



**ВЕСТНИК
НАЦИОНАЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА**

«ХПИ»

34'2008

Харьков

**ВЕСТНИК
НАЦИОНАЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА «ХПИ»**

**Сборник научных трудов
Тематический выпуск
«Технологии в машиностроении»**

34'2008

Издание основано Национальным техническим университетом «Харьковский политехнический институт» в 2001 году

**Государственное издание
Свидетельство Госкомитета по ин-
формационной политике Украины
КВ № 5256 от 2 июля 2001 года**

КООРДИНАЦИОННЫЙ СОВЕТ:

Председатель
Л.Л.Товажнянский, д-р техн. наук, проф.

Секретарь координационного совета
К.А.Горбунов, канд. техн. наук, доц.

А.П.Марченко, д-р техн. наук, проф.;
Е.И.Сокол, д-р техн. наук, проф.;
М.Д.Годлевский, д-р техн. наук, проф.;
А.И.Грабченко, д-р техн. наук, проф.;
В.Г.Данько, д-р техн. наук, проф.;
В.Д.Дмитриевский, д-р техн. наук, проф.;
В.Б.Клепиков, д-р техн. наук, проф.;
В.И.Кравченко, д-р техн. наук, проф.;
В.А.Лозовой, д-р фил. наук, проф.;
О.К.Морачковский, д-р техн. наук, проф.;
М.И.Рыщенко, д-р техн. наук, проф.;
В.Б.Самородов, д-р техн. наук, проф.;
В.П.Себко, д-р техн. наук, проф.;
В.И.Таран, д-р техн. наук, проф.;
Ю.В.Тимофеев, д-р техн. наук, проф.;
Б.Т.Бойко, д-р техн. наук, проф.;
А.Ф.Кириченко, д-р техн. наук, проф.;
Е.И.Юносова, д-р техн. наук, проф.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Ответственный редактор:
Ю.В.Тимофеев, д-р техн. наук, проф.

Ответственный секретарь:
В.В.Фролов, канд. техн. наук, доц.

С.С.Добротворский, д-р техн. наук,
проф.;
В.Е.Карпуть, д-р техн. наук, проф.;
А.Я.Мовшович, д-р техн. наук, проф.;
Ю.А.Сизый, д-р техн. наук, проф.;
В.Д.Хицан, д-р техн. наук, проф.;
А.А.Пермяков, д-р техн. наук, проф.;
А.Н.Шелковой, д-р техн. наук, доц.;

Адрес редколлегии: 61002, Харьков,
ул. Фрунзе, 21. НТУ «ХПИ».
Каф. ИТМ им. М.Ф. Семко,
тел. (057) 706-41-43

Харьков НТУ «ХПИ» 2008

Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2008. – № 34. – 133с.

В збірнику представлені теоретичні та практичні результати наукових досліджень та розробок, що виконані викладачами вищої школи, аспірантами, науковими співробітниками різних організацій та установ в галузі машинобудування, металорізального обладнання, оснащення та засобів автоматизації.

Для викладачів, наукових співробітників, спеціалістів.

В сборнике представлены теоретические и практические результаты исследований и разработок, выполненных преподавателями высшей школы, аспирантами, научными сотрудниками различных организаций и предприятий в области технологии машиностроения, металлорежущего оборудования, оснастки и средств автоматизации.

Для преподавателей, научных сотрудников, специалистов.

**Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ»
Протокол № 7 від «4» липня 2008 р.**

© Національний технічний університет «ХПІ»

УДК 621.438.004.15

В.Е. СПИЦЫН, А.Л. БОЦУЛА, Д.Н. СОЛОМОНЮК, В.Н. ЧОБЕНКО

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНАЯ ГАЗОТУРБИНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ГПА

Main features of a new high-performance 16 MW recuperative gas turbine for developing of new gas-compressor units and for compressor stations modernization are presented.

ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект» накоплен огромный опыт создания ГТУ для привода компрессоров природного газа. В настоящее время в эксплуатации на компрессорных станциях находится около 800 газотурбинных установок нашего производства. Предприятие продолжает активно работать в направлении совершенствования существующих и создания перспективных ГТУ для ГПА.

Модернизация существующей газотранспортной системы и строительство новых газопроводов должно базироваться на использовании высокоэффективных приводов компрессоров природного газа. В настоящее время газотурбинный привод является основным типом привода в газоперекачивающих агрегатах (ГПА), что определяет важность задачи повышения эффективности и надежности газотурбинных установок (ГТУ). Основными требованиями, предъявляемыми сегодня к перспективной газотурбинной установке, являются [1, 2]:

- высокая экономичность;
- низкая эмиссия NO_x (менее 50 мг/нм³);
- сохранение номинальной мощности при повышении температуры воздуха на входе в ГТД до 25°C;
- расширенный диапазон рабочих режимов (максимальная мощность – 120%, минимальная мощность: для линейных КС – 50%, ДКС, КС ПХГ – 30%);
- большой общий ресурс (120÷150 тыс. ч.) с ресурсом до капитального ремонта 40÷50 тыс. ч.;
- наработка на отказ не менее 3500 ч. с последующим увеличением до 10 тыс. ч.;
- простота и удобство обслуживания, возможность ремонта в условиях компрессорной станции;
- модульность конструкции;
- невысокая стоимость.

Результаты расчетно-аналитических исследований, проведенных в НПКГ, показывают, что на сегодняшний день для создания высокоэффективного и надежного газотурбинного привода наиболее целесообразно использовать схему с регенерацией тепла уходящих газов.

Такая схема позволяет при невысоких значениях степени повышения давления в компрессоре и температуры газа на входе в турбину получить приемлемые значения экономичности. Вопросы создания регенеративных ГТУ рассматриваются всеми ведущими производителями газотурбинных двигателей (ГТД). В качестве примеров таких установок, реализованных в последнее время, можно привести Mercury 50 (Solar) и WR21 (Westinghouse-Rolls-Royce). На российском рынке предлагаются проекты создания регенеративных установок, т.н. сухого «бинарного» цикла (ГТУ-27ПС (ОАО «Авиадвигатель»)) и «Надежда» ОАО «Невский завод».

Научно-исследовательские работы по созданию регенеративного ГТД ведутся в ЦНИОКР «Машпроект» с 1990 года. Основную сложность представляет создание высокоэффективного и надежного регенератора, имеющего приемлемые массогабаритные и стоимостные показатели. Проектные работы были сосредоточены на создании регенератора пластинчатого типа, работающего по противоточной схеме. Разработаны и испытаны два варианта пластинчатых регенераторов со степенью регенерации 0,8: прямоугольный противоточный пакет и кольцевой перекрестноточный пакет. Проведены испытания пластинчатого регенератора прямоугольной конструкции, подтвердившие его проектные характеристики.

Требования по надежности, низкой стоимости и ресурсу, предъявляемые к газотурбинным приводам компрессоров природного газа, определяют диапазон значений температур газа на входе в турбину от 900 до 1100°С, при которых эти требования могут быть выполнены [3-5]. Расчетные оценки показывают, что при повышении температуры газа на входе в турбину выше 950°С необходимо вводить охлаждение рабочих лопаток турбины, что приводит к уменьшению КПД турбины и темпов увеличения КПД ГТД в целом. Эффект от повышения температуры газа на входе в турбину становится значимым только при температурах выше 1100°С. С другой стороны выбор температуры газа на входе в турбину связан с принятым значением степени повышения давления в компрессоре, как с точки зрения оптимизации параметров цикла и получения максимальной эффективности, так и для определения конструктивных решений, обеспечивающих высокую надежность двигателя при приемлемых затратах. Так, для повышения надежности и удешевления регенератора целесообразно получить температуру газа на выходе из турбины менее 600°С, что позволит применить в регенераторе нелегированные стали.

Основные расчетные параметры ГТУ при стандартных атмосферных условиях:

- мощность на выходном валу ГТД, МВт	16;
- КПД ГТД, %	40,8;
- расход воздуха на входе в ГТД, кг/с	78,7;
- степень повышения давления в компрессоре	5;

- степень регенерации	0,85;
- температура газа на входе в турбину, °С	950;
- температура газа на выходе из турбины, °С	582;
- температура газа на выходе из регенератора, °С	290.

Продольный разрез ГТД приведен на рис.1.

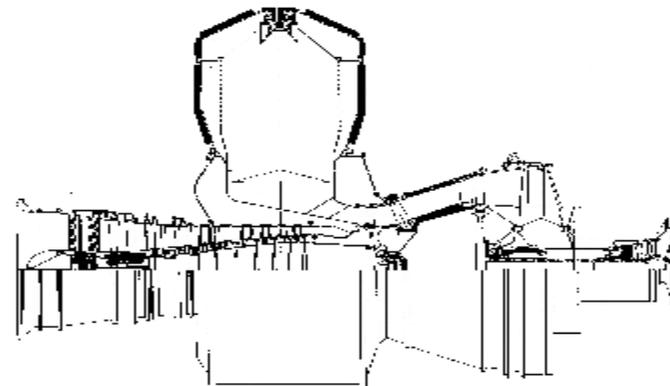


Рис. 1 – Продольный разрез ГТД

В качестве компрессора в новой ГТУ предполагается использовать компрессор низкого давления ГТД ДН80Л, имеющий достаточно высокий КПД, приемлемые газодинамические характеристики и положительный опыт использования на серийно выпускаемых двигателях.

Низкие уровни выбросов вредных веществ предполагается обеспечить за счет использования выносной многозонной камеры сгорания с регулированием по топливу и по воздуху. Такая конструкция камеры сгорания также позволяет обеспечить хорошую ремонтопригодность.

Использование одноступенчатой силовой турбины создает хорошие условия для применения регулируемого соплового аппарата (РСА), позволяющего повысить экономичность работы ГТУ на частичных режимах и уменьшить величину снижения мощности при повышении температуры воздуха на входе в ГТД. Консольная конструкция силовой турбины позволяет разделить модули газогенератора и силовой турбины и обеспечивает возможность замены газогенератора или силовой турбины в условиях компрессорной станции.

Предполагается создание модификаций ГТД с номинальными частотами вращения ротора силовой турбины 5300 и 6800 об/мин, обоих направлений вращения, что обеспечит их применение в газоперекачивающих агрегатах с

различными современными и перспективными компрессорами (нагнетателями) природного газа, оснащёнными высокоэффективными СПЧ.

Проработаны два варианта конструкции регенератора – цилиндрический и котельного типа. Оба варианта выполнены по схеме с многократным перекрестным током и обеспечивают требуемое значение степени регенерации (0,85) при суммарных потерях полного давления рабочего тела ~5,5%, из которых 4% приходится на сам теплообменник, а 1,5% на трубы подвода-отвода теплоносителей. Рациональное проектирование регенератора и оптимизация геометрических характеристик пакетов позволяют достичь существенного снижения массы и габаритов теплообменника. Так, уменьшение размеров и гидравлических сопротивлений подводящих и отводящих воздухопроводов достигается за счет использования регенератора, состоящего из нескольких секций, подключенных параллельно по воздуху.

Результаты конструктивных проработок и оптимизационных расчетов показали, что более эффективно применение регенератора "котельного" типа, поверхность теплообмена которого набрана из плоских змеевиков. Змеевики скомпонованы в прямоугольном коробе, который является частью газохода. Газ обтекает трубки снаружи, воздух течет внутри трубок и подводится (отводится) по цилиндрическим коллекторам. Схема движения теплоносителей - многократный перекрестный ток с общим противотоком. Воздух совершает 6 ходов, газ – 1 ход. Результаты предварительных проработок показывают, что масса регенератора составляет ~95 т, из которых 60 т приходится на трубный пакет. Такая конструкция позволяет освоить производство регенераторов без значительных предварительных затрат, связанных с технологической подготовкой.

Высокая надёжность (в первую очередь – долговечность) и эффективность создаваемой ГТУ должна обеспечиваться конструктивными решениями, основанными на максимальном использовании отработанных в производстве и проверенных в эксплуатации элементов и узлов двигателя.

Список литературы: 1. Щуровский В.А. Состояние и перспективы применения газотурбинных и компрессорных технологий //Газовая промышленность, № 2, 2003. С. 41-44. 2. Щуровский В.А. Основные направления развития газоперекачивающей техники //Газотурбинные технологии, № 6, 2007. С. 38-39. 3. Барский И.А., Иванов А.К. и др. Выбор температуры газа перед турбиной ГТУ КС //Газовая промышленность, № 2, 1999. С. 51-52. 4. Орберг А.Н., Сударев В.Б. и др. Прогноз начальной температуры газа газотурбинного привода ГПА //Газовая промышленность, № 5, 2005. С. 62-65. 5. Микаэлян Э.А. Совершенствование современных газотурбинных ГПА //Газовая промышленность, № 2, 2005. С. 64-67.

Поступила в редколлегию 15.05.2008

УДК 629.7.036.3.001

*И.Е. АННОПОЛЬСКАЯ, В.А. КОВАЛЬ, В.В. РОМАНОВ,
А.А. ТАРЕЛИН*

МЕТОДОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОДНОВАЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ ГТЭ-45(60А)

The new approach, statement and methods of implementation of a problem of identification of parameters and characteristics of mathematical models of various circuit design of the power gas-turbine engine on experimental data is observed. The problem is solved in uniform informational space by means of modern mathematical methods of search of an optimum.

В процессе создания газотурбинных двигателей (ГТД) различного применения используется большое число математических моделей (ММ), с той или иной степенью точности отражающих процессы, реализующие функционирование объекта.

Как правило, рассчитанные по этим моделям параметры, отличаются от параметров, полученных на реальном двигателе. Поэтому для успешного решения всего многообразия задач, возникающих в процессе создания и эксплуатации ГТД, необходимо иметь адекватную ММ двигателя. Для этого существует два пути:

- повышение уровня сложности ММ, т.е. более тщательное исследование и математическое описание особенностей физических процессов и взаимосвязей в объекте моделирования;
- идентификация с экспериментальными данными.

Первый путь предполагает потребность значительных вычислительных ресурсов и, как правило, не отражает особенностей, характерных для конкретно проектируемых и создаваемых изделий, что, в конечном счете, приводит к расхождению расчетных и действительных параметров двигателя.

Более технологичным и перспективным является второй путь – идентификации математической модели по результатам испытаний двигателя. При этом коррекция параметров осуществляется их вариацией, и уточнение ММ достигается только за счет изменения этих величин, без увеличения ее сложности. Это является большим преимуществом, т.к. фактически автоматизирует расчетные работы при доводке двигателя и регламентирует их последовательность.

