использовать DLL для решения любых задач.

В рамках интерактивного взаимодействия с пользователем осуществляется удобный ввод и вывод данных. Для вывода результатов используются таблицы (рис. 2), графики (рис. 4), замедленная анимация процесса (рис. 3) и текстовое описание системы. Интуитивно понятный интерфейс облегчает работу с программой. Сохранение/открытие параметров системы позволяет в кратчайшие сроки без редактирования программы произвести моделирование различных шпиндельных узлов и сохранение удачных вариантов конструкции и обработки. В программе реализовано сохранение результатов расчета в различные форматы данных (базы данных, текстовые файлы, файлы ресурсов MathCad), что обеспечивает широкий круг вариантов дальнейшей обработки результатов моделирования [3]. В качестве примера на рис. 2–4 представлены фрагменты результатов моделирования динамики шпиндельных узлов станка 3В642 в процессе плоского шлифования.

№	t (с)	ω1 (с/с)	ω2 (с/с)	x1 (мм)
max	0	+0.57539	+0.31082	+0.00039200516484449
min	0	+0.94529	+0.19213	+0.00041416317868319
0	0	0	0	0
10	0.0001	2.7607371408517E-06	1.22691646923025E-05	3.1895856030293E-05
20	0.0002	1.2738307279864E-05	4.78219196794762E-05	0.00010889368800772
30	0.0003	2.84909479371752E-05	0.00014427898597232	0.000195148045292421
40	0.0004	4.7871659975482E-05	0.000175481405497202	0.000292103277444296
50	0.0005	6.42737401616564E-05	0.000247262244939579	0.00027176297671484
60	0.0006	7.0152636987643E-05	0.00029887511259418	0.00029319389026989
70	0.0007	6.2492048154495E-05	0.00016963381938333	9.3051902399734E-05
80	0.0008	4.44198421911247E-05	0.00002321428210891	-2.27151367110113E-05
90	0.0009	2.15102084682081E-05	0.00002497637226078	-0.0001487541741104
100	0.001	4.4405449320637E-06	0.000163282661497629	-0.000128345979495362
110	0.0011	-1.8191715765026E-07	3.36989901804611E-05	5.79657911943192E-05
120	0.0012	4.81991060604462E-06	3.86412552336327E-05	5.51328340315493E-05
130	0.0013	1.34898321281418E-05	2.832914946795E-06	0.00016694400307855
140	0.0014	1.9298765924014E-05	-1.0348379142387E-05	0.0002914205841802
150	0.0015	1.32513003541872E-05	-2.3393966643344E-06	0.00024533841634882
160	0.0016	-8.292814902313E-06	2.3409501283381E-05	0.00014280611183519
170	0.0017	-3.2663990324529E-05	6.340297230404E-05	3.646896464195E-05
180	0.0018	-5.97313827247022E-05	0.000102824142693	-5.688878989387E-05
190	0.0019	-8.142310964515E-05	0.00015411661356146	-9.0097867871468E-05
200	0.002	-8.9333793920393E-05	0.000129057752776	-3.737993041398E-05
210	0.0021	-8.35051948442364E-05	0.00018665148350323	7.4094371241198E-05
220	0.0022	-6.87153490410002E-05	0.00016302421220162	0.00019421488751104
230	0.0023	-4.03958181098108E-05	0.0001028448734814	0.0002953404051303
240	0.0024	-1.43661587357413E-05	7.23624179853145E-05	0.00031046071813312
250	0.0025	2.2100122094211E-05	3.8443070957455E-05	0.0002673737632477
260	0.0026	5.6478993435787E-05	1.9157102632329E-05	0.00016934917699496
270	0.0027	4.8991049706484E-05	2.4725295331217E-05	6.62443650741148E-05
280	0.0028	9.9096079281086E-05	5.3041764034958E-05	-7.0282989400978E-06
290	0.0029	9.21593740519781E-05	0.0001003207403214	-1.88607046207E-05
300	0.003	6.94296041979199E-05	0.00016210591927515	3.1690303579923E-05
310	0.0031	4.1717642853888E-05	0.000027413306899769	0.0001180071979815
320	0.0032	1.54321972506416E-05	0.00002421915296109	0.00018938672817399
330	0.0033	-7.904796299381E-07	0.0001182500303896	0.000289889192719
340	0.0034	-1.194410381112E-06	0.00031723329087579	0.00020001204881344
350	0.0035	9.96291382685910E-06	0.00027739849324488	0.0001101087027853
360	0.0036	2.30207931974615E-05	0.0000269547069484	-2.048071927192E-06
370	0.0037	3.341012577169E-05	0.00012543267606802	-0.000140703819404604
380	0.0038	8.62051435099448E-05	4.26578786902626E-05	-0.0001460480152179
390	0.0039	2.6422149520309E-05	-1.91917420819342E-05	9.074461199306E-05
400	0.004	6.03940340312676E-06	-5.932553382358E-05	1.23421636840105E-05
410	0.0041	-1.6882310232348E-05	-7.184471907173E-05	0.0001367444383918
420	0.0042	-3.766404839262E-05	5.93649404814932E-05	0.000271798903065
430	0.0043	-5.30449210949889E-05	-1.3812913806432E-05	0.000270789846769594
440	0.0044	-5.80989781933564E-05	4.8279561201811E-05	0.00023251689448607
450	0.0045	-5.476783494329E-05	0.0001256423404519	0.000130089911706
460	0.0046	-4.879219388134E-05	0.000107008784969371	3.1480070767642E-05

