

- kompleksnoj pererabotki othodov. Diss. ...d-ra tekhn. nauk.- Nizhnij Novgorod, 2016.-571s.
7. Karastelev B. YA. Kompleksnaya tekhnologiya termicheskogo obezvrezhivaniya sudo-vyh stochnyh i neftesoderzhashchih vod./Avtoref. diss. ... d-ra tekhn. nauk. – Vladivostok.-2000. – 40s.
 8. Reshnyak V.I. Issledovanie processa obrazovaniya stochnoj vody na sudah/ V. I. Reshnyak S. E. Posashkova, K. V. Reshnyak// ZHurnal universiteta vodnyh kommunikacij. — 2010. —№ 4 (1). — S. 97-103.
 9. Ermoshkin N.G. Sudovye ustanovki oчитki neftesoderzhashchih vod. Metody i skhemy oчитki, ustrojstvo i ekspluatatsiya /Ermoshkin N.G. Kalugin V.N., Komilov E.V., Kuleshov I.N: spravochnoe posobie. Odessa: Feniks, 2004. 44 s.
 10. Kuzubova L.I., Morozov S.V. Oчитka neftesoderzhashchih stochnyh vod: Analit. obzor SO RAN. GPNTB, NIOH. – Novosibirsk, 1992. – 72s.
 11. Pisarev A. O. Metodika proektirovaniya ob"edinennoj sistemy oчитki sudovyh stochnyh i neftesoderzhashchih vod./ Avtoref. diss. ...k.t.n.- Nizhnij Novgorod, 2010.-24s.
 12. Evonov YU.I. Zarubezhnye separacionnye ustanovki dlya oчитki l'yal'nyh vod. M., 1980, vyp.1, - s. 36.
 13. Adel'shin A. A. Modelirovanie processov i razrabotka ustanovok oчитki neftesoderzhashchih stochnyh vod na osnove ispol'zovaniya zakruchennyh potokov./ Avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk. -Penza – 2009. -23s.
 14. Tkachenko I.V. Oчитka neftesoderzhashchih vod morskikh sudov metodom gidro-dinamicheskoy superkavitatsii potoka // Universum: Tekhnicheskie nauki : elektron. nauchn. zhurn. 2018. № 3(48) . Internet-resurs. URL: <http://7universum.com/ru/tech/arc-hive/item/5656> (data obrashcheniya 01.07.19).
 15. Pat. RF №2341407. Sposob oчитki l'yal'nyh i stochnyh vod ot nefteproduktov i drugih zagryaznenij i ustrojstvo dlya ego osushchestvleniya./ Tunitovskij V. V. In-ternet- resurs: URL: <http://www.freepatent.ru/patents/> (data obrashcheniya 22.05.19).
 16. Utkin E. YU. Sovershenstvovanie tekhnologii oчитki sudovyh neftesoderzhashchih vod sposobom elektrokoagulyatsii//diss. ... kand. tekhn. nauk. SPb. 2003.- 198 s.
 17. Sudovye ustanovki oчитki neftesoderzhashchih vod. Osobennosti konstrukcii i princip dejstviya. / Internet-resurs.URL: <http://mirmarine.net/svm/541-sudovye-ustanovki-ochistki-neftesoderzhashchikh-vod-osobennosti-konstruktsii-i-printsipa-dejstviya>.
 18. Ustanovki ONV. / Internet- resurs. URL: <http://www.ekos.su/ohb.html> (data obrashcheniya 17.08.19.).
 19. Plotnikova E. G. Bakterii-destruktory aromatischeskikh uglevodorodov i ih hlорproizvodnyh: raznoobrazie, osobennosti metabolizma, funktsional'naya genomika. Avtoref. diss. d-ra biol. nauk.- Perm', 2010.- 49s.
 20. Pat. RF № 2412913. Sposob oчитki vody ot nefti i nefteproduktov /A.M. Netrusov, A.I. Semenov, E.V. Semenova i dr. Opubl. 27.02.2011. Byul. № 6.
 21. A.A. Vetrova. Sravnitel'naya effektivnost' degradatsii nefteproduktov kon-sorciumom plazmidosoderzhashchih shtammov-destruktorov i biopreparatami «MikroBak», «Bioojl»/ Vetrova A.A. Ivanova, A.E. Filonov, V.A. i dr. // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta Estestvennye nauki. 2013. Vyp. 2. CH.1. S. 258–272.
 22. Ryabceva N.D. Sposobnost' kul'tury CANDIDA SP. k biodegradatsii nefte-produktov./ Ryabceva N.D., Nikitina V.S., Kadirov A.A., Abdullin M.I. // Vestnik Bash-kirskogo universiteta. 2015.- T. 20, №4- c.1227-1229.
 23. Pat. RF №2 674 893. Associatsiya shtammov mikroorganizmov Pseudomonas humanen-sis i Acinetobacter baumannii dlya oчитki sudovyh l'yal'nyh vod ot nefteproduktov./Loginov YA. O. i dr. Opubl.: 2018.12.13.

УДК621.874

DOI: 10.34046/aumsuomt93/17

ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЖИЗНЕННОМ ЦИКЛЕ ИЗДЕЛИЙ И АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СУДОСТРОЕНИЯ

А.В.Гринек, кандидат технических наук, доцент

И.П. Бойчук, кандидат технических наук, доцент

Ю.Г.Косолап, кандидат технических наук

В статье рассмотрено сквозное численное моделирование и схема управления жизненным циклом судостроительных изделий, использующая комплекс моделей и связанных с ними инженерных методик. Решен ряд задач расчета, построения и экспериментальной проверки оптимальной геометрии поверхности изделий на примере винта; генерации управляющей траектории для станка; вибрационного моделирования оборудования. Выявлена связь точности механической обработки с упругими деформациями обрабатываемого винта. Разработаны динамические модели составляющих технологической системы, на основании которых возможна виртуальная их имитация, а, значит, оптимизация и адаптивное управление технологическими параметрами. Данный подход реа-

лизован в адаптивной системе управления температурно-силовым состоянием винтов при механической обработке. В алгоритмах использован аппарат нечеткой логики. Комплекс полученных решений может быть сопряжен с существующими системами поддержки жизненного цикла изделия судостроительной отрасли в виде цифровых прототипов.

Ключевые слова: PLM, судостроение, цифровая модель, технология, система управления, винт, механическая обработка, динамический анализ, оборудование

The article considers through numerical modeling and product lifecycle management. The scheme is based on complex models and technologies. Calculation of the optimal geometry of the surface of the products on the example of a screw; generating a control path for the machine; vibration modeling equipment. The relationship between the accuracy of machining and the elastic deformations of the machined screw is revealed. Dynamic models of the components of the technological system are developed. Based on them, a virtual simulation of production, optimization and adaptive control of technological parameters is possible. This approach is implemented in an adaptive system for controlling the temperature and power state of screws during processing. The algorithms used fuzzy logic apparatus. The complex of the obtained solutions can be interfaced with the existing life-cycle support systems for products of the shipbuilding industry in the form of digital prototypes.

Key words: PLM, shipbuilding, digital model, technology, control system, screw, processing, dynamic analysis, equipment

Введение

Жизненный цикл изделий судостроения включает в себя проектные работы, касающиеся непосредственно функциональных возможностей самого изделия, конструкторско-технологической подготовки производства, организации деятельности участков и цехов, обслуживания и эксплуатации, а также утилизации. Существующие системы PLM, начиная от конструкторских и проектных расчетов и заканчивая логистикой предприятия, вполне решают данные задачи. Однако, использование комплекса цифровых технологий, задач имитационного и численного моделирования, может существенно расширить границы современного производства и повысить его эффективность.

Понятие «цифровой двойник» включает в себя комплекс междисциплинарных задач, подходов к описанию и моделированию, классифицированных и выстроенных в определенную иерархию. Такие технологии могут использоваться как при геометрическом моделировании самого объекта, так и при создании виртуального двойника его создания (технологии) и эксплуатации (динамических, статических режимов, а также внешних неконтролируемых возмущений технологических систем).

Современные компании, разрабатывающие средства PLM, поддерживают и внедряют идею виртуальной или дополненной реальности на производстве. При этом существует обратная связь между данными из систем автоматизированного проектирования технологического процесса и ходом виртуального численного эксперимента. Таким же образом поддерживается функционирование автоматизированной адаптивной системы управления технологическим оборудованием [1, 2].

Однако подобные глобальные проекты и технологии требуют детальной проработки, базирующейся на классических методах математического численного моделирования, инженерного

анализа, построения автоматизированных систем управления.

В данной работе показана реализация конкретной интеллектуальной системы управления жизненным циклом изготовления изделия, включающая следующие взаимосвязанные элементы:

- численные модели динамики технологического процесса, а именно механической обработки;
- цифровую модель динамики технологического оборудования (пятиосевой обрабатывающий центр);
- цифровой прототип изделия – гребной винт;
- виртуальные модели, связывающие сложный характер взаимодействия системы «инструмент-оборудование-винт»;
- разработанные математические модели, связывающие показатели качества изделия с технологическими режимами;
- алгоритмы оптимизации технологического процесса;
- интеллектуальная система управления оборудованием на базе нечеткой логики.