Учитывая вышесказанное, представляется актуальным переход от математического моделирования и автоматизации проектирования отдельных элементов энергоустановок к созданию интегрированных сред (систем), позволяющих в едином комплексе решать задачи многоцелевой и многоуровневой оптимизации параметров и характеристик, а также их идентификации (получения адекватных математических моделей) по

результатам экспериментов с использованием современных математических методов поиска оптимальных решений.

В качестве объекта исследований рассмотрим разработанную на ГП НПКГ «Зоря-Машпроект» энергетическую установку номинальной мощностью 45...60 МВт, предназначенную для использования в составе газотурбинной тепловой электростанции при выработке электроэнергии, как в автономном варианте, так и в варианте параллельной работы с общей электрической сетью.

Особенностью установки является возможность ее использования в двух вариантах: 45 МВт (ГТЭ-45) и 60 МВт (ГТЭ-60А). Параметры обоих вариантов установок должны обеспечиваться одним и тем же турбокомпрессором при его работе на различных частотах вращения. Это позволяет обеспечить высокую эффективность ГТЭ-45 (ГТЭ-60А) при работе по простому циклу и в составе газопаровой установки (ГПУ). Согласование частот вращения ГТД и электрогенераторов осуществляется за счет различных передаточных отношений в редукторах.

Основные параметры ГТЭ-45 (60А) приведены в таблице.

Параметры ГТУ	ГТЭ-45	ГТЭ-60А
Мощность на клеммах генератора, МВт	45	60
КПД (по мощности на клеммах генератора, %)	34,7	37,0
Расход воздуха на входе в компрессор, кг/с	134,3	170,7
Степень повышения давления в компрессоре	14,1	18,0
Температура газа за камерой сгорания, К	1548	1568
Температура газа на выходе из ГТД, °С	545	516
Частота вращения ротора турбокомпрессора, об/мин	3960	4320
Частота вращения выходного вала редуктора, об/мин	3000	3000

Двигатель имеет достаточно сложную систему отборов воздуха и подвода его для охлаждения турбины. При этом часть отбираемого за компрессором воздуха охлаждается в воздухоохладителе до температуры 150°С и в кондиционированном виде подается в СА и РК с первой по четвертую ступени и далее стравливается в масляную полость (рис.1). Суммарные отборы воздуха составляют 16,16%.

В общем-то, подобную структуру охлаждения можно формализовать в виде алгоритма решения задачи расчета характеристик машины на установившихся и переходных режимах эксплуатации с учетом детализации до уровня лопаточных венцов, что существенно повлияет на ресурсные показатели и свойства вычислительного процесса.

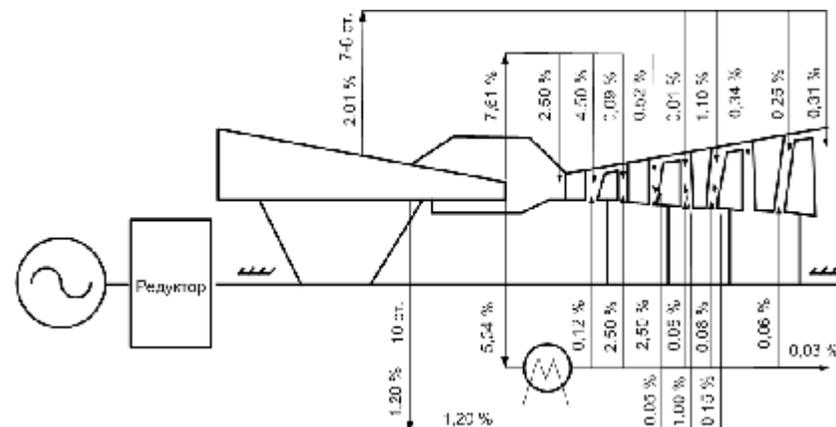


Рис. 1 – Принципиальная схема отборов и возвратов воздуха в ГТЭ-60А

В общем случае под математической моделью газотурбинного двигателя понимают совокупность уравнений, условий и ограничений, принятых для описания реальных процессов в ГТД, из которых одна часть отражает условия совместной работы основных узлов и элементов, а другая представляет собой описание их свойств и характеристик [4].

Одновальный ГТД. В системе уравнений невязок для такого типа машин должно отсутствовать уравнение баланса мощностей компрессора и турбины. Это обусловлено тем, что в уравнение баланса мощностей одновального двигателя

$$N_e + G_{вк} L_k - G_{гт} L_t \eta_m = 0$$

входит мощность N_e , отбираемая от ротора двигателя на привод потребителя мощности, который для моделируемой термодинамической системы двигателя является внешним устройством, не оказывающим непосредственного влияния на параметры рабочего процесса в ГТД. Отсутствие однозначной связи между мощностями турбины и компрессора позволяет при неизменной геометрии реактивного насадка в одновальном двигателе независимо изменять два параметра, а не один, как в турбореактивных двигателях. Входящие в это и последующие уравнения баланса расходы рабочего тела определяются по входу в соответствующие лопаточные машины.

В качестве независимых переменных выбраны величины, определяющие режимы работы узлов турбокомпрессора и камеры сгорания

$$x, n_{np}, \alpha_{kc}, \pi_T,$$

где $x = tgj$ - угловая координата на напорной ветви характеристики компрессора при $n_{np} = const$ (рис.2,3).

Если матрица коэффициентов составлена, как в данном случае, из частных производных по искомым независимым переменным, то она называется матрицей Якоби. В базовом методе Ньютона матрица Якоби пересчитывается на каждом шаге (обычно при замене частных производных их конечно-разностными аналогами). В модифицированном методе Ньютона в последующих приближениях используется матрица, полученная на первом шаге.

Опыт работы с математическими моделями ГТД показывает, что метод Ньютона при решении систем определяющих уравнений является эффективным и достаточно устойчивым. Сходимость к решению может быть нарушена только в случае чрезмерно грубых начальных приближений независимых переменных. В качестве дополняющего часто используют метод прямого поиска, минимизирующий норму простым перебором всех переменных в допустимом диапазоне их изменения. Этот метод менее быстродейственен, чем метод Ньютона, но отличается высокой надежностью. Поэтому при математическом моделировании ГТД начальную минимизацию нормы целесообразно осуществить методом прямого поиска, а после выполнения условия $N \leq 4\varepsilon$ – применить модифицированный метод Ньютона. Решение считается допустимым, если получим $N \leq \varepsilon$. При этом, как правило, максимально допустимая погрешность принимается равной 0,5%.

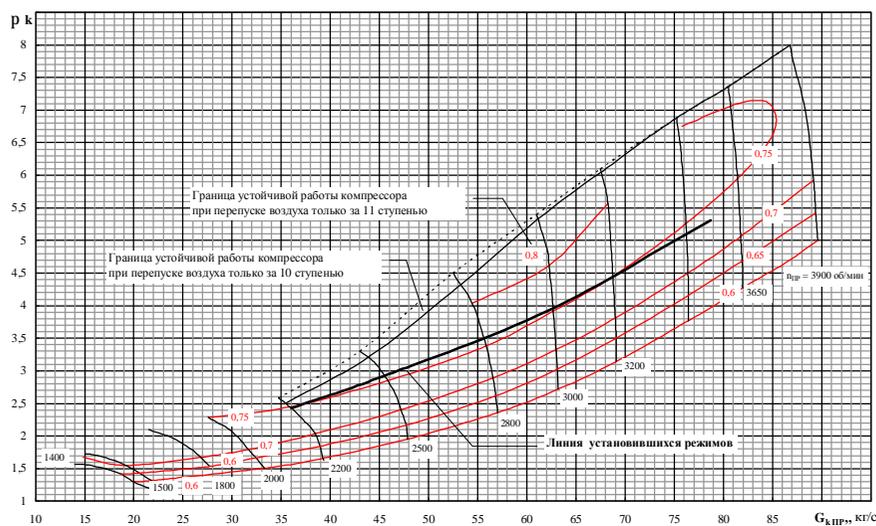


Рис. 2 – Расчетная характеристика компрессора ГТЭ-45(60А) с углами установки НА -30°, -25°, -10°, -10° и перепуском воздуха ΔG=18°

В структурной схеме алгоритма программы для вычисления независимых переменных $x, n_{пр}, \alpha_{кc}, \pi_T$, определенный иерархический уровень занимают подпрограммы математических моделей входного и выходного устройств, компрессора, камеры сгорания и турбины.

Методология ММ рассматриваемой ГТУ основывается на расчетных/действительных характеристиках их основных узлов (Рис.1-3). При этом характеристики элементов проточной части в виде зависимости коэффициента восстановления полного давления от режимных параметров

$$\sigma = 1 - A \left(G \sqrt{P^*} / T^* \right),$$

где G, T^*, P^* - параметры на входе в участок.

При определении внешней мощности коэффициенты полезного действия турбогенератора и редуктора на частичных режимах работы ГТЭ-45(60А) принимаются переменными.

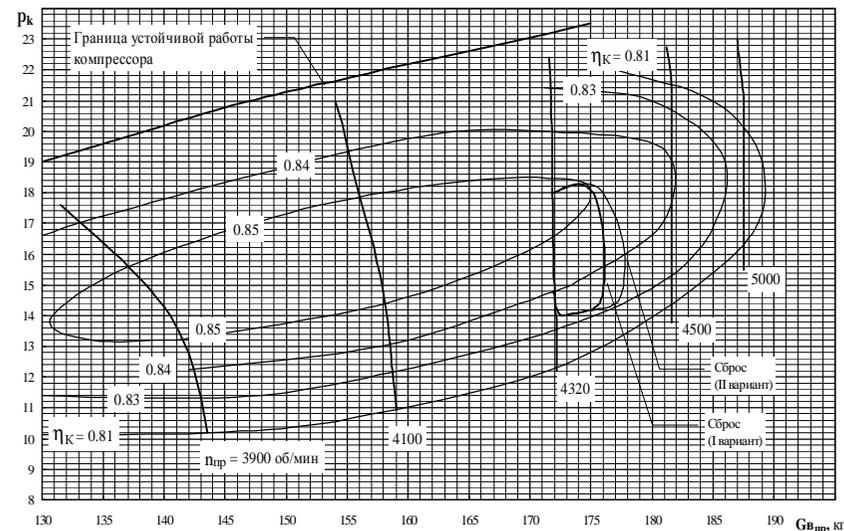


Рис. 3 – Расчетная характеристика компрессора газотурбинного двигателя установки ГТЭ-60А с углами установки НА 0°, 0°, 0°, 0° без перепуска

Таким образом, сформирована ММ двигателя, которую необходимо идентифицировать с целью получения адекватной модели, обеспечивающей минимум (в пределах заданных отклонений) расхождений между данными испытаний изделия и результатами расчета по модели. В некоторых случаях вместо результатов испытаний могут быть использованы расчетные данные, полученные на математических моделях более высокого уровня. При этом, проведение идентификации позволяет уточнить параметры более простых моделей и использовать их вместо сложных, без потери точности.

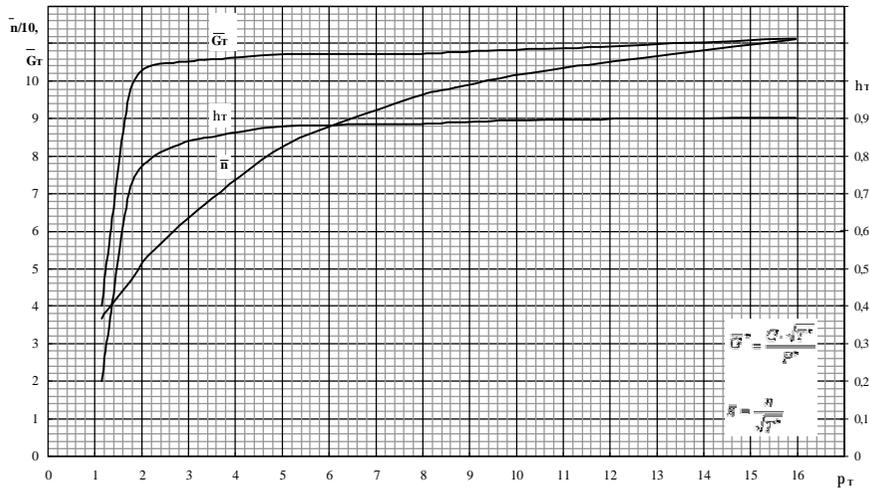


Рис. 4 – Характеристика турбины установки ГТЭ-45 (60А)

Повышение адекватности модели может быть достигнуто с помощью различных методов идентификации, при использовании результатов лабораторных, стендовых и натуральных экспериментов.

В процессе совершенствования методов идентификации пройден путь от интуитивно-логического метода до современных математических методов, реализовать которые позволили высокопроизводительные ПЭВМ.

Весомые результаты могут быть получены при решении задач идентификации в узком смысле, т.е., при решении задач с заданной структурой модели, без ее изменения, только за счет уточнения ряда параметров. Эти параметры являются варьируемыми и выбираются из числа наименее достоверных параметров модели. Чаще всего для энергетических установок это коэффициенты потерь в различных элементах, поправочные коэффициенты, отражающие изменение рабочего процесса в зависимости от режимных факторов, коэффициенты эмпирических и аппроксимационных зависимостей, входящих в состав ММ.

К наиболее часто используемым методам идентификации ММ ГТД можно отнести такие, как: наименьших квадратов; максимального правдоподобия; группового учета аргументов; уравнивания и др. [2,3]. Некоторые специфические подходы к идентификации моделей ГТД приведены в [4].

Большинство из указанных методов предусматривает линеаризацию или другое преобразование ММ в зависимости от реализуемого метода.

В настоящее время разработаны методология и программный комплекс идентификации математических моделей энергетических машин на основе

современных численных методов направленного поиска оптимальных решений, обеспечивающих реализацию задач условной оптимизации в совокупности с ММ установки, отражающей режимные факторы ее функционирования [5,6]. Отличительной особенностью такого подхода является решение задачи без каких-либо преобразований ММ, т.е. расчет критериев идентификации, параметров и характеристик двигателя ведется по тем же алгоритмам, что и при проектировании.

Именно этот подход и будет реализован при создании адекватной ММ ГТЭ-45(60А)

Поскольку задача параметрической идентификации, по сути, представляет собой минимизацию некоторой целевой функции (или нескольких функций) с ограничениями, т.е. задачу условной оптимизации, то ее решение может быть достигнуто с использованием современных математических методов поиска оптимальных решений. Последнее предполагает при постановке задачи: выбор критериев качества, варьируемых параметров и ограничений.