Рис. 2. Фрагмент таблицы результатов моделирования

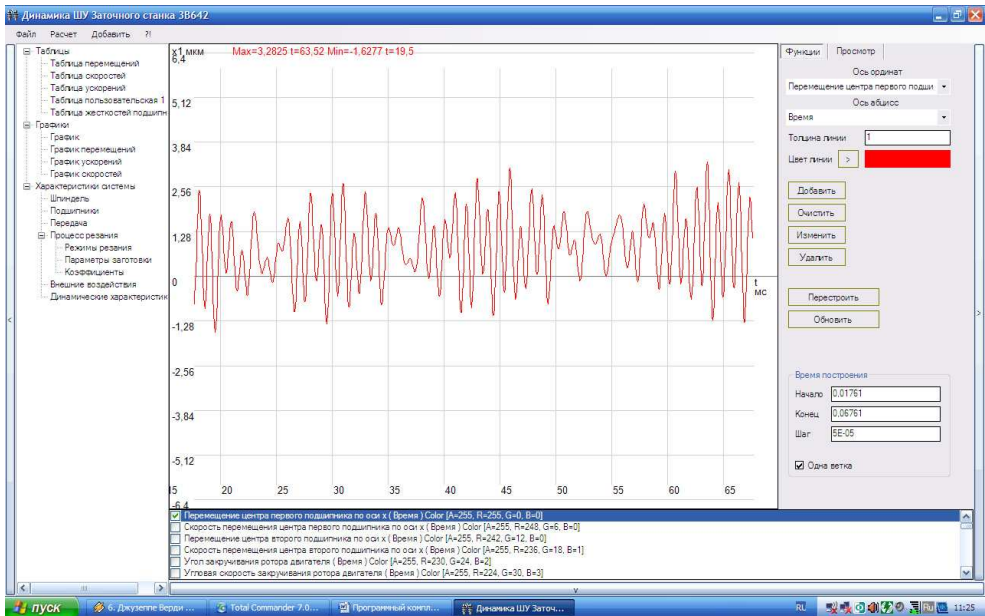


Рис. 3. Фрагмент графика виброперемещения центра левой опоры

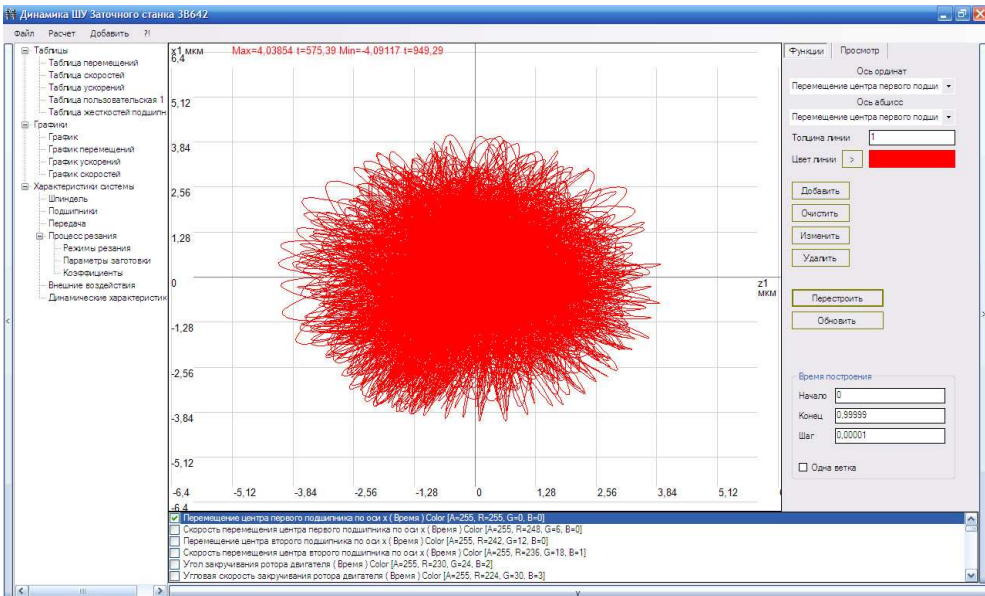


Рис. 4. Траектория движения центра левой опоры

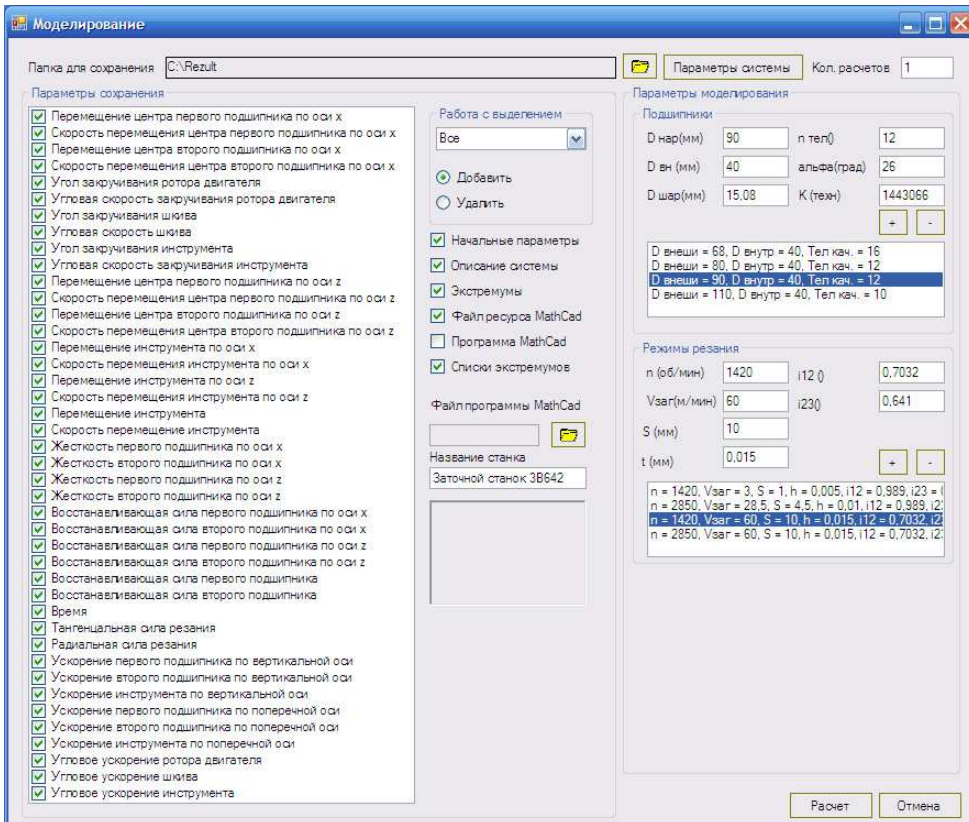


Рис. 5. Модуль автоматизированного подбора конструктивных и технологических параметров системы

Модуль автоматизированного подбора конструктивных и технологических параметров системы (рис. 5) позволяет минимизировать время на проектирование шпиндельных узлов. После ввода параметров системы и выбора варьируемых величин автоматически составляется план численного эксперимента. В процессе расчета автоматически формируется иерархия каталогов и сохраняется характеристика системы для последующего анализа. Применение этого модуля позволяет значительно сократить время для подбора рациональных параметров системы.

По результатам выполненной работы можно заключить следующее: алгоритм и программный комплекс позволяют с помощью математического моделирования проводить анализ влияния конструктивных и технологических параметров на динамические характеристики шпиндельных узлов.

Список литературы

1. Моделирование и натурные испытания шпиндельных узлов металло-режущих станков / А.М. Ханов [и др.] // СТИН. – 2009. – № 12. – С. 2–5.
2. Система для имитационного моделирования динамики шпиндельных узлов / А.М. Ханов [и др.] // Прогрессивные технологические процессы в машиностроении: материалы междунар. науч.-техн. конф., 30 ноября 2007 г. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2007. – С. 233–239.
3. Автоматизированный расчет динамических характеристик узлов технологических систем / А.М. Ханов [и др.] // Перспективные технологии и материалы: материалы междунар. науч.-техн. конф., Пермь, 24 ноября 2008 г. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – С. 463–471.

Получено 15.03.2010