На рис. 1 показана схема организации элементов всей конструкторско-технологической системы.

Комплекс полученных решений может быть сопряжен с существующими PLM-системами с целью расширения их функциональных возможностей. Полный комплексный подход к построению систем автоматизированного управления металлорежущим оборудованием предполагает решение ряда численных инженерных задач. Для этого необходимо рассмотреть вопросы интеграции расчетных модулей в существующие технологические цепочки «CAD – CAM – CAE». Например, на сегодняшний день хорошим примером такой автоматизации и интеграции является классификатор Teamcenter, объединяющий в совместном доступе и с наличием об-

ратных связей модуля NX CAM и единые базы кинематики станков, шаблонов управляющих программ и постпроцессоров.

Ниже подробно рассмотрены некоторые элементы предложенной и разработанной концепции управления жизненным циклом винта с использованием так называемых цифровых двойников.



Рисунок 1 – Система взаимосвязи цифрового моделирования и конструкторско-технологической подготовки производства

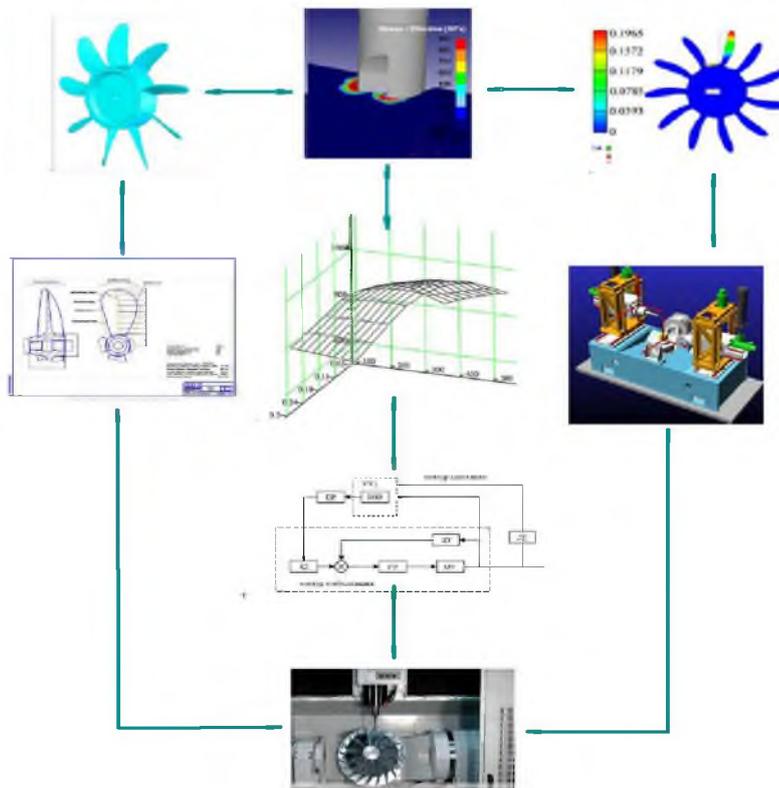


Рисунок 2 – Схема взаимодействия на примере разработанных численных моделей

1 Сквозное проектирование: от цифрового прототипа винтов до автоматизации управления механической обработкой

Винты представляют собой сложный с точки зрения технологического процесса и требований к качеству изготовления объект. Разработка винтов связана с целым рядом вопросов: динамикой, конструкцией и технологией изготовления, контролем. Наиболее действенным и эффективным путем обеспечения точности и качества является применение сквозной технологии автоматизированного проектирования, включающей в себя комплекс задач, связанных с моделированием функционирования объекта, моделированием технологического процесса его изготовления, опреде-

лением обратных связей в технологической цепочке и разработкой эффективных схем управления механической обработкой [3]. Необходима организация обратной связи с оборудованием, позволяющая управлять качеством механической обработки (рис. 3). Ниже приведен ряд элементов сквозного проектирования для винтов, начиная от расчета геометрии поверхности и заканчивая схемой управления траекторией инструмента.

3-D моделирование винта. Такие сложные объекты, с точки зрения конструктивного исполнения, требований к качеству и технологического процесса изготовления, как винты, требуют решения ряда задач, связанных с определением оптимальной геометрии поверхности.

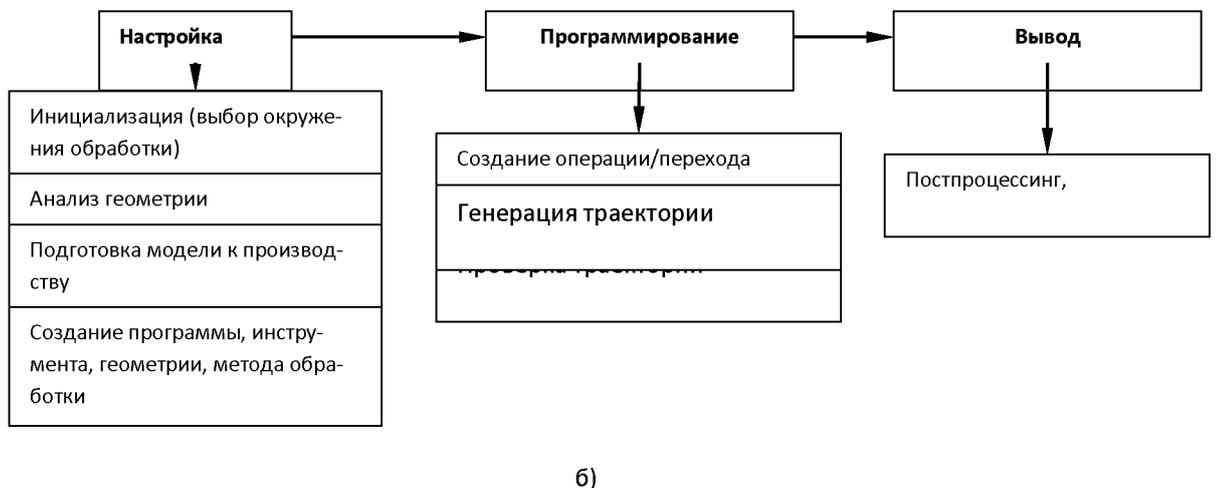
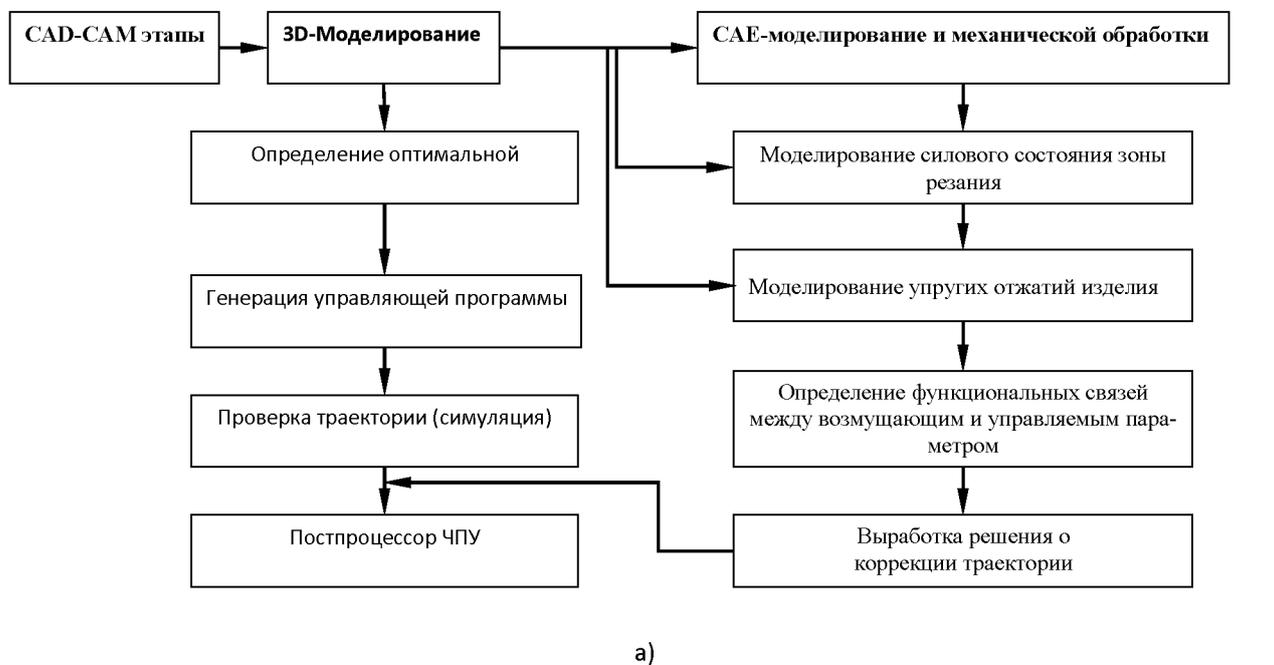


Рисунок 3 – Этапы разработки:
а – сквозное проектирование; б – генерация управляющей программы обработки винта

Генерация управляющей программы. На рис. 3 (а, б) приведена последовательность разработки управляющей программы для обрабатывающего центра на основе построенной трехмерной модели винта.