Критерии качества могут быть представлены величинами рассогласования между одноименными параметрами (критериями идентификации), полученными по расчетной модели двигателя и в результате эксперимента, т.н. «внешними невязками». При этом функцией цели может являться как «внешняя невязка» по одному или нескольким параметрам, так и их сумма.

Представляется целесообразным рассмотреть при решении задачи «внешние невязки» по основным параметрам двигателя: мощность на клеммах генератора, расход воздуха на входе в компрессор, температура газов перед турбиной/на выходе из ГТД, частота вращения ротора турбокомпрессора и степень повышения давления.

В общем виде минимизируемая функция может быть представлена как

$$\delta_{II}(X) = |II_{расч}(X) - II_{эсп}|;$$

$$\Phi[\delta_{II}(X^*)] = \min \Phi[\delta_{II}(X)];$$

$$\Phi[\sum \delta_{II}(X^*)] = \min \Phi[\sum \delta_{II}(X)],$$

где δ_{II} – «внешняя невязка» по параметру II ; X – вектор варьируемых параметров; II – параметр двигателя; Φ – функция цели; X^* – вектор оптимальных параметров.

В качестве варьируемых параметров, корректируемых в процессе идентификации (независимых переменных), выбираются коэффициенты моделирования $K_\eta, K_n, K_\pi, K_G, K_{Re}$ характеристик компрессора и турбины в стандартных координатах $\pi^*, \eta_{ad} = f[\lambda_u(n_{np}), \lambda_a(G_{np})]$, а также гидравлические

потери, потери во входных – выходных устройствах, камере сгорания, отборы и подводы воздуха, если они есть.

Ограничения на варьируемые параметры и критерии идентификации определяются исходя из практически допустимого диапазона их изменения для конкретных условий работы двигателя. Обычно допускается отклонение от экспериментальных данных в диапазоне 0,5 – 1%.

В качестве экспериментальных характеристик могут использоваться обработанные соответствующим образом измеренные параметры двигателя, либо расчетно-экспериментальные данные, представленные в виде таблиц, графиков или некоторой программы. Привязка режимов ММ и экспериментальных характеристик может осуществляться по параметру регулирования в системе автоматического управления.

Структурная схема алгоритма идентификации ММ двигателей показана на рис. 4.

Для решения задачи идентификации используется программный комплекс [5]. На первом этапе, по математической модели двигателя, по заданным исходным данным (в соответствии с выбранным режимом работы) и начальному значению вектора варьируемых параметров определяются значения контролируемых величин (критериев идентификации). В свою очередь, из экспериментальных характеристик выбираются значения аналогичных параметров на этом же режиме. Далее, в соответствии с заданным в процентном отношении допустимым отклонением результатов расчета от эксперимента, в автоматизированном режиме определяется диапазон реальных отклонений критериев идентификации и формируется функция цели. Выбирается группа варьируемых параметров и диапазон их изменения. Затем, с использованием методов направленного поиска оптимальных решений, минимизируются «внешние невязки» между одноименными критериями идентификации, вариацией перечисленных выше параметров. Полученные результаты заносятся в архив.

Следует учесть, что в том случае, когда решается задача поиска минимума невязки по одному из критериев идентификации, на остальные критерии накладывается ограничение в заданном диапазоне отклонения от экспериментальных данных.

Тогда, при выборе методов условной оптимизации, предпочтение отдается прямым методам, не требующим вычисления производных, что значительно сокращает время поиска. В основном это: модернизированный метод Нелдера-Мида, вращающихся координат, случайного интуитивного поиска (метод Эгглайса).

Если же одновременно осуществляется поиск минимума невязок для всех или нескольких функций качества, используются методы многокритериальной оптимизации.

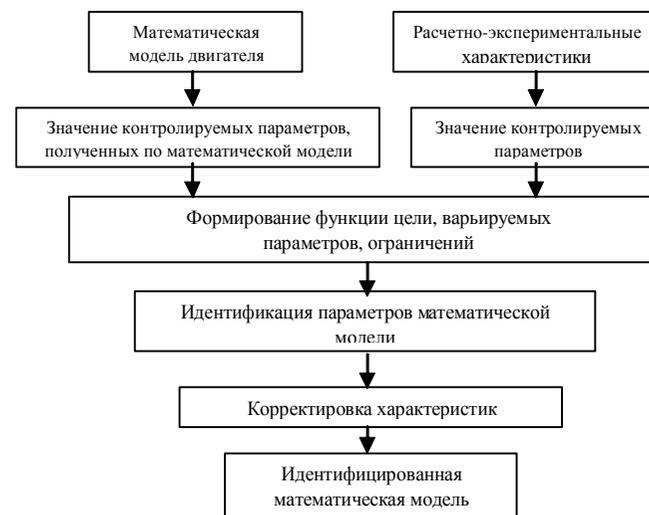


Рис. 5 – Структурная схема алгоритма идентификации математической модели

Поскольку идентификация осуществляется в отдельных точках поля характеристик компрессора и турбины, то в результате могут быть получены наборы коэффициентов моделирования, им соответствующие. Далее выполняется их аппроксимация, после чего корректируются характеристики компрессора и турбины и других узлов (по полученным коэффициентам).

Результаты, найденные по уточненной (идентифицированной) ММ, проверяются на соответствие экспериментальным данным.

Изложенный подход был использован при идентификации ММ одного из авиационных ГТД, для которого имелся большой набор экспериментальных данных. Некоторые результаты расчетов по модели до идентификации и после в сравнении с экспериментальными данными приведены на рис 5.

Здесь наглядно можно оценить расхождение данных, полученных по неидентифицированной ММ с экспериментальной зависимостью и практически полное их совпадение после идентификации.

Таким образом, предлагаются методология и средства создания ММ ГТЭ-45(60А) на основе идентификации ее параметров и характеристик по экспериментальным данным.

Задача может быть решена с использованием модельно-программного комплекса, основными элементами которого являются: математическая модель исследуемого объекта; результаты эксперимента, представленные в числовом, графическом или программном виде; подсистема оптимизации, которая позволяет вести направленный поиск оптимального решения на основе современных математических методов.

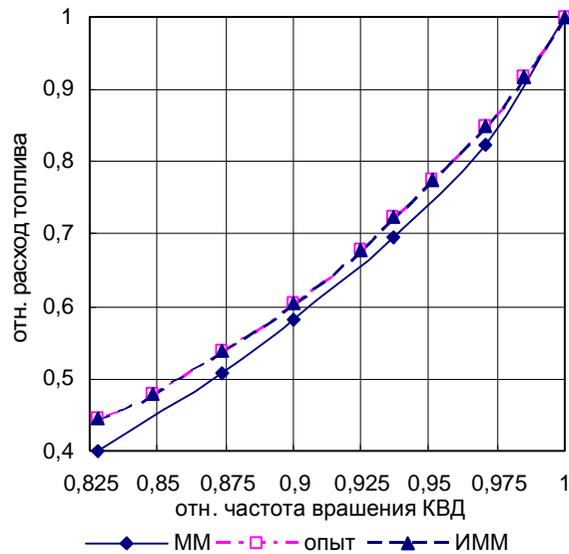


Рис. 6 – Дросельная характеристика ГТД

Решение задачи идентификации обеспечит согласование данных эксперимента с расчетными характеристиками испытываемого двигателя в заданном диапазоне допустимых отклонений ($\pm 0,25-1\%$), а, следовательно, получение адекватной математической модели.

Наличие такой модели позволит сократить сроки доводки, исключить ряд экспериментальных исследований и получать достоверную информацию о параметрах и характеристиках двигателя во всем диапазоне его эксплуатации. Кроме того, модель может быть использована для получения диагностической информации, носителями которой будут измеряемые параметры рассматриваемого объекта.

Список литературы: 1. Коваль В.А., Романов В.В. и др. Основы проектирования газотурбинных двигателей и установок / Б.П. – Харьков: Контраст, 2005. – 375 с. 2. Ахмедзянов А.М., Дубровский Н.Г., Тунаков А.П. Диагностика состояния ВРД по термогазодинамическим параметрам. – М.: Машиностроение, 1983. – 206с. 3. Тунаков А.П. Методы оптимизации при доводке и проектировании газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 1979. – 184с. 4. Епифанов С.В., Кузнецов Б.И., Богаенко И.Н. и др. Синтез систем управления и диагностирования газотурбинных двигателей. – К.: Техніка, 1998. – 312с. 5. Тарелин А.А., Аннопольская И.Е., Антипов Ю.П. и др. Интегрированная среда для оптимального проектирования и доводки авиационных газотурбинных двигателей // Вісник двигунобудування, 2007., № 2. – С. 24 – 28. 6. Тарелин А.А., Антипов Ю.П., Аннопольская И.Е. Основы теории и методы создания оптимальной последней ступени паровых турбин. – Харьков: Контраст, 2001. – 224с.

Поступила в редколлегию 15.05.2008

УДК 330

Г.А. ГОНЧАРОВ

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФИНАНСОВЫХ РАСЧЕТОВ В ВИРТУАЛЬНОЙ СРЕДЕ

Реструктуризация хозяйства для підвищення його гнучкості, збалансованості, стійкості до кризових явищ і зміцнення конкурентноздатності в цілому, вимагає прискорення оборотності не тільки фінансових ресурсів, але і готівки. Ця проблема важлива і для економік, що знаходяться "на розпутьті". Використання можливостей Інтернет-мережі дозволяє значно підвищити швидкість обороту усіх видів платіжних засобів. У цьому зв'язку особливу актуальність і значимість одержує побудова системи показників для виміру ефективності фінансових розрахунків у віртуальному (електронному) середовищі.

Определение эффективности финансовых расчетов – непростая задача. Если рассматривать определение эффективности с использованием традиционного подхода - как отношение результата к затратам, необходимых для достижения этого результата, то решить эту задачу однозначно, вряд ли удастся. Это связано с тем, что например, результат, т.е. эффект затрат, произведенных для достижения этого эффекта, во-первых, как бы «рассеян» по технологическим операциям, обеспечивающим проведение виртуальной сделки и расчета – как ее части. Во-вторых, затраты тоже нельзя определить однозначно. Поскольку для проведения операции на которую и выделены сегодняшние ресурсы, требуется использовать ресурсы, уже затраченные в хозяйстве ранее для создания соответствующей инфраструктуры. Как решить эту проблему?

На практике для измерения эффективности финансовых расчетов в виртуальной среде, поступают следующим образом. Финансирование развития электронных технологий, рассматривают как один из видов инновации.

При определении финансирования внедрения перспективной инновации условно можно выделить несколько этапов:

- определение общей значимости инновации и степень ее прогрессивного влияния на развитие социально-экономических процессов;

- формирование основных направлений дальнейшего перспективного финансирования

принятой гипотезы (если принята гипотеза реализуется успешно);

- определение направлений повышения эффективности финансовых вложений (усиление практической отдачи прошлых, современных и перспективных вложений).

Именно этот третий этап требует конкретных расчетов повышения эффективности (отдачи) финансовых вложений развития системы электронных расчетов. До тех пор - эффективность рассчитывается с использованием подхода «больше-меньше». Суть подхода такова, что сравниваются во времени значения примерно одинаковых показателей. Тогда

инвестиции, сопровождающиеся ростом значения избранного показателя, считаются приносящими эффект, эффективными. И речь может идти о действиях, повышающих эту эффективность

В данном случае, для определения эффективности финансовых операций в виртуальной среде, как правило, используют данные, косвенно характеризующие величину достигаемого эффекта. Они включают широкий набор показателей обеспеченности возможностей широкого доступа к выполнению расчетов при помощи электронных средств всеми категориями пользователей Интернет. В том числе. покупателями Интернет-магазинов и банковских клиентов.

Однако, целостная система показателей эффективности финансовых расчетов в электронной среде до сих пор не создана.

Объем финансовых расчетов в виртуальной среде увеличивается значительными темпами. Это можно продемонстрировать на примере Латвии, одной из новых стран Евросоюза. Здесь в 2004 году, количество товаров и услуг, расчеты за которые осуществлялись в виртуальной среде (через Интернет) составил 77 771 000 ден.ед., но в 2006 этот объем продаж составил уже 305.087.000 ден.ед. (увеличился за три года в 3.9 раза).

Конкретные данные о составе и структуре эффективности применения финансовых расчетов в виртуальной среде можно получить, пользуясь данными таблицы 1.

Таблица 1 – Удельный вес товаров и услуг, проданных с применением расчетов в виртуальной среде (в процентах от общего нетто- оборота соответствующих предприятий)[1;71].

Показатели	Годы			Процентных пунктов (2006-2004)
	2004	2005	2006	
Всего	0,6	1,2	1,4	0,8
В том числе:				
-обрабатывающ. промышленность	0,0	0,1	0,1	0,1
-электроэн., газ и ввозное обслуживание	–	–	–	–
-строительство	–	0,0	0,1	–
-оптовая и розничная торговля	0,9	1,9	2,3	1,4
-продажа горючего (розница)	0,1	0,4	1,0	0,9
-продажа горючего (оптом)	1,3	1,8	3,4	2,1
-гостиницы и рестораны	0,4	0,5	2,0	1,6
-транспорт, хранение, связь	0,9	2,4	2,4	1,5
-транспорт, хранение	1,2	2,6	3,0	1,8
- почта и связь	0,2	0,3	0,3	0,1
-операции с недвижимостью, коммерческая работа	0,1	0,2	0,3	0,2
-компьютеры и связанные услуги	0,2	1,0	1,8	1,6
-отдых, культура, спорт	3,1	0,5	0,6	-2,5

Как видно из данных таблицы1, практически предприятия всех отраслей осуществляют расчет с покупателями с помощью передовых финансовых технологий в виртуальной среде. При этом, объем продаж, расчеты за которые осуществлялись виртуально, за рассматриваемый период составил от чуть более половины процента (0,6%), до почти полутора процентов (1,4%) увеличившись на 0,8 процентных пункта. Использование системы виртуальных расчетов применялось практически всеми отраслями народного хозяйства страны. И наиболее высокими темпами новые технологии финансовых расчетов использовались во всех видах торговли. В том числе в торговле энергоресурсами (горючим- оптом и в розницу), также при выполнении расчетов за различные виды работ. Однако, в отрасли отдыха, культуры и спорта, наблюдалось за рассматриваемый период некоторое сокращения расчетов с использованием виртуальной среды. Полагаем, что это сокращение обусловлено двумя факторами. Во- первых. недостаточным распространением рыночных связей в потреблении продукта упомянутых отраслей, во- вторых, низким уровнем технологического оснащения соответствующих предприятий, не позволяющих осуществить финансовые расчеты за потребленный продукт и услуги, с помощью передовых расчетных технологий.

Какие факторы влияют на повышение эффективности финансовых расчетов в виртуальной среде? Полагаем, что среди них- многие – психологического свойства. Экономическая психология позволяет показать взаимосвязь экономического эффекта и поведенческих, психологических параметров потребителей, пользователей соответствующими платежными системами. На первом месте среди этих условий, находится фактор доступности передовых технологий (Интернета) для пользователей- домохозяйств.

Обобщенные данные о возможностях использования финансовых расчетов домохозяйствами по странам ЕС, на основании данных о доступе основных ячеек хозяйства – домохозяйств – приведены в таблице 2.

Данные таблицы 2 можно использовать для оценки эффективности использования системы расчетов в электронной среде в общем. Например, пользуясь этими данными, можно примерно определить, что возможность пользования Интернетом , в том числе, для проведения финансовых расчетов, в Нидерландах выше, чем, например, в других странах, в том числе, в Эстонии, Латвии, Литве.

Получается, что возможности доступа к проведению финансовых расчетов выше в «старых» странах ЕС. Однако, с помощью этих данных нельзя ответить на вопрос насколько эффективен доступ в каждой из этих стран. Приведенные данные позволяют в целом судить об эффективности проведения операций в Интернет-среде Они обеспечивают возможность сопоставить страны по критерию сравнения «больше-меньше».

Таблица 2 – Доступ к Интернету домохозяйствами по странам ЕС
(в процентах от общего количества домохозяйств)[1;87]

Страна	Годы			Ранг
	2005	2006	2007	
1	2	3	4	5
ЕС(25 стран)	48	51	56	
ЕС(15 стран)	53	54	59	
Латвия	31	42	51	12
Австрия	47	52	60	8
Бельгия	50	54	60	8
Чехия	19	29	35	22
Дания	75	79	78	3
Франция	...	41	49	14
Греция	22	23	25	23
Эстония	39	46	53	11
Италия	39	40	43	17
Ирландия	47	50	57	10
Кипр	32	37	39	19
Великобритания	60	63	67	7
Литва	16	35	44	16
Люксембург	65	70	75	4
Нидерланды	78	80	83	1
Польша	30	36	41	18
Португалия	31	35	40	20
Словакия	23	27	46	15
Словения	48	54	58	9
Финляндия	54	65	69	6
Испания	36	39	45	16
Венгрия	22	32	38	21
Германия	62	67	71	5
Швеция	73	77	79	2

Другим фактором, влияющим на расширение возможностей проводить расчеты в виртуальной среде является существование у пользователей сложившихся традиций пользования электронными технологиями. Оценить эффективность использования Интернета для финансовых расчетов в электронной среде по странам ЕС представляют данные таблицы 3

Таблица 3 – Цели использования Интернета участниками домохозяйств в 2007 году[1;92].(процент от всех пользователей Интернета за последние 3 месяца).

Страны	Банковские расчеты	Электронная почта	Поиск товара	Чтение газет, журналов	Досуг (игры, фото, фильмы, музыка)
ЕС(25 стран)	45	84	82	36	37
ЕС(15 стран)	47	84	84	35	36
Латвия	50	84	71	32	48
Австрия	44	81	71	35	25
Бельгия	52	90	82	25	34
Чехия	24	86	77	45	40
Дания	70	90	83	57	41
Франция	51	76	86	28	34
Греция	12	64	85	47	46
Эстония	83	85	76	79	45
Италия	31	82	70	46	36
Ирландия	42	83	78	18	23
Кипр	31	78	85	58	52
Великобритания	45	85	86	30	36
Литва	43	79	75	65	55
Люксембург	58	91	87	54	43
Нидерланды	77	94	91	47	53
Польша	29	73	62	34	39
Португалия	29	84	83	38	53
Словакия	27	88	69	45	40
Словения	36	83	88	44	46
Финляндия	84	90	86	63	43
Испания	31	81	80	46	48
Венгрия	23	92	83	54	51
Германия	49	88	88	28	29
Швеция	71	86	87	54	44

Как видно из материалов таблицы 3, поиск товара, а также расчет за продукт с использованием передовых поисковых и финансовых электронных технологий, более распространены в странах «традиционного рынка» - «старых» членов Евросоюза (47%), чем эта традиция сложилась среди «новичков» Евросоюза (45%). На первом месте в использовании фактора повышения эффективности применения новых технологий расчетов находится Финляндия(84%).

Однако, это общее правило действует не всегда. Так, , Нидерланды(77%) и Швеция(71%) хотя и характеризуются активностью, в

проведении банковских операций с использованием передовых технологий, превышающей среднеевропейский показатель но уступают Эстонии (83%) которая используя территориальное преимущество- компактность- внедряет привычку у населения пользоваться системами электронных расчетов буквально с детского школьного возраста, реализуя в этих целях специальную программу. Латвия (50%) и Литва (43%) тоже характеризуются в этой области показателями близкими среднеевропейским значениям. В этих странах активно реализуются соответствующие программы внедрения финансовых инноваций.

Еще один важный фактор эффективности расчетных операций в виртуальной среде- участие инноваций (в том числе, передовых финансовых технологий) в создании Валового внутреннего продукта (ВВП). Общие данные о роли интерактивных расчетов в создании валового внутреннего продукта (ВВП) в хозяйстве Латвии – новой стране ЕС приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Индексы ВВП Латвии по видам занятости в 2002-2006 годах (в сравнимых ценах; в процентах к предыдущему году) [2;52].

Вид занятости (классификация NASE)	годы			Изменение (процентных пунктов: 2006-2004)
	2004	2005	2006	
ВВП	108,7	110,6	111,9	3,2
Добавленная стоимость, всего	108,8	110,8	111,5	2,7
Сельское хозяйство, охота, лесничество	103,2	109,5	99,9	-3,3
Рыболовство	109,9	104,5	91,3	-18,6
Добывающая промышленность	110,0	131,2	109,4	-0,6
Обрабатывающая промышленность	106,7	105,9	106,2	-0,5
Электроэнергия, газ и водное обслуживание (водопровод)	105,0	101,8	104,0	-1,0
Оптовая и розничная торговля, ремонт техники	112,4	116,8	117,5	5,1
Гостиницы и рестораны	116,4	114,7	114,3	-2,1
Транспорт, хранение и связь	110,1	113,7	109,3	-0,8
Финансовое посредничество	108,3	111,4	115,5	7,2
Операции с недвижимостью, коммерческая работа	110,1	110,3	117,6	7,5
Государственное управление, оборона, обязат. соц.страхование	104,4	105,8	105,2	0,8
Образование	102,5	104,1	103,4	1,8
Здоровье и социальная защита	102,2	102,	103,9	1,7
Прочие коммунальные, социальные и индивидуальные услуги	108,0	109,1	114,4	6,4

Данные таблицы 4 показывают изменение темпов роста производства ВВП по отраслям занятости латвийского хозяйства за 2004-2006 годы. Из таблицы 3 следует, что темпы производства ВВП за рассматриваемый период были самыми высокими в отраслях, осуществляющих операции с недвижимостью, коммерческую работу, финансовое посредничество, занимающихся оптовой и розничной торговлей, ремонтом техники, а так же в отраслях коммунального, социального и индивидуального обслуживания, в системе профессионального образования. Именно эти отрасли, как видно из таблицы 2 обеспечивают более высокие темпы производства ВВП соответствующих сфер хозяйства.

Вместе с тем, замедление высоких темпов роста ВВП, а иногда и значительное сокращение производства продукта наблюдалось в отраслях рыболовства, сельскохозяйственных. Общая положительная динамика характеризовалась замедлением темпов роста ВВП в отраслях электроэнергетике, газового и обслуживающего хозяйства, а так же в добывающей и обрабатывающей промышленности. Отрасли транспорта, хранения и связи, демонстрируя в общем высокие темпы развития (110,1;113,7; 109,3 % за соответствующие годы), все же характеризовались некоторым замедлением высоких темпов развития(-0,8 процентных пункта за рассматриваемый период).

Получается, что пользуясь этими данными, можно косвенно судить об эффективности финансовых расчетов в виртуальной среде. Условно говоря, здесь эффективность как бы складывается из показателей двух видов: эффективности отрасли финансового посредничества (рост 7,2 процентных пункта за рассматриваемые годы) и эффективности отрасли транспорта, хранения и связи с темпами роста производства ВВП 109,3 процента в 2006 году при снижении показателей роста на 0,8 процентных пункта с 2004 по 2006 годы).

Более точные сведения о роли сектора с высокими технологиями с использованием вычислительной техники приведены в таблице 5.

Как можно видеть из данных таблицы 5, предприятия сектора цифровых технологий увеличили объем произведенной добавленной стоимости с 2001 по 2006 год в 2,1 раза. При этом, значительным увеличением характеризовалась производство добавленной стоимости в отрасли торговли информационными технологиями и в отрасли производства информационных технологий, создающих базу для проведения финансовых расчетов в виртуальной среде.

Рассмотрение факторов, влияющих на увеличение эффективности финансовых расчетов в виртуальной среде позволяет заключить, что время для реализации третьего этапа расширения пользования расчетами в электронной среде в рассматриваемой хозяйственной системе повышения

эффективности проведения финансовых расчетов в виртуальной среде интенсивно приближается.

Таблица 5 – Объем добавленной стоимости, произведенной предприятиями сектора цифровых технологий, ден.ед.[1;8].

Показатели	Годы						
	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2006/2001
Всего	306	332	360	409	471	632	2,1
В том числе:							
- телекоммуникации	197	207	221	237	245	267	1,4
-услуги информационных технологий	40	50	41	47	68	90	2,3
-оптовая торговля информационными технологиями	61	65	84	104	133	246	4,0
-предоставление услуг информационных технологий	298	322	346	388	446	603	2,0
-производство информационных технологий	8	10	14	21	25	29	3,6

Для повышения эффективности новых финансовых технологий, необходимо:

- 1) расширять материальную основу новых финансовых технологий;
- 2) создать широкую статистическую базу данных о результатах внедрения новых финансовых технологий;
- 3) сформировать универсальную систему показателей оценки результативности внедрения инноваций в финансовой сфере.

Список литературы: 1. On Information Society in Latvia: Collection of statistical data: Central Statistical Bureau of Latvia.-Riga.-2007-. p.87. 2. Latvijas statistiskas gadagrāmata 2007: Central Statistical Bureau of Latvia.-Riga.-2007-.lpp.52.

Поступила в редколлегию 15.05.2008

УДК 621.952.5-82

В.Б. СТРУТИНСКИЙ, В.Н. ТИХЕНКО

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ РАСТАЧИВАНИЯ ОТВЕРСТИЙ НА ОТДЕЛОЧНО-РАСТОЧНЫХ СТАНКАХ

Electro-hydraulic system guiding the trajectory of motion of a boring bar cutting edge is considered with laser interferometer usage. Possibility of correction, providing indemnification of not only systematic errors but also random error terms by a forecasting compensating management is rotined.

Введение

При тонком растачивании вращающимся консольным инструментом с постоянным вылетом резца относительно передней опоры шпинделя в связи с наличием геометрических, кинематических и динамических погрешностей, обусловленных различными элементами технологической системы, под действием силовых возмущений возникают смещения вершины резца по нормали к обрабатываемой поверхности [1]. В частности, на точность формы в продольном сечении растачиваемых отверстий в основном влияют размерный износ резцов и их температурное удлинение, а также непрямолинейность направляющих. При растачивании глубоких отверстий погрешности в продольном сечении возрастают из-за податливости борштанги. Непараллельность направления движения стола по отношению к оси шпинделя делает отверстие эллиптическим в поперечном сечении (отклонение от круглости). Кроме того, параметры получаемого эллипса зависят от расположения главных осей жесткости шпиндельной головки и общей податливости технологической системы станка. Возникает задача управления точностью формы детали в продольном или поперечном сечении, когда важно минимизировать величину отклонений формы. С использованием оперативной информации о смещениях инструмента от номинальной траектории можно (без изменения режимов резания) обеспечить управляемое перемещение резца в пространстве с целью стабилизации его вершины на заданной траектории.

Известны исполнительные устройства на основе активных упругих компенсаторов, выполненных из пьезокерамической керамики и способных в небольших пределах изменять свои геометрические размеры под действием управляющего электрического поля [2]. Недостатком является наличие запаздывания и гистерезиса перемещений, а также невозможность обеспечивать большие усилия. Кроме того, для передачи электрических сигналов от датчика, расположенного на вращающемся инструменте, к регулятору с устройствами коррекции и от силового преобразователя к пьезокомпенсатору необходим токосъемник, что снижает надежность всего устройства.

Для обеспечения высокой стабильности выхода резца на заданный размер перед началом растачивания при многократном позиционировании, а также для бесрысочного отвода резца в расточных борштангах применяют упругое деформирование резцедержателя или стержня борштанги [3]. Недостатком таких конструкций является наличие зазоров и сил контактного трения в подвижных соединениях, что приводит к гистерезису.

Целью данной статьи является изложение некоторых результатов разработок и исследований гидравлических систем управления точностью растачивания отверстий на отделочно-расточных станках, выполненных в Одесском национальном политехническом университете на кафедре металлорежущих станков, метрологии и сертификации.

Основная часть

Рациональным способом повышения точности обработки при тонком растачивании является управление положением формообразующего элемента – режущей кромки резца борштанги – при помощи системы автоматического управления. Для этого была разработана и исследована шпиндельная головка с гидравлической системой управления траекторией вращения резца борштанги [4]. Микроперемещения вершины резца осуществлялись в результате изменения давления рабочей жидкости в специальной полости на фланце борштанги. Полость расположена эксцентрично относительно продольной плоскости шпинделя. Первоначально пульсирующее давление в полости борштанги создавалось поворотной управляющей втулкой и вращающимся золотником. Угловое положение втулки устанавливалось после обработки первой детали по результатам измерений расточенного отверстия таким образом, чтобы отверстия во втулке и вращающемся золотнике совпадали в момент приближения вершины резца к большей оси эллипса. При повышении давления в полости фланец борштанги деформировался, что приводило к радиальному смещению вершины резца в направлении к оси вращения шпинделя (на окружность радиуса R). При снижении давления за счет упругих свойств борштанги восстанавливалось прежнее положение вершины резца. Таким образом, борштанга выполняла функцию гидромеханического звена с некоторым передаточным коэффициентом. В дальнейшем для управления давлением в полости использовался электрогидравлический усилитель. Для устранения гистерезиса, связанного с усилителем, вводилась дополнительная обратная связь по давлению в полости.