При решении вопросов, связанных с динамикой винта, определяется прочность винта и геометрия лопастей винта. Для создания трёхмерной параметрической модели лопасти составного винта был использован эскиз с таблицей координат сечений лопастей. Схема построения сечений представлена на рис. 4 (а). По данным эскиза лопастей при помощи сплайнов было сформировано

10 фрагментов сечений через определённые расстояния (рис. 4 (б)).

В модели ступицы по эскизу было задано 10 параллельных плоскостей. В каждую плоскость перенесли соответствующий фрагмент сечения лопасти, соблюдая пространственную ориентацию каждого сечения. После этого по сечениям было построено твердое тело с поверхностями двойной кривизны. На рис. 4 (в) представлена модель винта и показанная на рис. 4 (г) изготовленная опытная модель.

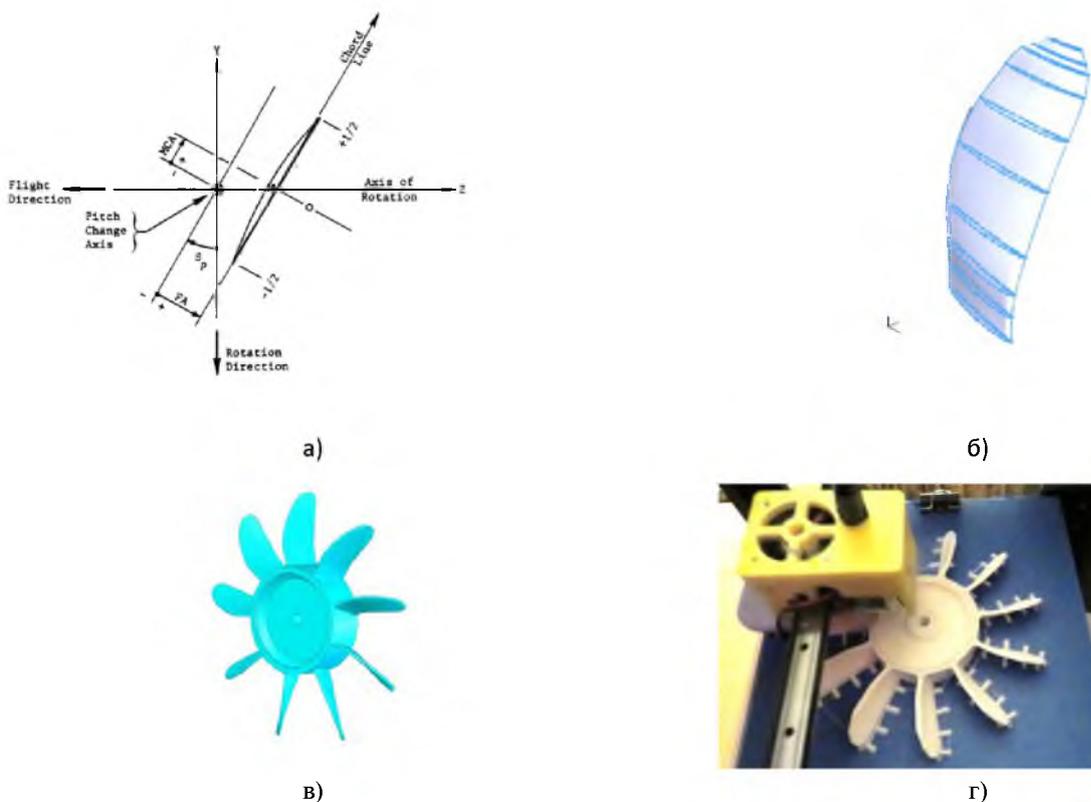


Рисунок 4 –Этапы создания винта: а - Схема построения сечения лопасти; б - формирование модели лопасти по отдельным сечениям; в - трехмерная модель винта; г - процесс печати опытной модели

Экспериментальные исследования. Винт для проверки правильности построенной геометрии был напечатан на принтере H-Vot из полимеров. Выполнена балансировка путём шлифования и нанесено лакокрасочное покрытие для обеспечения гладкости обтекаемых поверхностей. После экспериментальных исследований принято решение о принятии геометрических параметров[1].

Моделирование силового состояния зоны резания. Численное моделирование процесса стружкообразования при механической обработке дает следующие преимущества по сравнению с аналитическими и экспериментальными

методами исследования: получение полной трехмерной картины упруго-пластических, силовых процессов и процессов теплопередачи; получение информации о параметрах, недоступных для прямого или косвенного измерения [4,5,6]. Проведенное моделирование процесса фрезерования для определения силового состояния зоны резания позволило определить связь составляющих сил резания с технологическими режимами обработки. Силовые нагрузки, в свою очередь, являются исходными данными для задачи об упругой деформации заготовки винта в процессе обработки.

По результатам моделирования определена статическая составляющая силы резания [9]. Данная сила является частью исходных данных для решения задачи об упругой деформации лопасти винта, а также возмущающим воздействием в системе управления траекторией движения рабочего органа станка [5,6].

Определение взаимосвязи возмущения с технологическими режимами. Для решения задачи о погрешности механической обработки, связанной с упругой деформацией винта от сил резания, была решена статическая задача. На рис. 5 (а-в) показано моделирование обработки винта, динамика изменения силовой нагрузки на оборудование и величина смещений лопасти винта в зависимости от точки приложения силы резания.

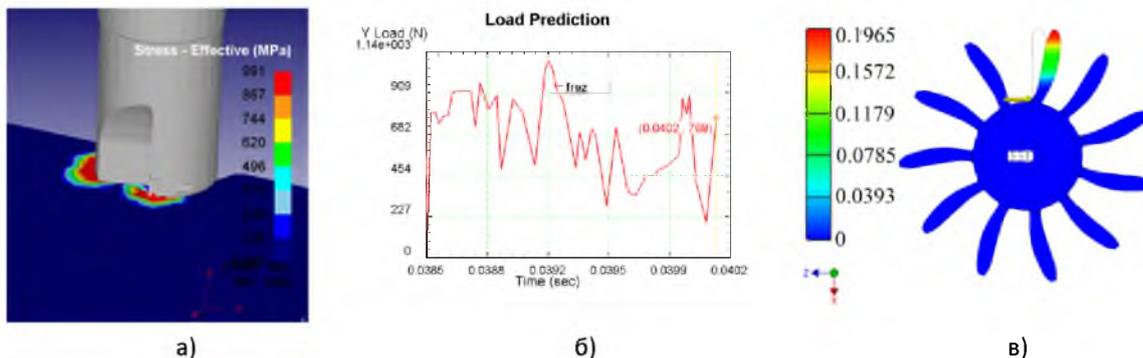


Рисунок 5 – Моделирование обработки винта: а – напряжения в зоне резания, МПа; б – изменение радиальной силы резания при фрезеровании, Н; в – суммарные перемещения обрабатываемой поверхности в зависимости от точки приложения силы резания на длине лопасти, мкм.

Определение на основе данных моделирования функциональной связи между погрешностью обработки и геометрией заготовки позволяет связать функционально, для описания в системе управления траекторией, возмущение с выходом системы – траекторией.

Система управления траекторией инструмента. Построение систем управления механической обработкой требует знаний о функциональных связях между выходным и входными параметрами, возмущающими воздействиями (в системе управления по возмущению). Возможно управление траекторией, например, по отклонению: система управления с обратной связью по координатам инструмента (рабочего органа) или

система управления с компенсацией возмущений, являющаяся разомкнутой. Комбинированные системы совмещают в себе достоинства управления обоих видов, но получение функциональных связей возмущения с выходом системы не всегда является простой задачей. На рис. 6 представлена в общем виде комбинированная схема управления траекторией режущего инструмента. Устройство управления определяет управляющее воздействие на основании отклонения инструмента от заданного положения (контур по отклонению) и учитывает функциональную связь наблюдаемого возмущения – силы резания с положением инструмента (управление по возмущению).

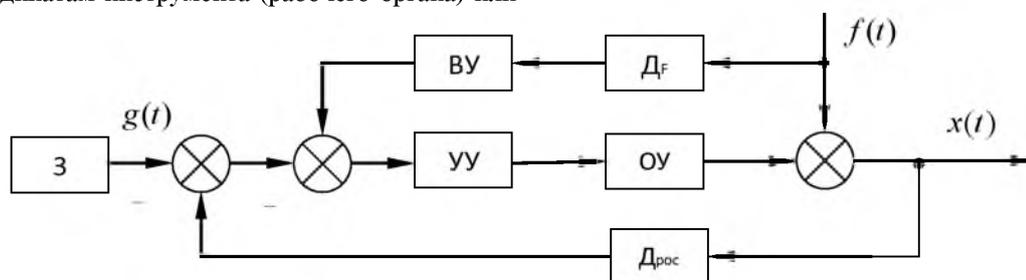


Рисунок 6 – Комбинированная схема управления траекторией рабочего органа станка: З – датчик траектории перемещения инструмента; УУ – устройство управления; ОУ – механическая обработка поверхности; ВУ – вычислительное устройство; ДФ – датчик силы резания; Дрос – датчик положения инструмента

Моделирование напряженно-деформированного состояния лопасти винта позволяет определить связь между возмущением в системе

управления (силой резания) и упругим отжатием лопасти винта, связав его далее с выходным параметром, положением рабочего органа станка. На

основании этой информации может осуществляться разомкнутое управление приводами станка. Кроме того, решение подобной задачи применительно к нежестким пространственным заготовкам сложной формы позволяет решать ряд конструкторско-технологических задач.