Проводилось компьютерное моделирование борштанги методом конечных элементов с использованием программного комплекса ANSYS [5]. Определялись перемещения вершины борштанги и напряжения, возникающие при этом в теле борштанги. Например, при изменении давления в полости на 1 МПа величина перемещения вершины менялась на 5 мкм, причем зависимость была линейной (кроме небольшого участка в начале

характеристики). Изменять эту характеристику можно путем выбора площади полости и ее глубины (за счет толщины стенки фланца в месте расположения полости). Однако увеличение площади и уменьшение глубины полости ограничено. Кроме того, при больших частотах вращения борштанги одностороннее расположение полости может приводить к дисбалансу.

Для снижения неуравновешенности и повышения точности регулирования была предложена схема электрогидравлической системы с двумя полостями фланца борштанги (рис. 1). Система содержит борштангу 12 с полостями, расположенными симметрично относительно продольной оси борштанги. Через отверстия в шпинделе 1, на котором закреплена борштанга с резцом 15, каждая полость соединяется с одним из приемных окон 10 электрогидравлического усилителя 7, а через дроссели 2 и 11 с баком насосной установки. Электрогидравлический усилитель содержит поворотную струйную трубку 8 и электромеханический преобразователь 9. В состав системы в качестве измерительного устройства входит когерентный излучатель 4, наклонное зеркало 3 с центральным отверстием, призматический светоотражатель 13, фотоприемник 5, устройство ЧПУ 6, имеющее аналого-цифровой и цифро-аналоговый преобразователи.

Луч от когерентного лазерного излучателя через центральные отверстия в наклонном зеркале, шпинделе и борштанге попадает на призматический светоотражатель, отражается в обратном направлении на наклонное зеркало, а затем отражается от зеркала в фотоприемник. Перемещения призматического светоотражателя регистрируются фотоприемником, который генерирует сигналы, пропорциональные величине перемещения резца (по двум взаимноперпендикулярным осям, которые расположены в поперечном сечении борштанги). При наличии перемещения резца сигналы от фотоприемника поступают в устройство ЧПУ, где сравниваются с заданным сигналом. Если положение резца отличается от заданного, устройство ЧПУ подает команду на электромеханический преобразователь.

Под действием электромагнитных сил происходит смещение струйной трубки, что вызывает изменение давлений в полостях борштанги и деформации ее фланца. Дроссели 2 и 11 обеспечивают подпор на сливных магистралях и настройку давления в каждой полости во время наладки системы. Преимуществом данной системы является то, что информация о микроперемещениях резца осуществляется при помощи бесконтактного метода измерений с наибольшей точностью, достижимой сегодня. За счет приближения оси измерений к вершине резца достигается минимизация эффекта Аббе. Эта информация используется для коррекции процесса растачивания непосредственно во время обработки. Современные электрогидравлические усилители способны обрабатывать до 100-120 сигналов в секунду, что позволяет использовать систему при максимальной частоте вращения борштанги до 3000 мин⁻¹.

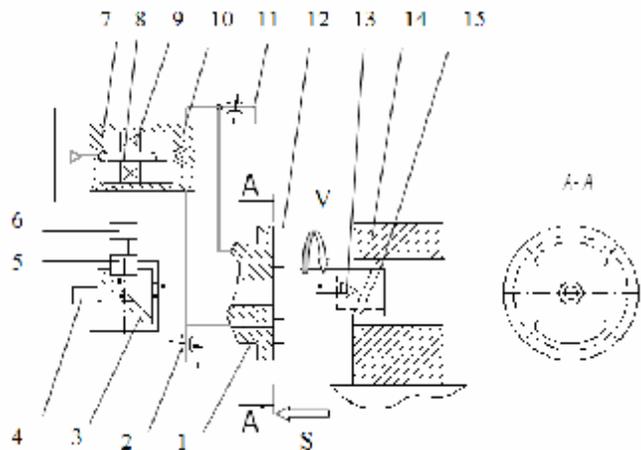


Рис. 1 – Упрощенная схема электрогидравлической системы управления траекторией движения вершины резца расточной борштанги с использованием лазерного интерферометра

При необходимости в рассмотренной схеме с двумя полостями можно подавать рабочую жидкость только в одну полость, при этом перемещения вершины резца при том же давлении значительно возрастают. Это может быть использовано в конце цикла обработки для бесрисочного отвода резца.

При моделировании поведения борштанги в программном комплексе ANSYS (рис. 2) изучались зависимости перемещений вершины резца от разности давлений в полостях, как в осевом, так и в радиальном направлениях.

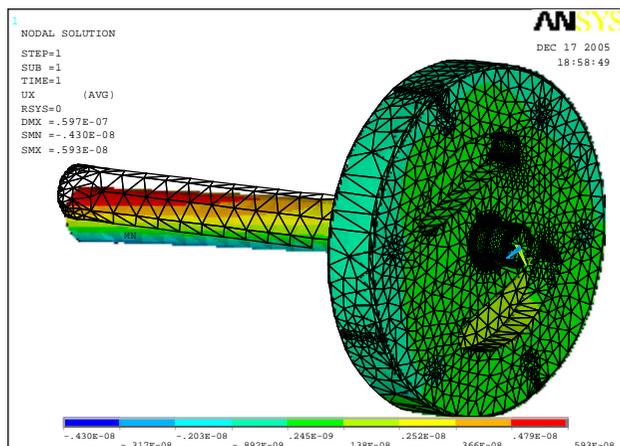


Рис. 2 – Пример моделирования перемещения вершины резца борштанги с двумя полостями в программном комплексе ANSYS

Перемещения в осевом направлении были настолько малы по сравнению с радиальными перемещениями, что их можно не учитывать. Как показал анализ одной из зависимостей радиальных перемещений R (рис. 3) после начального участка (от 0 до 1,3 МПа) при изменении давления p в полости на 1 МПа величина перемещения вершины линейно изменялась примерно на 0,05 мкм. Это значение может быть еще уменьшено за счет увеличения глубин полостей, но при этом требуется проверка напряжений, возникающих во фланце.

Обычные методы коррекции, обеспечивающие компенсацию только систематических погрешностей, могут оказаться недостаточными при выполнении сверхпрецизионной обработки, когда влиянием случайных погрешностей нельзя пренебрегать. В последние годы появился новый метод повышения точности обработки – прогнозирующее компенсирующее управление (ПКУ) [6, 7]. Критерием при ПКУ является минимальная величина отклонений режущего инструмента от заданной траектории. Метод предусматривает измерение погрешностей обработки поверхности детали, обработку результатов измерений, стохастическое моделирование, прогнозирование и компенсирующее управление. Все этапы реализуются непосредственно в процессе обработки в режиме реального масштаба времени.

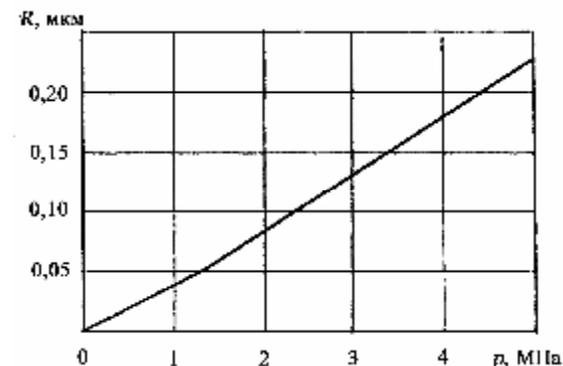


Рис. 3 – Перемещения вершины резца борштанги с двумя полостями

Обычные методы коррекции, обеспечивающие компенсацию только систематических погрешностей, могут оказаться недостаточными при выполнении сверхпрецизионной обработки, когда влиянием случайных погрешностей нельзя пренебрегать. В последние годы появился новый метод повышения точности обработки – прогнозирующее компенсирующее управление (ПКУ) [6, 7]. Критерием при ПКУ является минимальная величина отклонений режущего инструмента от заданной траектории. Метод предусматривает измерение погрешностей обработки поверхности детали,

обработку результатов измерений, стохастическое моделирование, прогнозирование и компенсирующее управление. Все этапы реализуются непосредственно в процессе обработки в режиме реального масштаба времени.

Стохастическое моделирование базируется на описании стохастических процессов для чего требуются авторегрессионные модели (Auto-Regressive model) со скользящим средним. Если ЭВМ станка имеет недостаточное быстродействие, то ограничиваются просто авторегрессионной моделью. При стохастическом моделировании инструментальные погрешности представляются моделью с простой структурой (авторегрессионная модель), которая не требует установления сложных причинно-следственных связей между различными типами погрешностей и их источниками. Важным преимуществом является то, что можно объяснить как случайные, так и повторяющиеся составляющие погрешности. Модель временного ряда представляет собой уравнение, которое связывает наблюдение, полученное в некоторый конкретный момент времени, с наблюдениями, полученными ранее по той же и/или другим характеристикам изучаемой переменной. Порядок авторегрессионной модели определяется из соображений затрат времени на вычисления с учетом возможностей ЭВМ. Из множества моделей для описания динамики временных рядов чаще всего используются три: модель белого шума, авторегрессионная модель первого порядка и авторегрессионная модель второго порядка.

Функционирование системы управления цилиндричностью происходит в определенной последовательности. Вначале при помощи лазерного интерферометра определяется отклонение от цилиндричности растачиваемого отверстия в виде двух составляющих $C_i(X)$ и $C_i(Y)$, которые передаются в устройство ЧПУ (управляющую ЭВМ). Затем воссоздаются данные о погрешности с целью определения действительного отклонения от цилиндричности $C_i(R)$ в направлении воздействия режущей кромки резца борштанги.

На основе анализа временных рядов полученных данных создается авторегрессионная модель отклонения от цилиндричности в следующем виде [6]

$$E_i = \varphi_1 E_{i-1} + \varphi_2 E_{i-2} \dots + \varphi_n E_{i-n} + a_i, \quad (1)$$

где E_i - погрешности обработки, наблюдаемые в i -й момент времени;

φ_j - параметры авторегрессии;

a_i - дискретный белый шум, причем $E(a_i) = 0$ и $E(a_i a_{i-k}) = \delta_k \sigma_a^2$;

где δ_k - дельта-функция Кронекера;

σ_a^2 - дисперсия белого шума.

Отклонение от цилиндричности определяемое по авторегрессионной модели, корректируемой в каждый период i замера, прогнозируется на k шагов вперед, исходя из текущих данных в соответствии со следующим выражением

$$\hat{E}_i(k) = \sum_{j=1}^{k-j} \varphi_j \hat{E}_i(k-j) + \sum_{j=k}^n \varphi_j E_{i+k-j}, \quad (2)$$

где $\hat{E}_i(k)$ - прогнозируемое значение.

В заключение системе ГП выдается управляющая компенсирующая команда, пропорциональная прогнозируемому отклонению. Несмотря на то, что измерялись не сами погрешности обработки, а перемещения резца, применение ПКУ вполне уместно, т.к. исходные данные для построения стохастической модели получены непосредственно в процессе растачивания. Путем анализа результатов предыдущих и текущих измерений погрешности обработки могут быть определены перед их появлением, поэтому система управления успевает скомпенсировать ожидаемую погрешность обработки.

Выводы

Рассмотренная электрогидравлическая система управления траекторией движения вершины резца расточной борштанги с использованием лазерного интерферометра позволяет обеспечить сверхпрецизионную обработку на отделочно-расточных станках (включая безрисочный отвод резца в конце цикла). При этом минимизируются величины отклонений формы детали в продольном или поперечном сечении. С помощью прогнозирующего компенсирующего управления появляется возможность коррекции, обеспечивающей компенсацию не только систематических погрешностей, но и случайных погрешностей обработки. Система может быть реализована как в новых конструкциях шпиндельных узлов, так и при модернизации существующих отделочно-расточных станков.

Список литературы: 1. Схиртладзе А.Г. Повышение точности растачивания отверстий // Технология машиностроения, 2006, №2. – С. 15–17. 2. Мещеряков Р.К., Никольский А.А., и др. Управление точностью обработки при растачивании отверстий // Вестник машиностроения, 1988, № 9. – С. 30–33. 3. Бромберг Б.М. Тонкое растачивание отверстий без повреждения их поверхности при выводе резца // Станки и инструмент, 1988, №6. – С. 19–23. 4. Линчевский П.А., Джуруян Т.Г., Тихенко В.Н. Расширение функциональных возможностей гидроприводов отделочно-расточных станков // Збірник наукових праць Кіровоградського держ. техн. ун-ту. – Кіровоград. 2003. Вип. 13. – С. 98–103. 5. Тихенко В.Н., Жеглова В.М. Компьютерное моделирование упругих деформаций борштанги привода микроперемещений отделочно-расточного станка // Труды Одес. политехн. ун-та. – Одесса. 2005. Вып. 2(24). –С. 57 – 60. 6. Kim K., Eman K.F., Wu S.M. In-Process Control of Cylindricity in Boring Operations // Journal of Engineering for Industry, 1987, №4, p. 291-321. 7. Wu S.M., Ni J. Precision Machining without Precise Machinery // Annal of the CIRP. – 1989. – Vol. 38(1). – P. 533 – 536.

Поступила в редакцию 15.05.2008

В.А. КОВАЛЬ, Е.А. КОВАЛЕВА, В.В. РОМАНОВ, А.В. СКВОРЦОВ

УЧЕТ НЕОСЕСИММЕТРИЧНОСТИ ТЕЧЕНИЯ В ОСЕВЫХ ТУРБОМАШИНАХ

The approach under the account of the defective phenomena is observed by development of mathematical models of current in meridional plane S_2 of axial turbomachines. Comparison of designs and skilled radial distributions of axial and peripheral making speeds behind the vane wheel rotor of a step of the axial-flow compressor is resulted.

При проектировании компрессоров и турбин ГТД, как правило, применяются осесимметричные методы поперечных расчетов в двухмерной, или квазитрехмерной постановки задачи. Такие расчетные схемы предполагают осреднение по шагу уравнений движения в предположении установившегося течения. При осреднении в уравнениях движения появляется сила воздействия лопаток на поток F , а в уравнении неразрывности – коэффициент загромождения χ , которые учитывают тангенциальный наклон и толщину лопаток турбомашин.

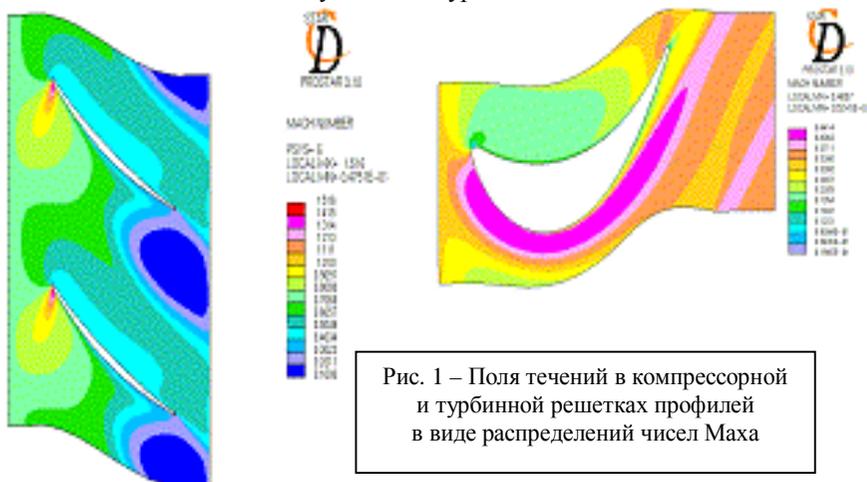


Рис. 1 – Поля течений в компрессорной и турбинной решетках профилей в виде распределений чисел Маха

Исторически полагалось, что течение, близкое к осесимметричному, наблюдается при безотрывном обтекании лишь в средней по высоте канала области и нарушается в области ограничивающих поверхностей проточной части [1,2]. Вместе с тем, поток вязкого сжимаемого газа в турбомашинных имеет сложную трехмерную структуру и, как показывают расчетные и многочисленные экспериментальные исследования, имеет место существенное отклонение от осевой симметрии даже на расчетном режиме

работы турбомашин при согласованной работе ее ступеней. На рис. 1 показана картина течения в межлопаточных каналах компрессорной и турбинной решетках в виде распределения чисел Маха при расчетном обтекании профилей. Видно, что в компрессорной решетке и в случае откорректированной диффузорности наблюдается явно выраженная зона интенсивного торможения потока с последующим сбеганием пограничного слоя на спинке лопатки в развитый аэродинамический след. При этом в нарушенном дефектами скорости потоке проявляется заметная окружная неравномерность ($M=0,1\dots 0,4$), и гипотеза об осесимметричности течения является некорректной. Данная ситуация еще в большей мере проявляется по мере возрастания загруженности лопаточных машин, а также на нерасчетных режимах обтекания решеток профилей. В этом случае дефекты скорости и коэффициент аэродинамического загромождения потока становятся значительными не только в области ограничивающих поверхностей, но и средних сечениях лопаточного венца. Для турбинной решетки числа Маха в окружном направлении могут изменяться в пределах $M=0,2\dots 0,4$ (рис.1).

Радиальное и окружное распределение коэффициента аэродинамического загромождения сильно влияет на поле параметров потока. Поэтому в работах [3 – 5] подчеркивается важность введения этого коэффициента, в дополнение к коэффициенту геометрического загромождения при моделировании течения в турбомашинных. Определяя параметр загромождения K , как отношение осевой составляющей скорости w_a^a , осредненной по площади при средневзвешенной плотности $\bar{\rho}$, к осевой составляющей скорости w_a^m , осредненной по массовому расходу $/2,3/$

$K = \frac{w_a^a}{w_a^m}$, запишем уравнение расхода

$$G = 2\pi \int_{r_{em}}^{r_{nep}} \bar{\rho} w_a^m \chi K r dr = 2\pi \int_{r_{em}}^{r_{nep}} \bar{\rho} w_a^a \chi \psi r dr = 2\pi \int_{r_{em}}^{r_{nep}} \bar{\rho}_0 w_{a_0} \chi r dr, \quad (1)$$

где $\lambda = \frac{t'}{t} = \frac{t-d}{t} = 1 - \frac{d}{t}$ – коэффициент геометрического загромождения, t – шаг решетки, d и t' – толщина лопатки ширина межлопаточного канала в окружном направлении, ρ_0 и w_{a_0} – плотность и расходная составляющая скорости в ядре потока, ψ – коэффициент расхода

$$\psi = \frac{\int_0^{t'} \rho w_a dy}{\int_0^{t'} \rho_0 w_{a_0} dy} = 1 - \frac{\delta^*}{t' \sin \beta_2}, \quad (2)$$

где δ^* – толщина вытеснения, β_2 – угол потока на выходе из решетки.

Таким образом, для учета коэффициента аэродинамического загромождения K в уравнении расхода, необходимо знать параметры в ядре потока и характеристики пограничного слоя или закомочного следа, в зависимости от рассматриваемого сечения вдоль протонной части. Методика расчета параметров следа на любом расстоянии за выходными кромками лопаток предложена в работе [5], но применима лишь в случае малой неоднородности потока, т.е. малых дефектов скорости $Def = u_{\max} / w_0$, где $u_{\max} = w_0 - w_{\min}$ – максимальная дополнительная скорость в следе, w_0 и w_{\min} – скорость в ядре потока и минимальная скорость в следе. В то же время известно, что на предсрывных режимах дефекты скорости могут достигать 70% [3]. Ниже приводится методика определения характеристик аэродинамического следа при больших дефектах скорости с использованием эмпирических зависимостей потерь в осевых компрессорах.

Допуская, что выравнивание давления P и угла выхода потока β_2 происходит в пределах небольшой области (ближнего следа) за выходными кромками решетки [5], для аэродинамического следа запишем коэффициент количества движения j (коэффициент скорости) и коэффициент энергии η

$$j = \frac{\int_0^{t'} \rho w w_a dy / \int_0^{t'} \rho w_a dy}{\int_0^{t'} \rho_0 w_0 w_{a_0} dy / \int_0^{t'} \rho_0 w_{a_0} dy} = \frac{w^m}{w_0} = 1 - \frac{\delta^{**}}{\psi t' \sin \beta_2}, \quad (3)$$

$$\eta = \frac{\int_0^{t'} \rho w^2 w_a dy / \int_0^{t'} \rho w_a dy}{\int_0^{t'} \rho_0 w_0^2 w_{a_0} dy / \int_0^{t'} \rho_0 w_{a_0} dy} = \frac{(w^2)^m}{w_0^2} = 1 - \frac{\delta^{***}}{\psi t' \sin \beta_2}, \quad (4)$$

δ^{**} и δ^{***} – толщины потери импульса и энергии; верхний индекс “m” означает усреднение по массовому расходу.

Рассматривая выражения (3), (4) и учитывая, что для следа $t' = t$, получим

$$\eta = \frac{(w^2)^m}{(w^m)^2} j^2 = \frac{(t - \delta_t^* - \delta_t^{***})(t - \delta_t^*)}{(t - \delta_t^* - \delta_t^{**})^2},$$

где нижний индекс “t” соответствует проекции на наружное направление, и определим формпараметр

$$H_{32} = \frac{1 - \eta}{1 - j}$$

Расчетные исследования для профиля скорости следа Прандтля

$$\frac{\bar{u}}{u_{\max}} = \frac{u}{u_{\max}} = [1 - (\frac{y}{\delta/2})^{1.5}]^2 \quad (5)$$

показали, что при осевом выходе потока из решетки ($\beta_2 = 90^\circ$, $\delta_t = \delta$) в случае несжимаемой жидкости ($M = 0$) и дефекта скорости $Def = 1$ отношение $(w^2)^m / (w^m)^2$ составляет 1,007 при $\delta_t = 0,1t$ и 1,041 при $\delta_t = 0,5t$, т.е. когда проекция ширины следа на окружное направление составляет соответственно 10% и 50% шага решетки. При числе Маха $M = 1$ эти величины равны 1,006 и 1,036. По экспериментальным данным [4] у торцовых поверхностей отношение может достигать 1,06. Согласно выполненным расчетам известное выражение $\eta = j^2$ можно использовать при $Def < 0,3$ и $\delta_t / t < 0,5$. При этом погрешность не превышает 1%.

Для случая $Def \approx 0$, используя выражение (3), определим

$$\eta = j^2 = 1 - \zeta = (1 - \frac{\delta^{**}}{\psi t \sin \beta_2})^2,$$

$$H_{32} = \frac{1 - \eta}{1 - j} = 1 + j$$

Полагая $d^* = d^{**}$, можно получить часто используемое выражение $\zeta = 2\delta^{**} / t \sin \beta_2$. Для компрессорной решетки, принимая $w_2 \sin \beta_2 = w_1 \sin \beta_1$, коэффициент потерь записывают в виде

$$\zeta = \frac{2\delta^{**}}{t \sin \beta_2} \cdot \frac{\sin^2 \beta_1}{\sin^2 \beta_2}.$$

В случае значительных дефектов скорости найдем

$$\eta = \frac{(w_2^2)^m}{w_{20}^2} \cdot 1 - \frac{w_{20}^2 - (w_2^2)^m}{w_{20}^2} = 1 - \frac{L_{1-2} - L_{1-2s}}{w_{20}^2 / 2} = 1 - \zeta,$$

где L_{1-2} и L_{1-2s} – работа сжатия при политропном и изоэнтропическом процессах.

Используя опытные данные по величинам потерь в осевых компрессорах $\zeta = 2\Delta P^* / \rho w_1^2$ и известные способы распределения по высоте канала, учитывая, что расчет течения осуществляется в несколько приближений. Определим коэффициент восстановления полного давления

$$\sigma = 1 - \frac{k}{k+1} \zeta \lambda_1^2 \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_1^2\right)^{\frac{1}{k-1}}$$

и параметры потока на выходе из решетки. Далее вычислим скорость в ядре потока

$$w_{20} = \sqrt{2C_p [T_2^* - T_1 (P_2 / P_1)^{\frac{k-1}{k}}]},$$

коэффициенты ζ, η, j и формпараметр H_{32} .

Выполняя предварительные расчеты по влиянию сжимаемости и неравномерности потока на параметры следа, для принятого профиля скорости (5) находятся зависимости $H_{12} = \delta^* / \delta^{**}$, H_{32} от $M_{20} = w_{20} / \sqrt{kRT_{20}}$ и Def . Поскольку формпараметр H_{32} практически не зависит от M_{20} ([3]) то после определения $Def = f(H_{32})$, вычисляются формпараметр $H_{21} = f(Def, M_{20})$, коэффициент расхода $\psi = 1 / ((1-j)H_{12} + 1)$ и условные толщины следа, необходимые в качестве замыкающих соотношений при решении системы уравнений.

Таким образом, используя эмпирические зависимости потерь и предложенную методику определения характеристик закомочного следа при больших дефектах скорости, можно учесть коэффициент аэродинамического загромождения при расчете течения в осевых компрессорах, включая и предсрывные режимы работы.

На рис.2 показаны радиальные распределения осевой и окружной составляющих абсолютной скорости за РК, а также степени повышения полного давления в колесе ступени вблизи границы вращающегося срыва.

Здесь сплошная линия – эпюры, полученные с помощью метода, учитывающего нарушение осевой симметрии потока и кривизну линий тока [3].

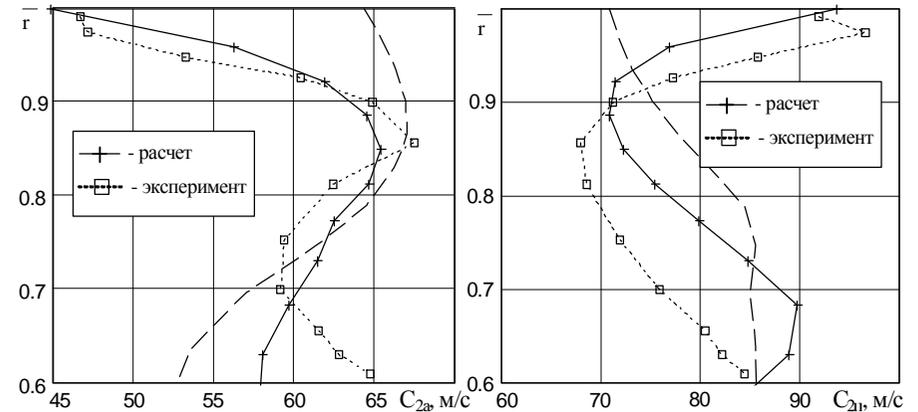


Рис. 2 – Радиальные эпюры параметров потока

за РК ступени на предсрывном режиме ($\bar{C}_a = 0.316$):

—+— расчет; —□— опыт; ---- расчет в осесимметричной постановке

Пунктирная линия соответствует распределениям C_{2a} , C_{2u} , найденным без учета этих явлений. Видно, что предложенный метод позволяет более точно описать поля параметров на предсрывном режиме.

В результате многочисленных численных исследований влияния аэродинамического загромождения проточной частью компрессора на форму движения потока в сравнении с осесимметричной постановкой задачи установлено, что ошибка в определении кинематических параметров может составлять порядка 40 %, что делает проблематичным использование широко применяемых в практике проектирования осесимметричных методов расчета.

В настоящее время авторами статьи начаты работы по разработке метода поверочного расчета осевой газовой турбины с учетом нарушения осевой симметрии потока и кривизны линий тока. В качестве замыкающих соотношений для пограничного слоя при численном решении уравнений 2-D задачи будут использованы результаты обобщений продувок решеток турбинных профилей.

Список литературы: 1. Сироткин Я.А. Аэродинамический расчет лопаток осевых турбомашин. - М.: Машиностроение, 1972. - 448 с. 2. Жуковский М.И. Аэродинамический расчет потока в осевых турбомашин. - Л.: Машиностроение, 1967. - 327 с. 3., Коваль В.А., Романов В.В. и др. Основы проектирования газотурбинных двигателей и установок / Б.П. - Харьков: Контраст, 2005. - 375 с. 4. Дринг, Джослин. Моделирование течения в меридиональной плоскости осевых турбомашин// Энергетические машины и установки. - 1986. - №2. - С. 7-17. 5.Хирш, Дринг. Расчетные модели течения в турбомашин при осреднении по массовому расходу и импульсу параметрах потока// Энергетические машины и установки. - 1988. - №3. - С. 38- 49.

Поступила в редколлегию 15.05.2008

УДК 621.753.8.

А.Я. МОВШОВИЧ, И.В. МАНАЕНКОВ, М.М. БУДЕННЫЙ

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЙ ПНЕВМОУДАРНОЙ ШТАМПОВКОЙ

У статті приведені результати експериментально-аналітичного дослідження закону розподілу виробничих погрешностей при виконанні розділових операцій методом пневмоударного штампування.

Пневмоударная штамповка для выполнения разделительных операций применяется в условиях опытного, индивидуального и мелкосерийного производства при изготовлении партии от 500 до 5000 деталей в год. Как правило такие партии штампуются одновременно на одном копир-пуансоне без снятия оснастки с пресса до полного окончания работы над всей партией. Перешлифовка рабочих частей штампа производится во время профилактических осмотров и ремонтов в промежутках между работой.