2. Конечно-элементное моделирование технологического процесса (частотный анализ)

Динамика изменения сил резания при фрезеровании имеет сложный колебательный характер в связи с периодическим изменением толщины удаляемого припуска, геометрией инструмента (формы режущей кромки, количества зубьев и прочих параметров), случайным и прогнозируемым изменением геометрии обрабатываемой поверхности (волнистости, шероховатости). Использование интенсивных режимов резания при черновом и получистовом фрезеровании сдерживается, главным образом, потерей динамической стабильности технологической системы.

Задача моделирования процесса стружкообразования решалась в трехмерной постановке с помощью конечно-элементного пакета. Этапы моделирования были стандартными: настройка решателя, построение геометрии, генерация сетки, решение. Особенностью расчетов для задач с разрушением является перестроение сетки на каждом шаге и, как следствие, повышенная ресурсоемкость. С целью получения динамики сил резания, вызываемой геометрической неточностью поверхности – волнистостью была решена задача с непостоянным припуском.

На рис. 7 (а, б) приведены результаты решения задачи с учётом изменяющейся геометрии заготовки – волнистости поверхности. При имитационном моделировании плоского фрезерования с учетом волнистости поверхности были получены графики изменения составляющих сил резания.

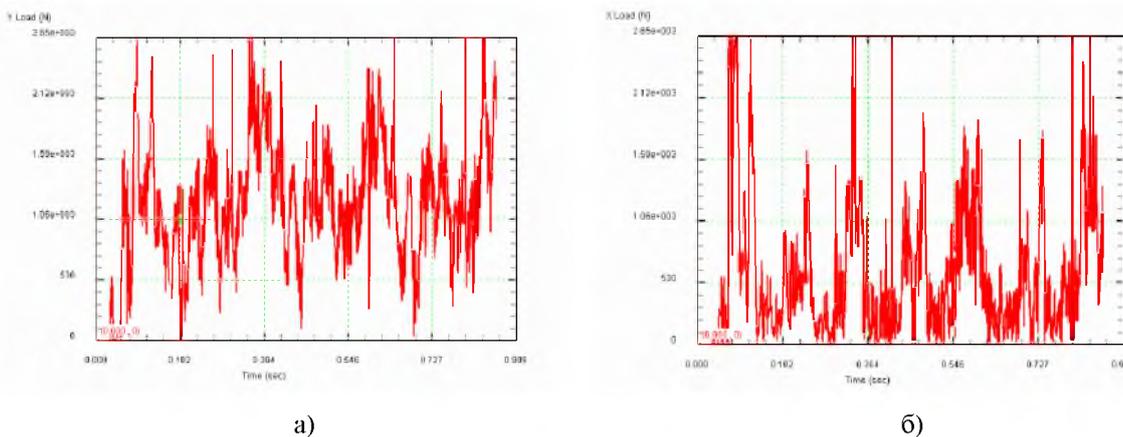


Рисунок 7 – Результаты решения задачи: а - составляющая силы резания Fx при скорости резания 80 м/мин при фрезеровании волнистой поверхности; б) - составляющая силы резания Fy при скорости резания 80 м/мин при фрезеровании волнистой поверхности

По результатам моделирования получено распределение спектра частот изменения нагрузки в зоне механической обработки. С помощью полученных коэффициентов могут быть получены аналитические функции, описывающие

составляющие силы резания для дальнейшей оптимизации технологического процесса. Например, на частоте вращения фрезы 470 об/мин получены функции, приведенные в таблице 1.

Таблица 1 – Распределения спектра частот изменения нагрузки в зоне механической обработки

Поверхность	Составляющая силы	Амплитуды А, Н			Частоты f, Гц		
		A ₁	A ₂	A ₃	f ₁	f ₂	f ₃
Плоская поверхность	Fx	2708	1094	882	4	13	17
	Fy	1900	948	630	4	17	13
Волнистая поверхность	Fx	914	370	318	7	10	4
	Fy	508	706	390	4	7	20

Полученные характеристики должны соотноситься с динамическими характеристиками обо-

рудования и позволяют определять производственные и оптимальные по критерию качества изделий режимы.

3. Динамический вибрационный анализ технологического оборудования

Данная методика анализа частотных характеристик может быть применена для металлорежущих станков любой группы и типа. Вибрации, возникающие при механической обработке деталей, приводят к снижению качества обрабатываемой поверхности, надежности работы, износу оборудования и режущего инструмента. Исследование динамических характеристик станка позволит исключить совпадение собственных и возмущающих частот в станочной системе, повысить виброустойчивость, в частности, за счет управления режимами резания [10] или оптимизации конструкции.

В данной работе объектом исследования являлся пятиосевой горизонтальный двухшпиндельный обрабатывающий центр с числовым программным управлением. Для создания виртуальной модели станка выбрана система моделирования MSC.Adams вследствие возможности интеграции с системами конечно-элементного моделирования, пакетом математического анализа MathLab и наличия специализированного модуля для проведения частотного анализа Adams/Vibration.

Несущая система станка включает четыре агрегатных модуля (рис. 7, а). На станине (1) установлены две стойки (3) с шпиндельными бабками (4) и двухосевой поворотный стол (7).

Станок предназначен для обработки деталей в пяти осях: ось X – тангенциальная подача шпинделя; ось Y – вертикальная подача; ось Z – радиальная подача; ось A – поворот стола; ось C – вращение планшайбы (6). Все линейные оси станка оснащены серводвигателями (9) с прямым приводом винта подачи и направляющими (2) с

шариковыми винтовыми парамис предварительной нагрузкой. В шпиндельной бабке размещен электрошпиндель (5), в передней и задней опорах которого установлены радиально-упорные гибридные керамические подшипники. Пневмоцилиндр (8) обеспечивает балансировку шпиндельной бабки при вертикальных перемещениях шпинделя. Несущие элементы конструкции выполнены из серого чугуна с плотностью $\rho=6,8 \cdot 10^{-3}$ кг/см³, модулем упругости $E=1,3 \cdot 10^7$ Н/см² и коэффициентом Пуассона $\mu=0,28$.

Динамическая модель станка в Adams (рис. 7 (а)) представляет собой многомассовую модель с сосредоточенными массами, соединенными между собой с помощью упругих элементов. Установка станины на четырех башмаках на фундамент моделируется абсолютно жестким соединением. Стойки жестко закреплены на станине.

Геометрические параметры станка определены по технической документации его узлов, расчетам и результатам предварительных испытаний. Учет податливости узлов станка делает возможным расчет вибраций, возникающих в станке при его работе и оценку их влияния на работу всего механизма в целом. Упругие свойства подобраны в предварительных расчетах так, чтобы обеспечить жесткость деталей согласно каталогам. Для упругих деталей коэффициент демпфирования принят равным $\xi=3\%$.

Одним из аспектов виброустойчивости конструкции является отсутствие совпадения собственных и возмущающих частот. Диапазон частот собственных колебаний конструкции, полученный при моделировании в режиме *normal mode analysis*, лежит в диапазоне 8-230 Гц (табл. 2). Рассмотрены только общестаночные (низкочастотные) моды.

Таблица 2–Результаты моделирования

Номер моды	f_0 , Гц	Коэффициент демпфирования	Вещественная часть	Мнимая часть
1	8,59	0,0074	-0,037	±8,59
2	15,97	0,0076	-0,045	±15,96
3	29,04	0,00536	-0,016	±29,03
4	45,1	0,0072	-0,033	±45,09
5	65,68	0,018	-0,06	±65,63
6	126,3	0,01	-0,3	±126,29
7	189,54	0,006	-1,13	±189,53
8	229,2	1	-229,2	0

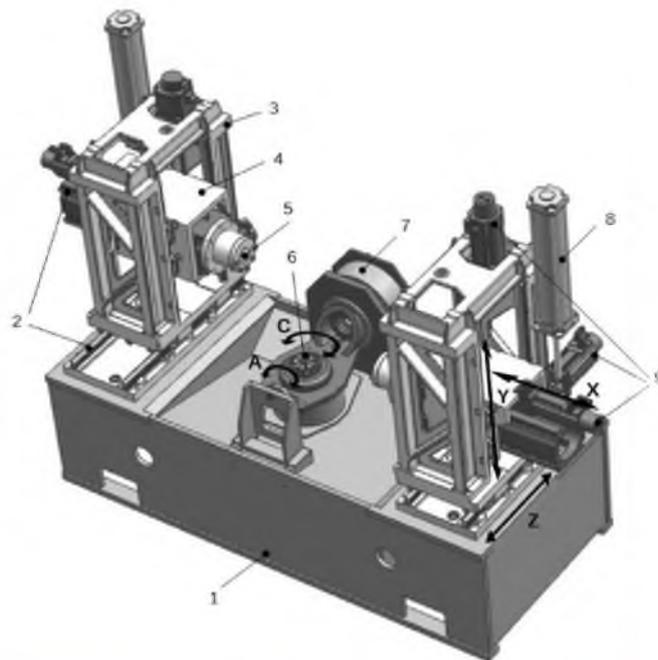
Для выполнения частотного анализа (forced vibration analysis) динамика станка рассмотрена как отклик несущей системы на вынуж-

денные колебания, возникающие вследствие резания металла заготовки. Вибрационный анализ станка выполняется для случая установившихся

колебательных процессов, то есть скорость вращения шпинделя и подача при расчете считаются постоянными величинами. На вход упругой системы поступает сигнал $F(t)$, связанный с процессом резания $F=A\sin(2\pi ft)$, где A – амплитуда вынуждающей силы (осевая F_x , вертикальная F_y , продольная F_z силы), f – частота вынуждающей силы, на выходе – относительные перемещения шпинделя и стола [2].

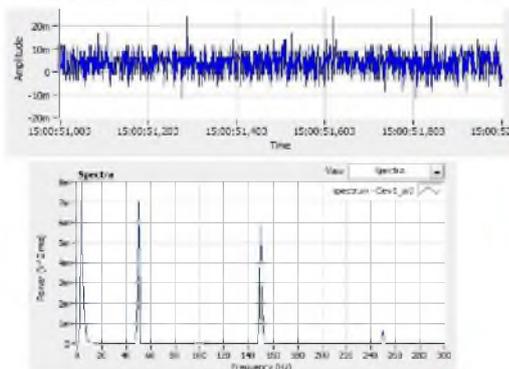
Возмущающая нагрузка, отображающая колебания силы резания при растачивании или

фрезеровании, прикладывалась к точке центра тяжести шпиндельной бабки. Рабочий диапазон вращения шпинделя принят равным $n_{шп}=80-6000$ мин-1, что соответствует частотам $f_{шп}=1,3-100$ Гц. Частоты приводов поворотного стола и подачи находятся в этом диапазоне. Тогда, минимальная частота возмущающих колебаний от инструмента с числом зубьев $z=2$: $f_{min} = n_{min}z/60=2.67$ Гц, максимальная частота – $f_{max} = n_{max}z/60=200$ Гц, где n_{min}, n_{max} – минимальная и максимальная частоты вращения подвижных частей станка.



а)

Оборудование	Основные характеристики	
1 Датчики виброскорости GlobalTest	1...8 000 Гц	0,1...1 000 мм/с
2 Модуль аналогового ввода NI-6009	48 кГц	АЦП 14 бит
3 ПК с установленным ПО	Intel Core i-7 2.5ГГц	ПО LabVIEW



б)

Рисунок 7 – Динамическая модель станка:

а – несущая система виртуального станка; б – элементы измерительной системы на опытном оборудовании

По графикам амплитудно-частотных характеристик получены амплитуды колебаний шпинделя и стола при различных частотах вынуждающей силы. Амплитудно-частотная характеристика виброперемещений шпинделя показывает, что максимальная амплитуда колебаний возникает на 960 об/мин (16 Гц) по оси Y $s=31$ мкм и 540 об/мин (9 Гц) по оси Z $s=440$ мкм. Амплитудно-частотная характеристика виброперемещений стола показывает, что максимальная амплитуда колебаний возникает на 1740 об/мин (29 Гц) по оси Y $s=14$ мкм и 2700 об/мин (45 Гц) по оси X $s=45$ мкм.

Проведенный анализ динамики обрабатываемого центра показал, что резонансные амплитуды колебаний соответствует частотам 7..16 Гц и 29..65 Гц, при этом максимум наблюдается в направлении оси Z . Применение станка на данном диапазоне частот может привести к снижению точности выполняемых размеров и повышению шероховатости обработанной поверхности вследствие больших амплитуд вибрации элементов технологической системы. Для стабильного процесса резания необходимо исключить назначение режимов резания, вызывающих эти резонансные частоты. Полученные амплитудно-частотные зависимости позволяют проектировать технологические процессы механической обработки с учетом динамических характеристик станочной системы.

4. Иерархия построения моделей и алгоритмов управления жизненным циклом изделия

Необходимый комплекс методов описания и управления процессом механической обработки можно представить в виде иерархической системы (рис. 8), которая включает в себя следующие уровни [11]:

1 уровень содержит:

- определение условий проведения механической обработки;
- выбор оборудования, оснастки, инструмента;
- конечно-элементное моделирование процесса резания;
- определение связей технологических режимов со статическими и динамическими характеристикам процесса резания.

2 уровень заключается в следующем.

- выбор алгоритмов управления;
- определение состава системы управления;
- определение целей оптимизации: выбор критериев качества;
- определение и назначение заданных значений скорости резания на основе нечеткой системы;

- определение управляющих воздействий и управляемых координат.

3 уровень содержит:

Реализацию управления:

- приводами станочного оборудования;
- точностью и качеством работы элементов системы: устройств управления, датчиков и прочих элементов.

В рамках описанной иерархии предлагается схема адаптивной системы управления температурно-силовым состоянием в зоне резания на основе нечеткой логики с подсистемой стабилизации температуры в зоне резания. Ниже приведен пример реализации адаптивной системы обработки прецизионных деталей (винтов) с учетом температурно-силового состояния зоны резания.

5. Адаптивная автоматизация управления технологическим процессом винта Система управления оборудованием должна обеспечивать следующие условия протекания процесса механической обработки [12-14]:

1. Поддержание максимально возможной температуры в зоне резания, при котором процесс пластических и упругих деформаций в зоне резания в связи с изменением физико-механических свойств обрабатываемого материала происходит с меньшими усилиями.

2. Непревышение заданной силы резания. При этом сила резания считается возмущающим воздействием с неопределенными параметрами: случайными, статическими и динамическими. На рис. 9 представлена общая схема адаптивной системы управления температурно-силовым состоянием, включающая в себя контур стабилизации температуры резания и контур адаптации скорости резания. Выбор управляющего воздействия на систему в виде силы резания и текущего значения температуры в зоне резания.

После оценки информации о температурно-силовом состоянии процесса резания устройство управления, имеющее в составе блок нечеткого вывода, определяет максимально возможное значение скорости резания и через преобразователь пересчитывает его в значение температуры на датчике в системе контура стабилизации температуры. Блок нечеткого вывода на основе правил нечеткой логики стремится повышать текущую скорость резания в зависимости от температурно-силового состояния в системе.

Контур стабилизации температуры в зоне резания - обычная следящая система с обратной

связью. Текущее значение температуры сравнивается с заданным в блоке сравнения, и устройство

управления вырабатывает корректирующий сигнал.