Поэтому при исследовании закона распределения производственных погрешностей рассматривалась совокупность деталей в отдельно изготовленной партии.

Для установления закона распределения отклонений производственных погрешностей при пневмоударной штамповке были проведены исследования над шестью наименованиями деталей, три из которых получились вырубкой, а в трех других случаях пробивались отверстия.

Для установления закона распределения отклонения производственных погрешностей при пневмоударной штамповке были проведены исследования над шестью наименованиями деталей, три из которых получались вырубкой, а в тех других случаях пробивались отверстия.

Из анализа производственных погрешностей, возникающих при штамповке деталей с применением пневмоударной штамповки следует, что среди источников возникновения производственных погрешностей имеется доминирующий фактор, а именно, износ режущих кромок копир-пуансона (матрицы), который связан функциональной зависимостью с временем работы штампа.

Изучение влияния доминирующего фактора (износа матриц и пуансонов) на отклонение размеров штампуемых деталей от номинала производилось путем анализа точностных диаграмм операций вырубкой-пробивки.

Точностные диаграммы достаточно полно отражают влияние доминирующего фактора, так как пробы для их построения снимались со штампов последовательно, через определенные промежутки времени, соответствующие одной тысяче отштампованных деталей.

Установлено, что размеры деталей изготавливаемой партии в единицу времени изменяются равномерно.

Аналитическая зависимость при изготовлении партии деталей размерами 90-10000 штук выражается уравнением прямой линии.

Из теории вероятностей следует, что при наличии среди источников, вызывающих производственные погрешности доминирующего фактора, равномерно изменяющегося во времени, рассеивание отклонений одной производственной партии должно подчиняться закону равной вероятности.

При интервале изменений случайной величины x от a до b уравнение дифференциальной функции распределения или плотности вероятности будет иметь следующий вид:

$$f(x) = \frac{1}{(b-a)} \quad (a \leq x \leq b)$$

Интегральная функция равномерного распределения выражается следующим уравнением для $a < x < b$

$$F(x) = \int_a^x f(x) dx = \int_a^x \frac{dx}{b-a} = \int_a^0 \frac{dx}{b-a} + \int_0^x \frac{dx}{b-a} = \frac{x-a}{b-a};$$

Наряду с доминирующим фактором, каким является износ рабочих элементов штампа, имеется ряд производственных погрешностей случайного характера, оказывающих существенное влияние на закон распределения погрешностей штампуемых деталей.

Изучение характера распределения случайных производственных погрешностей проводилось методом кривых “мгновенного” распределения.

Для построения кривых “мгновенного” распределения выборка объемом 200-250 штук отбиралась из деталей снятых со штампа последовательно, что позволило практически устранить влияние доминирующего фактора.

Полученные данные позволяют сделать вывод, что распределение случайных производственных погрешностей при пневмоударной штамповке подчиняется закону нормального распределения.

Плотность вероятности или дифференциальная функция распределения случайной величины непрерывного типа, подчиняющейся закону нормального распределения, имеет следующее выражение:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2n}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}}$$

где: x – переменная случайная величина;

$f(x)$ – плотность вероятности;

σ – среднее квадратическое отклонение случайной величины x от \bar{x} ;

\bar{x} – среднее значение (математическое ожидание) величин x

e – основание натуральных логарифмов, где $e=2,71828$, $p=3,14$

Интегральный закон нормального распределения выражается в общем виде следующей формулой:

$$F(X) = \int_{-\infty}^x f(x)dx = \frac{1}{\sigma\sqrt{2n}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} dx$$

Если случайная величина x следует закону нормального распределения, то достоверно, что она может принимать любые численные значения в пределах $\pm\infty$. Для практического использования закона нормального распределения ограничим зону рассеивания случайной величины пределами $\bar{X} \pm 3\sigma$, т.е. в пределах 6σ .

Таким образом, закон распределения погрешностей штампуемых деталей представляет собой композицию распределения погрешностей по закону равной вероятности и нормальному закону.

Из теории вероятностей известно, что если случайная величина представляет собой сумму независимых случайных величин, каждая из которых подчиняется своему закону распределения, то закон распределения суммы может быть найден по законам распределения слагаемых.

Если известно, что плотность распределения x равна $f(x)$, а плотность распределения y равна $f(y)$, то плотность распределения суммы $f(z)$ находится решением следующего интеграла:

$$f(z) = \int_0^{\infty} f(x)f(z-x)dx = \int_0^{\infty} f(y)f(z-y)dy$$

где $z=x+y$, откуда $y=z-x$ и $x=z-y$

$$f(y) = f(z-x) = \frac{1}{b-a}$$

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2n}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2n}} e^{-\frac{(z-y-\bar{x})^2}{2\sigma^2}}$$

где в показателе при e величина x заменена на $x=z-y$.

После проведения математических преобразований получили зависимость для определения среднего значения Z для закона композиции.

$$z = \bar{x} + \bar{y} = \bar{x} + \frac{b-a}{2};$$

Дисперсия закона композиции равна:

$$\sigma_z^2 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2 = \sigma_x^2 + \frac{(b-a)^2}{12}$$

Выводы:

1. Установлено, что распределение отклонений производственных погрешностей для деталей одной партии характеризуется: величиной поля рассеивания, характером распределения отклонений в этом поле, соотношением между величиной поля рассеивания и нуля допуска.

2. Доминирующим фактором, влияющим на точность пневмоударной штамповки является погрешность износа капира пуансона (матрицы).

3. Установлено, что распределение погрешностей штампуемых деталей под влиянием действия доминирующего фактора подчиняется закону равной вероятности, а под действием случайных факторов – закону нормального распределения.

Список литературы: 1. Чижиков Н.В., Буденный М.М., Мовшович А.Я. Аналитическое определение рассеивания размеров при листовой штамповке. ((Сб. “Вестник НТУ ХПИ” – 2001.- Выпуск 10, Харьков, с. 37-41. 2. Мовшович А.Я., Горницкий А.Я., Кузнецова Л.Г. Исследование точности деталей, получаемых вырубкой-пробивкой в переналаживаемых штампах на основе композиционных материалов. (\Сб. Вестник НТУ ХПИ. – 2001 – Выпуск 11, Харьков, с 69-79).

Поступила в редколлегию 15.05.2008

Є.В. КОНОПЛЯНЧЕНКО, О.В. РАДЧУК, В.П. ЯРЕМЕНКО,
В.М. КОЛОДНЕНКО

**НЕОБХІДНІСТЬ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОЇ РОБОТИ
ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ РОЗБИРАННЯ ВИРОБІВ
ОПТИМІЗАЦІЄЮ ЧАСОВИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЛАНЦЮГІВ**

The structure of time technological chains is considered. The mathematical models of elements of time structure and technological process are submitted. On base micro-level of the analysis of operational structure the paths of provision of rational operation of technological system in real conditions of maintenance are specified.

Життєвий цикл виробу містить кілька етапів, у тому числі – підготовка виробництва, виготовлення, експлуатація, ремонт та утилізація. На етапі конструкторської та технологічної підготовки виробництва закладаються основні характеристики в конструкцію виробу, які впливають на ефективність його виробництва, використання, ремонту, утилізації (рис. 1).



Рис. 1 – Взаємозв’язок технологічних показників на різних етапах життєвого циклу виробів

Аналіз сучасних технологій ремонту машин показує значне відставання рівня технологічного оснащення та технологій, що використовуються на виробничому та ремонтному підприємствах. Однією з причин такого положення є відсутність методик синтезу оптимальних технологічних процесів ремонту. Складність рішення задач висока у зв’язку з тим, що

оригінальний не тільки шлях до місця дефекту, але і технологія відновлення елемента, що вийшов з ладу. Це пов’язане з випадковістю появи дефекту і різною надійністю складових частин машини.

Значний обсяг складально-розбиральних робіт у трудомісткості ремонту, низький рівень їхньої механізації та автоматизації приводять до значних простоїв дорогого технологічного устаткування. Керування працездатністю засобів технологічного оснащення є однією з найскладніших задач промислового виробництва.

Одним з напрямків забезпечення працездатності таких систем є оптимізація часових технологічних ланцюгів розбирання виробів.

Аналіз науково-технічної літератури і практики виробництва вказує на те, що при визначенні послідовності розбирання інколи використовується технологічна схема складання виробу.

В складальному виробництві якісно різні операції виконуються за різними законами, протікають у різних умовах, отже, з різною тривалістю їхнього виконання. Таким чином, при різній тривалості суміжні операції або поглинають, або накопичують оборотний заділ, що у свою чергу приводить до простою устаткування, або до міжопераційного лежання деталей у черзі перед устаткуванням. Виходи устаткування з ладу приводять до зміни часу виконання операції, накладаючи ряд обмежень на протікання технологічного процесу.

Час протікання технологічного процесу (ТП) складання характеризується тривалістю виробничого циклу ($T_{\text{ц}}$), часом простою робочих місць ($t_{\text{пр}}$) і часом лежання предметів праці у виробництві ($t_{\text{м. о.}}$)[1]. Всі три характеристики, особливо дві останні, сильно залежать від значення максимальної тривалості однієї з операцій, від середньої тривалості всіх операцій і від ступеня асинхронності тривалості операцій.

У результаті проведених досліджень були розроблені математичні моделі складових елементів часової структури (1), (2). Це дозволило визначити закономірності розподілу часу всередині ТП і виявити типові часові структури [2], у яких в якості t_i виступає час виконання i -ї операції на i -ім обладнанні.

$$t_{ij}^{np} = \begin{cases} t_{\max} - t_i, & \text{нпу } t_{\max} \text{ ф } t_i \\ 0, & \text{нпу } t_{\max} \text{ п } t_i \end{cases},$$

де $t_{\max} \in [t_1, t_{(i-1)}]$, $j = 1, n$

$$t_{ij}^{M.O.} = \begin{cases} (t_{i+1} - t_{\max}) \cdot (j-1), & \text{нпу } t_{\max} \text{ п } t_{i+1} \\ 0, & \text{нпу } t_{\max} \text{ ф } t_i \end{cases},$$

де $t_{\max} \in [t_1, t_i]$, $j = 1, n$

При наявності в часовій структурі паралельних ланцюгів (вузлових складань) її побудова відбувається з урахуванням лімітних операцій з максимальною тривалістю.

Для паралельних ланцюгів коригування структури відбувається згідно залежностей:

$$t_{ij}^{MO'} = \begin{cases} (t_{\max} - t_i) \cdot (j-1), & \text{нпу } t_{\max} \mathbf{f} t_i' \\ 0, & \text{нпу } t_{\max} \mathbf{p} t_i' \end{cases},$$

де $t_{\max} \in [t_1, t_2]$, $j = 1, n$

$$\Delta t_{ij}^{M.O.} = \begin{cases} (t_i' - t_{\max}) \cdot (j-1), & \text{нпу } t_{\max} \mathbf{p} t_i' \\ 0, & \text{нпу } t_{\max} \mathbf{f} t_i' \end{cases},$$

де $t_{\max} \in [t_1, t_{(i+1)}]$, $j = 1, n$

Використовуючи розроблені математичні моделі часу простою устаткування і часу міжопераційного лежання, на підставі типових часових структур [3], з'являється можливість прогнозування ефекту експлуатації технологічної системи в реальних виробничих умовах з урахуванням динаміки розвитку процесу розбирання. Так як час простою устаткування і час міжопераційного лежання є як позитивними факторами, що підвищують надійність експлуатації, так і негативними факторами, що знижують ефективність експлуатації технологічної системи та збільшують тривалість виробничого циклу, то з метою раціонального синтезу ТП необхідно зробити комплексну оцінку наслідків присутності даних факторів у часовий складової технологічного процесу розбирання виробу.

Наявність на і-й стадії ТП t^{np} і/чи t^{mo} є часовим резервом, що підвищує надійність експлуатації технологічної системи (ТС).

Для кількісної оцінки впливу сукупного резерву часу на надійність експлуатації ТС із показників, раціонально скористатися комплексним показником надійності експлуатації – коефіцієнтом готовності устаткування K_g . Даний вибір визначається сутністю показника, що дозволяє кількісно оцінити вплив часової складової, пов'язаної з проведенням робіт по відновленню на експлуатаційну надійність технологічної системи в цілому. Розглянемо докладно структуру елементів K_g . Коефіцієнт готовності дорівнює відношенню часу експлуатації до сукупного часу експлуатації і часу позапланових ремонтів [2]. У таким чином K_g ТС можна представити у вигляді:

$$K_g = \frac{F_o}{F_o + T_{рем}}, \quad (5)$$

де F_o – дійсний річний фонд часу експлуатації устаткування, год ;

$T_{рем}$ - не суміщений час, затрачуваний на позапланові ремонти, зв'язані з відмовами устаткування, год .

$T_{рем}$ визначається залежністю:

$$T_{рем} = \Delta t_i^{vidn} = \left[((M(t_i) - t_{ij} + \frac{\omega_i}{2}) + \Delta t_i^{nad}) - (t_i^{np} + t_{ij}^{mo}) \right] \cdot \lambda_i, \quad (6)$$

де w – поле розсіювання часу виконання операції

Δt_i^{nad} – допуск на надійність виконання операції

I_i - потік відмов на і-ому устаткуванні.

За умови, що $M(t_i) \approx t_i$ і $\Delta t^{nad} \gg \omega/2$ формула (6) перетворюється в залежність:

$$\Delta t_i^{vidn} = [\Delta t_i^{nad} - (t_i^{np} + t_{ij}^{mo})] \cdot \lambda_i = (\Delta t_i^{nad} - \Delta t_i^{pez}) \cdot \lambda_i$$

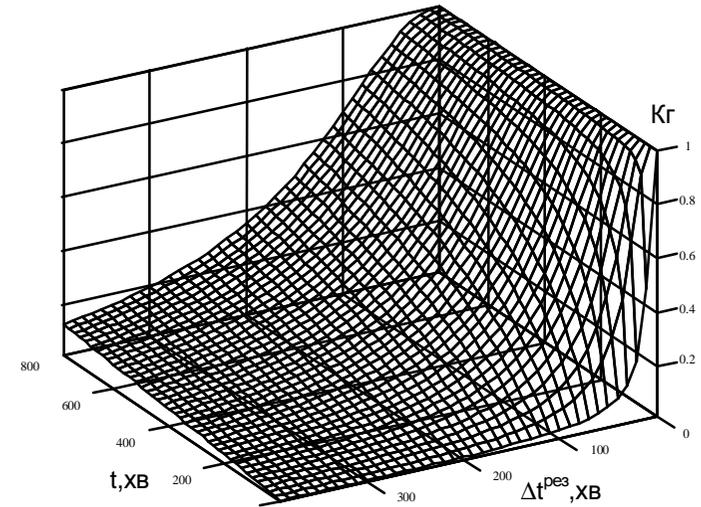


Рис. 2 – Залежність надійності експлуатації від резерву часу

Складова $T_{рем}$ в залежності (5) з'являється в наслідок недостатнього сукупного резерву часу при виконанні і-ої операції складання або повної його відсутності див. рис.3а.