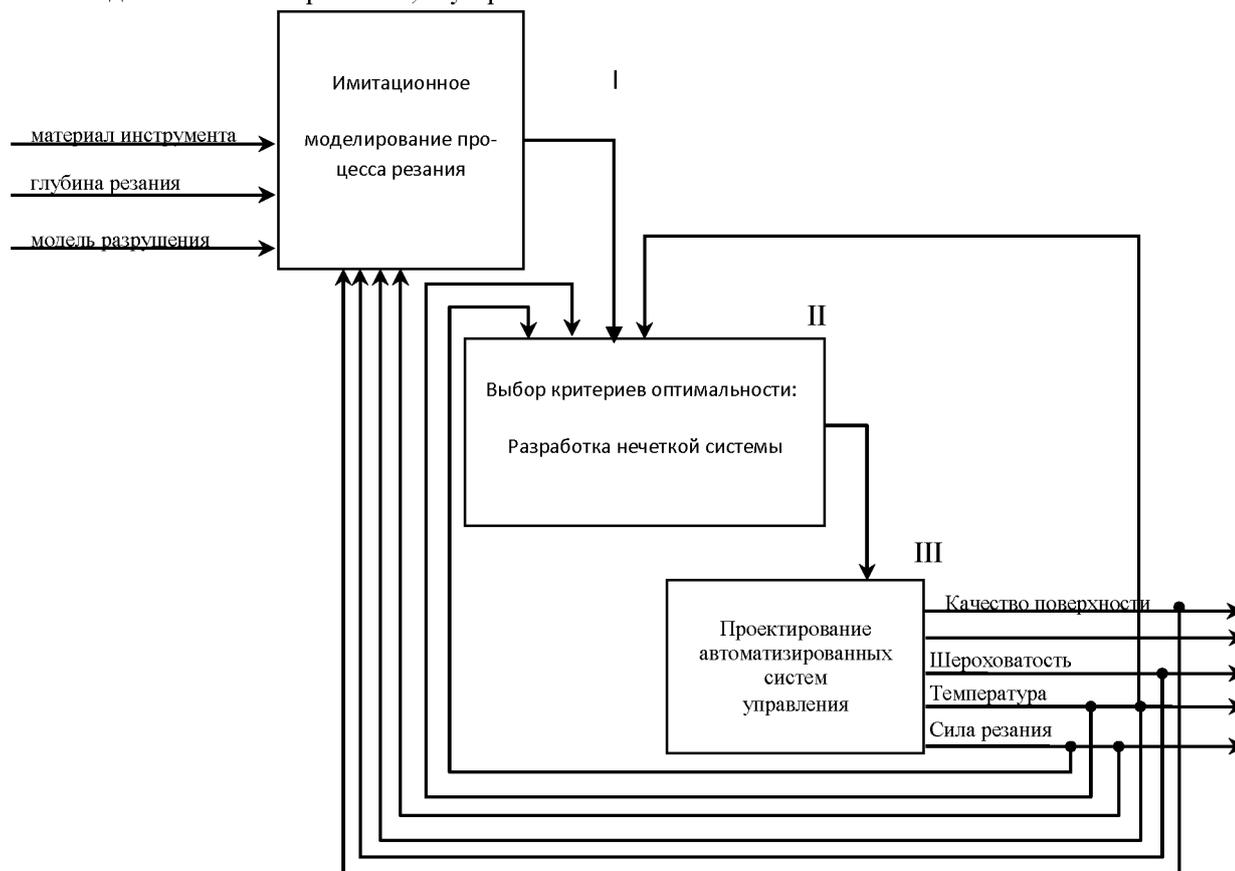


Рисунок 8 – Общая иерархия построения модели управления механической обработкой

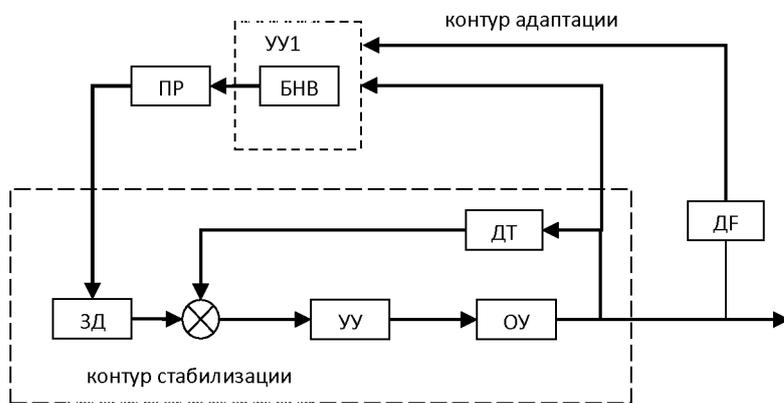


Рисунок 9 – Общая функциональная схема уровневой адаптивной системы управления температурно-силовым состоянием: БНВ – блок нечеткого выбора адаптивной скорости резания; ПР – преобразователь скорости в температуру; ЗД – датчик; КС – контур стабилизации температуры; ОУ – объект управления (процесс резания); УУ1 – устройство управления контура адаптации; УУ – устройство управления контура стабилизации; ДТ – датчик температуры; ДФ – датчик силы резания

По данным $Q_{тек}$ и $v_{тек}$ определяется примерный критерий качества управления $I(v_{тек}, Q, F)$. Критериями качества управления контура стабилизации температуры могут быть минимальная ошибка системы:

$$I = \int_0^t e(t)^2 dt \rightarrow \min \quad (1)$$

или минимальное отклонение от заданного значения температуры:

$$I = \int_0^t (\varepsilon_{\text{тек}}(t) - e(t))^2 dt \rightarrow \min \quad (2)$$

Устройство управления включается при достижении величины отклонения от задания или ошибки минимума в контуре стабилизации.

Блок нечеткого вывода обеспечивает выбор оптимальной скорости резания в соответствии со следующими условиями:

$$\begin{aligned} T(v) &\rightarrow \max \\ \left[\begin{aligned} |\bar{F}_{\text{сумм}}| &\leq F_{\text{доп}}; \\ v_{\text{stmin}} &\leq v \leq v_{\text{stmax}} \end{aligned} \right. \quad (3) \end{aligned}$$

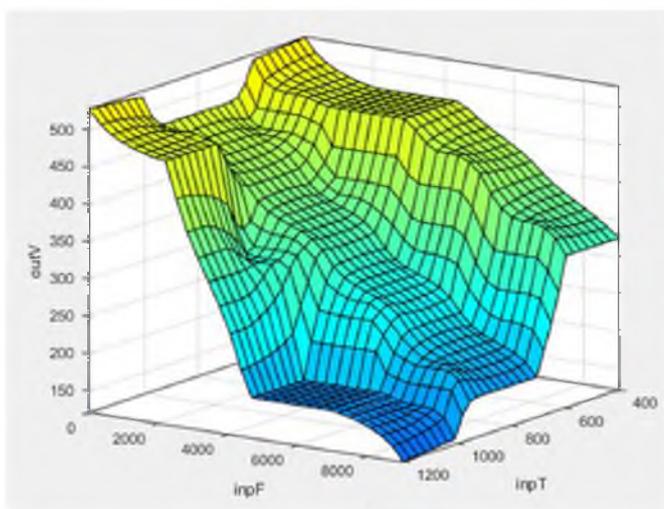
где $\bar{F}_{\text{сумм}}$ – суммарная составляющая силы резания; v_{stmin} , v_{stmax} – минимальная и максимальная скорость, обеспечиваемая оборудованием.

$$\bar{F}_{\text{сумм}} = \bar{F}_{\text{stat}}(v) + \bar{F}_{\text{kol}} + \bar{F}_{\text{sl}} \quad (4)$$

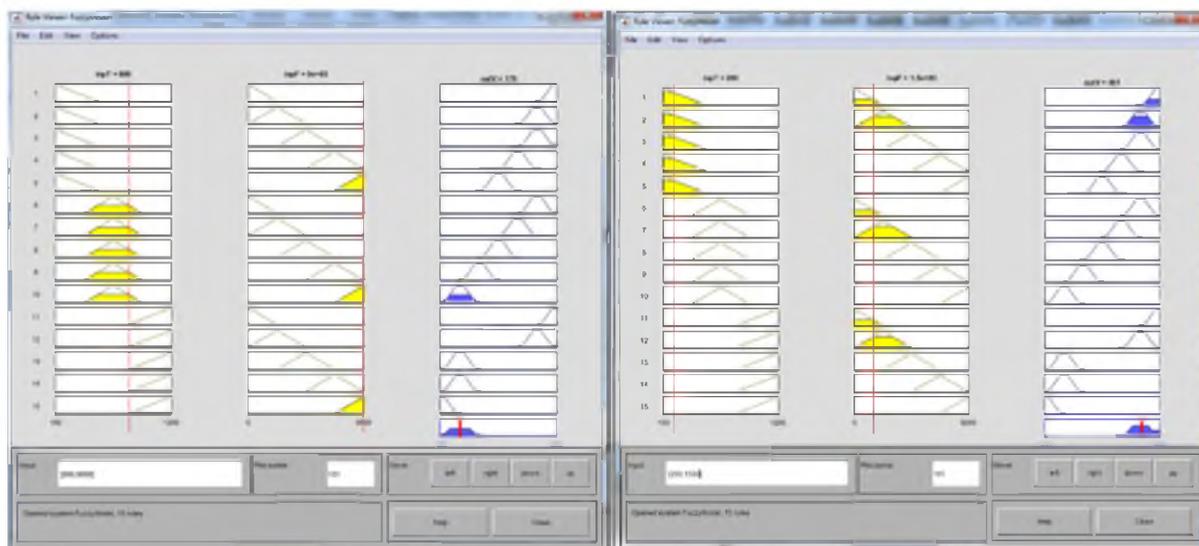
где \bar{F}_{stat} – статическая составляющая силы резания; \bar{F}_{kol} – колебательная составляющая силы резания, связанная с неточностью формы заготовки; \bar{F}_{sl} – случайная составляющая, связанная с износом режущей кромки, изменением припуска и прочими неконтролируемыми воздействиями.

В работе [14] приведен алгоритм управления процессом механической обработки. Поверхность управления (зависимость регулирующего сигнала от двух поданных на его вход значений) и результаты нечеткого вывода на основе созданной базы нечетких правил приведены на рис. 10 (а).

Результаты нечеткого вывода на основе созданной базы нечетких правил приведен на рис. 10 (б).



а)



б)

Рисунок 10 – Модель нечеткого вывода: а – поверхность управления (зависимость регулирующего сигнала от двух поданных на его вход значений); б – формирования нечеткого вывода

В табл. 3 приведены значения скорости V в зависимости от поданных на вход параметров T и F .

Таблица 3— Взаимосвязь скорости резания с силой и температурой в нечеткой модели

Температура, С	Сила, Н	Скорость резания, м/мин
400	100	480
400	9000	283
800	100	467
800	9000	175
1100	100	518
1100	9000	124

При температуре в зоне резания около 600°С и силе резания близкой к допустимой скорости резания составляет 325 м/мин.

Выводы

В представленной работе:

1. Предложена «сквозная» схема моделирования технологических объектов – винтов с использованием решения ряда задач, описывающих связи: геометрии поверхности с режимом функционирования винтов; силового состояния зоны резания с технологическими режимами; технологической погрешности с условиями обработки.
2. С использованием пространственной модели может быть проведено моделирование механической обработки, сгенерирована траектория перемещения режущего инструмента и управляющая программа для металлорежущего оборудования.
3. Решение задачи определения напряженно-деформированного состояния винта при операциях механической обработки позволяет прогнозировать величину технологической погрешности. Кроме того, решение подобных задач для различных схем установки и закрепления нежёстких несимметричных заготовок сложной пространственной формы позволит определить величину погрешности закрепления, часто являющуюся критической при механической обработке таких изделий.
4. На основании информации о функциональных связях между возмущающими воздействиями и упругими отжатиями заготовки может быть построена комбинированная автоматическая система управления траекторией рабочего органа станка.

5. Получена и исследована динамическая картина изменения силовых параметров в зоне резания при врезании и выходе инструмента из зоны резания и определен периодический характер изменения сил резания при фрезеровании.
6. Получен амплитудный и фазовый спектр составляющих сил резания, изменяющихся периодически в связи с характером процесса резания при фрезеровании.
7. Результаты работы позволяют определять эффективные технологические режимы с точки зрения возникновения автоколебательных процессов в технологической системе и определять качественную связь между технологией и качеством изделия. При проектировании технологических процессов, разработке конструкции станочного оборудования информация о частотах вынужденных колебаний в системе «станок-инструмент-винт» может быть использована для предотвращения резонансных явлений.
8. Описана общая иерархия построения модели управления механической обработкой, связывающая между собой: имитационную модель динамики процесса резания, выбор оптимальных значений управляемых параметров и построение автоматизированных систем управления.
9. Предложена схема адаптивной системы управления температурно-силовым состоянием в зоне резания на основе нечеткой логики с подсистемой стабилизации температуры в зоне резания.
10. Проведена идентификация процессов механической обработки.

Разработанный комплекс моделей и методик может применяться в судостроительных производствах [24-26]. Он позволит максимально оптимизировать весь конструкторско-технологический процесс. Причем, использоваться он может как до момента организации производственного участка, например, оптимизация конструкции винта или формы корпуса судна, так и для тестирования технологических процессов механической обработки, сварки и сборки.

На основании подобных моделей может быть спрогнозирована производительность, рассчитаны энергетические параметры оборудования и производственных мощностей в целом. Моделирование производственных линий – прямой путь к оптимальному планированию грузопотоков и логистики на предприятии.

Все решенные задачи могут быть интегрированы в существующие PLM-системы с надстройками цифровых прототипов технологического процесса: изделий и оборудования при условии обеспечения быстрого обмена данными между элементами системы. Это, в свою очередь, требует отдельного рассмотрения вопросов программного, алгоритмического и аппаратного обеспечения таких промышленных концептуальных подходов.

Литература

- Grinyok A., Boychuk I., Pereygin D., Dantsevich I. Simulation in production of open rotor propellers: from optimal surface geometry to automated control of mechanical treatment // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. (327). 022038.
- T.A. Duyun, A.V. Grinek, V.G. Rubanov, I.V. Kalatozishvili. Controlling Of Thermal Parameters For Mechanical Treatment On The Basis Of Numerical Modeling Of Their Thermal Relationship. International Journal of Applied Engineering Research. 2015. № 5. Vol. 10. P. 12371–12382.
- Габдрафиков Ю. М. Основные проблемы и задачи при организации цифрового производства на отечественных судостроительных верфях / Ю. М. Габдрафиков, В. М. Левшаков, А. А. Васильев // Судостроение. – 2019. – №4, – С. 44-52.
- Галкина О. Электронная информационная модель изделий судостроения на различных стадиях жизненного цикла / О. Галкина, А. Рындин, Л. Рябенский, А. Тучков, И. Фертман // Судостроение. Специальный выпуск. CADmaster. – 2007. – С. 48-51.
- Duyun T.A., Grinek A.V., Manzhos R.V. (2014) Modelling of Thermal Field of Electromotor's Collector in Service. Advances by Environment Biology. 8(13): 183–190.
- Гринек А.В. Исследование влияния скорости резания на температурно-силовое состояние в зоне обработки методом численного моделирования / А.В. Гринек, В.Г. Рубанов, И.В. Калатошвили, В.В. Михайлов // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2016. – №8. – С. 10–19.
- Зориктуев В. Ц. Автоматизация технологических процессов изготовления деталей авиадвигателей // Полет. 2002. № 2. С. 69–73.
- Зориктуев В. Ц. Управление технологическими процессами в машиностроении / В. Ц. Зориктуев, Р. Р. Загидуллин, А. Г. Лютов, Ю. А. Никитин, А. Г. Схиргладзе. – М.: ТНТ, 2010. – 512 с.
- Duyun T.A., Grinek A.V., Rybak L.A. (2014) Methodology of manufacturing process design, providing quality parameters and minimal costs. World Applied Sciences Journal 30 (8): 958–963.
- Василевич Ю.В. Моделирование и анализ динамики несущей системы фрезерно-сверлильно-расточного станка с моностойкой / Ю.В. Василевич, С.С. Довнар, А.С. Трусковский, И.И. Шумский // Наука и техника. – 2015. – №3. – С. 9-19.
- Норенков И. П. Основы автоматизированного проектирования. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. – 450 с.
- Макаров И. М. Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления / И. М. Макаров, В. М. Лохин, С. В. Манько, М. П. Романов. – М.: Наука, 2006. – 333 с.
- Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта. / под ред. Д.А. Поспелова. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 312 с.
- Гринек А.В. Нечеткая модель вывода значения скорости резания на основе данных имитационного моделирования / А.В. Гринек, А.В. Рыбина // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2016. – Т. 20. – № 12. – С. 109-118.
- Тэрano Г. Прикладные нечеткие системы / Г. Тэрano, К. Асаи, М. Сугэно. – М.: Мир, 1993. – 368 с.
- Venkata Rao R 2011 Advanced Modeling and Optimization of Manufacturing Processes Springer-Verlag London 380.
- Boyd D D, Brooks T F, Burley C L, Jolly J R Aeroacoustic Codes for Rotor Harmonic and BVI Noise - CAMRAD.Mod/HIRES: Methodology and Users' Manual. NASA / TM-1998-207640.
- Gök K, Gök A, Bilgin M B 2014 Finite Element Modeling as Three Dimensional of Effect of Cutting Speed in Turning Process. Journal of Engineering and Fundamentals, 1(1) 11–22.
- Zhai Y S, Wang Y, Yan F G, Wang B Three-Dimensional Finite Element Analysis in Plunge Milling for Stainless Steel // Materials Science Forum, Vols. 800-801, pp. 348-352, 2014.
- Aboud E, Shi B., Attia H, Thomson V, Mebrahtu Y Finite element-based modeling of machining-induced residual stresses in Ti-6Al-4V under finish turning conditions // Procedia CIRP. 2013. Vol.8. P. 63-66.
- Altintas Y 2000 Manufacturing automation Cambridge: Cambridge University Press. 286.
- Набилкин А.Ю. Автоматизированная двухкашальная каскадная система управления продольным профилем нежестких валов при токарной обработке: дисс... канд. техн. наук. – Саратов. 2013. – 189 с.
- Tamg Y S, Wang Y S A new adaptive controller for constant turning force // 1994 Int. J. Adv. Manuf. Technol 9 211-216.
- Будниченко М. А. Опыт использования электронных технологий на судостроительном предприятии / М. А. Будниченко, В. В. Кузьмин // Судостроение. – 2019. – №1, – С. 43-45.

25. Кляхин В. Н. Использование методологии системного анализа при проектировании корабельных систем поддержки принятия решений/В. Н. Кляхин, С. Г. Чулкин, А. С. Минеев, А. Б. Фомичев // Судостроение.– 2019.– №1. – С. 52-58.

26. Кондрачев С.И. Математическая модель движения морской буровой платформы/ С.И. Кондрачев, И.П. Бойчук// В сборнике: Математическое и компьютерное моделирование Сборник научных трудов II Международной научно-практической конференции. ФГБОУ ВО «Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф.Ушакова»; ОАО «Таганрогский авиационный научно-технический комплекс имени Г. М. Бериева»; Государственный научный центр «Южное научно-производственное объединение по морским геологоразведочным работам».– 2016.– С. 11-15.

References

1. Grinyok A., Boychuk I., Pereygin D., Dantsevich I. Simulation in production of open rotor propellers: from optimal surface geometry to automated control of mechanical treatment. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. (327). 022038.

2. T.A. Duyun, A.V. Grinek, V.G. Rubanov, I.V. Kalatozishvili. Controlling Of Thermal Parameters For Mechanical Treatment On The Basis Of Numerical Modeling Of Their Thermal Relationship. International Journal of Applied Engineering Research. 2015. № 5. Vol. 10. P. 12371–12382.

3. Gabdrafikov Ju. M., Levshakov V. M., Vasil'ev A. A. (2019) Osnovnye problemy i zadachi pri organizacii cifrovogo proizvodstva na otechestvennyh sudostroitel'nyh verfjakh [The main problems and tasks in organizing digital production at domestic shipyards]. 4. 44-52.

4. Galkina O., Ryndin A., Rjaben'kij L., Tuchkov A., Fertman I. Jelektronnaja in-formacionnaja model' izdelij sudostroenija na razlichnyh stadijah zhiznennogo cikla (2007)[Electronic information model of shipbuilding products at various stages of the life cycle]. 48-51.

5. T.A. Duyun, A.V. Grinek. R.V. Manzhos (2014) Modelling of Thermal Field of Electromotor's Collector in Service. Advances by Environment Biology. 8(13): 183–190.

6. Grinek A.V., Rubanov V.G., Kalatozishvili I.V., Mihajlov V.V. Issledovanie vli-janija skorosti rezanija na temperaturno-silovoe sostojanie v zone obrabotki metodom chislennogo modelirovanija (2016) [Investigation of the influence of cutting speed on the temperature-force state in the processing zone by numerical simulation]. 8. 10–19.

7. Zoriktuev V. C. Avtomatizacija tehnologicheskikh processov izgotovlenija detalej aviadvigatelej (2002) [Automation of technological processes for manufacturing aircraft engine parts]. 2. 69–73.

8. Zoriktuev V. C., Zagidullin R. R., Ljutov A. G., Nikitin Ju. A., Shirladze A. G. Upravlenie tehnologicheskimi processami v mashinostroenii [Process control in mechanical engineering]. Moscow. 2010. pp512.

9. T.A. Duyun, A.V. Grinek, L.A. Rybak. (2014) Methodology of manufacturing process design, providing quality parameters and minimal costs. World Applied Sciences Journal 30 (8): 958–963.

10. Vasilevich Ju.V., Dovnar S.S., Truskovskij A.S., Shumskij I.I. Modelirovanie i analiz dinamiki nesushhej sistemy frezerno-sverlil'no-rastochного stanка s monostojkoj (2015) [Modeling and analysis of the dynamics of the bearing system of a milling-boring-boring machine with a monostable]. 3. 9-19.

11. Norenkov I. P. Osnovy avtomatizirovannogo proektirovanija [Computer Aided Design Basics]. Moscow. 2010. pp.450.

12. Makarov I. M., Lohin V. M., Man'ko S. V., Romanov M. P. Iskusstvennyj intellekt i intellektual'nye sistemy upravlenija [Artificial Intelligence and Intelligent Control Systems]. Moscow. 2006. pp.333.

13. Nechetkie mnozhestva v modeljah upravlenija i iskusstvennogo intelekta. / Pod red. D.A. Pospelova [Fuzzy sets in control models and artificial intelligence]. Moscow. 1986. pp.312c.

14. Grinek A.V., Rybina A.V. Nechetkaja model' vyvoda znachenija skorosti reza-nija na osnove dannyh imitacionnogo modelirovanija (2016) [A fuzzy model for deriving the cutting speed value based on simulation data]. 20 (12). 109–118.

15. Tjerano G., Asai K., Sugjeno M. Prikladnye nechetkie sistemy [Applied fuzzy systems]. Moscow. 1993.–368c.

16. Venkata Rao R 2011 Advanced Modeling and Optimization of Manufacturing Processes Springer-Verlag London 380.

17. Boyd D D, Brooks T F, Burley C L, Jolly J R Aeroacoustic Codes for Rotor Harmonic and BVI Noise - CAMRAD.Modl/HIRES: Methodology and Users' Manual. NASA / TM-1998-207640.

18. Gök K, Gök A, Bilgin M B 2014 Finite Element Modeling as Three Dimensional of Effect of Cutting Speed in Turning Process. Journal of Engineering and Fundamentals, 1(1) 11–22.

19. Zhai Y S, Wang Y, Yan F G, Wang B Three-Dimensional Finite Element Analysis in Plunge Milling for Stainless Steel. Materials Science Forum, Vols. 800-801, pp. 348-352, 2014.

20. Abboud E, Shi B., Attia H, Thomson V, Mebrahtu Y Finite element-based modeling of machining-induced residual stresses in Ti-6Al-4V under finish turning conditions. Procedia CIRP. 2013. Vol.8. P. 63-66.

21. Altintas Y 2000 Manufacturing automation Cambridge: Cambridge University Press. 286.

22. Nabilkin A. Ju. Avtomatizirovannaja dvushkal'naja kaskadnaja sistema upravlenija prodol'nym profilem nezhestkih valov pri tokarnej obrabotke: diss... kand. tehn. Nauk [Automated two-cascade cascade

- control system for the longitudinal profile of non-rigid shafts during turning]. Saratow. 2013. Pp.189.
23. Tamg Y S, Wang Y S A new adaptive controller for constant turning force (1994) Int.J.Adv.Manuf. Technol. 9.211-216.
24. Budnichenko M. A., Kuz'min V. V. Opyt ispol'zovaniya jelektronnyh tehnologij na sudostroitel'nom predpriyatii (2019) [Experience in the use of electronic technologies in a shipbuilding enterprise]. 1.43-45.
25. Kljahin V. N., Chulkin S. G., Mineev A. S., Fomichev A. B. Ispol'zovanie metodologii sistemnogo analiza pri proektirovanii korabel'nyh sistem podderzhki pri nrijatija reshenij (2019) [The use of system analysis methodology in the design of ship decision support systems]. 1. 52-58.
26. Kondrat'ev S.I., Bojchuk I.P. Matematicheskaja modeldvizhenija morskoy burovoj platformy (2016) [Mathematical model of motion of marine drilling platform].11-15.

УДК 629.5.035.8

DOI: 10.34046/aumsuomt93/18

К ОЦЕНКЕ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ СУДОВЫХ ВАЛОПРОВОДОВ

М.Н. Чура кандидат технических наук, доцент

В статье рассмотрены существующие стадии процесса усталостного разрушения судовых конструктивных элементов на примере конструкционного материала гребного вала судна. Кратко охарактеризована методика проведенного эксперимента по исследованию процесса зарождения и дальнейшего роста усталостных трещин в образцах, выполненных из углеродистой стали 35. Проведен анализ результатов усталостных испытаний, по результатам которого отмечено, что трещинообразные дефекты появляются на поверхности испытываемых образцов уже после непродолжительного нагружения. Ориентация зародившихся трещин относительно оси приложения нагружения носит хаотичный характер, а зарождение трещин преимущественно происходит в телах зерен микроструктуры материала. Испытания материала при напряжениях превышающих предел выносливости показали, что микротрещина развивается в пределах границ зерна, а затем приостанавливает свой рост. Отмечено, что границы зерен, фаз или включений играют роль силовых барьеров, для преодоления которых микротрещине необходимо накопить необходимую энергию деформации. Основным результатом работы заключается в определении границы перехода малой трещины в стадию развития макротрещины. Автором предложено считать, что такая граница соответствует длине трещины равной размерам десяти средних диаметров зерна микроструктуры.

Ключевые слова: судовой валопровод, гребной вал судна, усталостное разрушение, малая трещина

The article considers the existing stages of the process of fatigue destruction of ship structural elements on the example of the structural material of the propeller shaft of the vessel. The technique of the experiment to study the process of origin and further growth of fatigue cracks in samples made of carbon steel 35 is briefly characterized. The analysis of the results of fatigue tests was carried out, according to the results of which it was noted that crack-like defects appear on the surface of the test samples after a short loading. The orientation of the nucleated cracks relative to the axis of loading application is chaotic, and the origin of cracks mainly occurs in the grain bodies of the microstructure of the material. Tests of the material at stresses exceeding the endurance limit showed that the microcrack develops within the grain boundaries, and then stops its growth. It is noted that the boundaries of grains, phases or inclusions play the role of force barriers, to overcome which the microcrack must accumulate the necessary deformation energy. The main result of the work is to determine the boundary of the transition of a small crack in the stage of development of a macro-crack. The author proposes to assume that such a boundary corresponds to the crack length equal to the size of ten average grain diameters of the microstructure.

Keywords: ship's shaft line, ships propeller shaft, fatigue failure, small crack.

Большинство судовых конструктивных элементов в режиме эксплуатации испытывают механические нагрузки, переменные во времени, что является условием возникновения и развития дефектов усталостного характера. Одним из таких элементов является валопровод судна, входящий в судовой пропульсивный комплекс. Валопровод судна подвержен нагрузкам динамического характера [1, 2]. Ранее отмечалось [3], что

порядка 18% аварий, связанных с пропульсивным комплексом судна, приходится на отказ валопровода. Это составляет около 9% от общего количества аварий судна. Экономический ущерб от таких аварий связан с простоем судна вследствие необходимости экстренного вывода его из эксплуатации и расходами на: спускоподъемные операции, монтажно-демонтажные работы, дефекта-