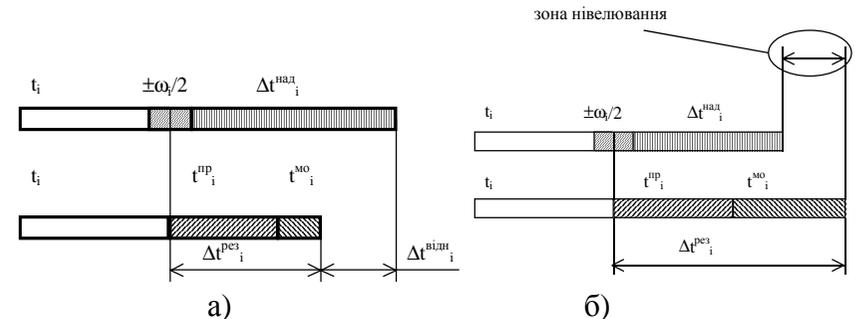


Рис. 3 – Приклади впливу елементів часу операції на роботу ТС

У тому випадку, коли час відновлення після відмови на конкретній операції не виходить за межі сукупного часового резерву цієї операції, то наслідки відмови устаткування не впливають на ритмічність роботи технологічної системи (рис. 3б), що у край важливо в умовах автоматизованого виробництва. Але при цьому слід урахувати вірогідність появи зони нівелювання, яка при оптимізації повинна зникнути. В прикладі, наведеному на рис. За неминуча відмова всієї технологічної системи через занадто малий часовий резерв.

Таким чином наявність у часовій структурі ТП часу міжопераційного лежання і часу простою устаткування може підвищувати надійність експлуатації технологічної системи в цілому за рахунок введення частини часу виконання заходів по відновленню після відмови устаткування в діапазон резерву часу, пов'язаного з дискретністю ТП.

Запропонований метод дозволяє на етапі підготовки виробництва класифікувати існуючі варіанти часових структур ТП та визначити раціональний завдяки розробленому алгоритму. Отриманий в результаті дослідження метод може бути використаний при проектуванні нових ТП на машинобудівних підприємствах та при аналізі структури процесу на раціональність побудови, що дозволить в повній мірі використовувати внутрішні резерви технологічної системи, зокрема часові.

Але технологічну схему складання виробу доцільно використовувати при повному розбиранні виробу. При частковому розбиранні виробу, до деталі, що вийшла з ладу, необхідні методи, які оптимізують технологічний процес розбирання, зокрема, по технологічній собівартості.

Відомо, що повне розбирання устаткування при ремонті небажане, тому що при цьому порушуються відповідальні з'єднання, ушкоджуються працездатні деталі. Тому при ремонті важлива як правильна дефектація так і вибір оптимального шляху до вузла або деталі, що вийшла з ладу і вибір раціональних засобів технологічного оснащення для виконання розбірних робіт.

Для вибору оптимального складу операцій та операційного комплексу (ОК) технологічного процесу розбирання будують мережеву модель переходу від виробу в зборі ($S_{и}$) до дефектного розібраного місця ($S_{к}$).

Вершини графа відповідають ОК, ребра мають вагові характеристики - технологічну собівартість виконання операції. На одному рівні знаходяться ОК, що можуть бути використані на даному етапі технологічного процесу.

На рис. 4 представлена мережева модель технологічного процесу розбирання. Використовуючи програму оптимізації методом лінійного програмування вибирається оптимальний у заданих умовах варіант.

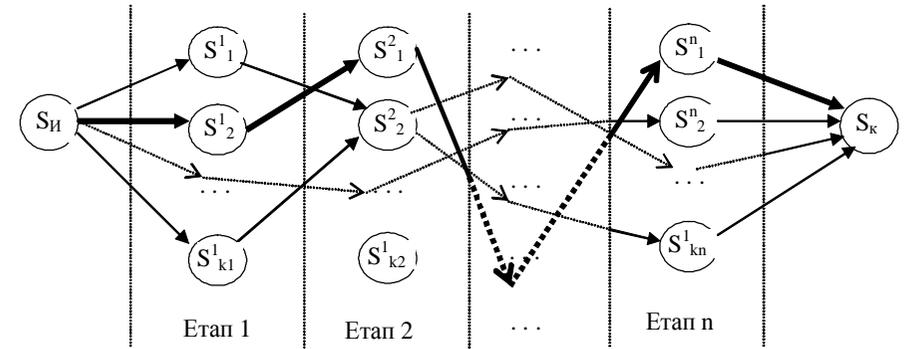


Рис. 4 – Мережева модель технологічного процесу розбирання

На сьогодні варіантність рішення задачі розбирання, через обмежену кількість різновидів ОК для виконання розбірних операцій, невелика. Тому задачу оптимізації вирішують методом лінійного програмування. При збільшенні кількості альтернативних ОК задача вирішується методом динамічного програмування.

Для раціональної організації виробництва необхідно в комплексі оцінювати вплив всіх елементів часу технологічного процесу, на економічні показники і показники надійності експлуатації, з огляду на наслідки мінімізації.

Підводячи підсумок можна констатувати, що питання забезпечення ефективної роботи технологічних систем за рахунок оптимізації часових технологічних ланцюгів досить потужно висвітлені на етапі виробництва виробів, але питання дослідження законів розподілу часових характеристик процесу на етапі ремонту та утилізації виробу потребують подальшого розвитку та вивчення.

Список літератури: 1. Конопляченко Е.В., Захаров Н.В. Прикладное применение теории временных технологических цепей в процессах сборки изделий// Сборка в машиностроении и приборостроении, №9, 2006. С. 5-9. 2. Конопляченко Е.В., Радчук О.В., Яременко В.П. Обеспечение надежности эксплуатации технических систем технологическими методами// Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. Науч.-техн. сб. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2007.- Вып.72. – С.115-119. 3. Конопляченко Е.В., Радчук О.В., Никоноров С.Г. Повышение надежности технологических систем разборки изделий с жестким временным допуском// Вісник НТУ «ХПІ». Зб. наук. праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2008. - №4 – С.36-41.

Поступила в редколлегию 15.05.2008

КОНСТРУКТИВНО - ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ СНИЖЕНИЕ МАССУ РКТ

The paper presents the design-technology solutions to improve the performances of space technology articles

Одной из технических задач, решаемых при разработке новых изделий, и в особенности аэрокосмических, является выбор конструкционных материалов, а также применение новых технологий и, как правило, использование на базе новых материалов и технологий новых конструктивно-технологических решений, обеспечивающих снижение массы конструкций.

Большие возможности в снижении массы и повышении надежности конструкций могут быть достигнуты за счет использования материалов с повышенными механическими и технологическими свойствами.

Значительный выигрыш по весовым характеристикам получается за счет применения алюминиевых сплавов легированных скандием и литием, так как сплавы с литием помимо высоких прочностных характеристик и пониженной плотности ($\gamma=2,47\text{г/см}^3$) имеют высокий модуль упругости, который равен $7500\text{-}7800\text{ кг/мм}^2$, в то время как у алюминиевых сплавов он составляет 7000 кг/мм^2 . Сравнительные характеристики алюминиевых сплавов, широко используемые в конструкциях ракетно-космической техники, представлены в табл.1.

Таблица 1

Материал	Плотность, γ , г/м^3	Предел прочности при растяжении, $\sigma_{\text{в}}$, кгс/мм^2	Модуль упругости, E, кгс/мм^2	Удельная прочность, $\sigma_{\text{в}}/\gamma$, км	Удельная жесткость, E/ γ , км
АМг6М Al-Mg	2,64	32	7000	12,9	2651
АМг6Н Al-Mg	2,64	41	7000	15,5	2651
1570 Al-Mg-Sc	2,64	40	7100	15,1	2689
1545 Al-Mg-Sc	2,65	38	7000	14,3	2641
1420 Al-Mg-Li	2,47	42	7500	17,0	3036
1245 Al-Cu-Li	2,76	55	7800	19,9	2826

Важным моментом при разработке новых летательных аппаратов является учёт совместимости применяемых материалов с различными условиями эксплуатации. И в этом случае большие возможности по снижению массы конструкции могут быть достигнуты за счет внедрения материалов многофункционального назначения.

Применение биметаллических переходников вместо фланцевых соединений, в которых к тому же тяжело обеспечить герметичность стыка в течение значительного срока эксплуатации изделия, исчисляемого годами, позволяет снизить вес конструкции. В настоящее время отработана технология получения биметаллических листов толщиной до 11 мм с соотношением толщин 5,5 АМг6 + 5,5 12Х18Н10Т, из которых в дальнейшем методом последовательной штамповки стаканов и механической обработки получают кольцевые биметаллические переходники для сварки трубопроводов из разнородных материалов сталь – алюминий. Количество переходов при вытяжке стаканов зависит от диаметра биметаллического переходника и доходит до 10 – 12 с проведением отжига после каждого перехода.

Для получения крупногабаритных биметаллических переходников освоен комбинированный способ получения биметаллических плит композиции алюминиевый сплав 1201 + титановый сплав ВТ6 сваркой взрывом с использованием промежуточного тонкого биметаллического слоя АД1-ВТ1-0 суммарной толщиной 4 мм (2 мм АД1 + 2 мм ВТ1-0), получаемого горячей прокаткой.

Для конструкций, работающих в цеховых условиях, освоено изготовление биметаллических переходников путём соединения разнородных частей внутренней резьбой с последующей герметизацией кольцевого стыка “холодным” газодинамическим напылением слоя композиции Al 80% + SiC 20%.

Ощутимое снижение при соединении монтажных стыков трубопроводов в труднодоступных местах даёт применение втулок из материала, обладающего памятью восстановления формы (“нитинола”). Технология герметизации горловин топливных баков из алюминиевого сплава успешно решена путём применения специальных обжимных колец из “нитинола”. Данная технология позволяет производить герметизацию топливных баков, установленных на изделии в запрограммированном состоянии, а также она обеспечивает отсутствие электромагнитных излучений, вредно влияющих на установленные на изделии высокоточные приборы.

Особо следует отметить эффективность применения композитных материалов, как полимерных (ПКМ) так и на металлической матрице (МКМ), позволяющих в ряде случаев достигнуть 30 – 35 % снижения веса

конструкций по сравнению с конструкциями, выполненными из традиционных металлических материалов.

Также значительное снижение массы дает применение трехслойных конструкций с сотовым алюминиевым наполнителем и обшивками из углепластика с различными схемами укладки. В качестве армирующего материала используются отечественные углеволокна марки "ЛУПО1" и французские марки "Порше". С использованием этих материалов отрабатывается технология изготовления промежуточных межступенных отсеков диаметром до 4000 мм и головных обтекателей диаметром до 5000 мм длиной более 6000 мм. Внедрение этих материалов по сравнению с аналогами из металлических материалов также позволяет достигнуть снижения массы конструкции на 20 – 35% и увеличить жесткость на 10-15%.

В случае применения для изготовления ферменных конструкций трубчатых элементов из металлокомпозита АМг6-В с пределом прочности 110-130 кг/мм² и модулем упругости 24000 кг/мм² достигается снижение массы конструкции до 25-35%. Для их использования в ферменных конструкциях совместно НПО «КОМПОЗИТ» отработана технология получения труб из МКМ АМг6-В с законцовками из традиционных свариваемых металлических материалов.

Большой интерес представляет разработка и внедрение технологии получения сварных конструкций из алюминиевых сплавов, в особенности, топливных крупногабаритных баков, фрикционной сваркой трением. Основными преимуществами фрикционной сварки являются:

1. Возможность сварки разнородных материалов, а также несвариваемых алюминиевых сплавов аргонодуговой (ААрДЭС) сваркой (сплавы Д16, В95 и др.).
2. Более высокая по сравнению ААрДЭС прочность сварных швов:
 - для АМг6 $\sigma_{\text{в}} = 33 \text{ кг/мм}^2$ (для ААрДЭС $\sigma_{\text{в}} = 28 \text{ кг/мм}^2$);
 - для 1201 $\sigma_{\text{в}} = 31 \text{ кг/мм}^2$ (для ААрДЭС $\sigma_{\text{в}} = 24 \text{ кг/мм}^2$);
 - для АМг6+1201 $\sigma_{\text{в}} = 32 \text{ кг/мм}^2$ (для ААрДЭС $\sigma_{\text{в}} = 24 \text{ кг/мм}^2$).
3. Гораздо меньше послесварочные деформации, незначительная усадка шва.
4. Меньшая в 2 раза зона термического влияния.
5. Не требуется высокой квалификации оператора.

К недостатку фрикционной сварки следует отнести большие усилия, передающиеся сварочным инструментом на технологическую оснастку и, как следствие, необходимость в более мощной и виброустойчивой ее конструкции. Тем не менее внедрение фрикционной сварки обеспечит

снижение веса конструкций летательных аппаратов и их надежность в эксплуатации.

Заслуживает внимания и работа проводимая совместно с фирмой «Белльхофф» (Германия) по использованию пружинных соединительных элементов взамен стальных футорок. Для многократного ввинчивания стальных болтов в детали из алюминиевых сплавов немецкой фирмой «Белльхофф» разработаны и широко используются пружинные соединительные элементы HeliCoil, которые изготавливаются из различных материалов (нержавеющая сталь, никель, высокопрочный алюминий, бронза и др.) и работают в различных условиях. В конструкции изделий нашего предприятия для этих целей применяются стальные резьбовые втулки - футорки. Следует отметить, что трудоемкость изготовления и установки на клей одной стальной резьбовой втулки составляет 0,8 н/час с последующим отверждением клея в течение 18-24 ч. При этом массы стальных резьбовых втулок составляют от 5 до 45 г (в зависимости от диаметра), а пружинных соединительных элементов – от 0,8 до 12 г. К другим основным преимуществам пружинных соединительных элементов «HeliCoil» следует отнести:

- равномерное распределение осевой нагрузки между витками резьбы, благодаря чему одна и та же несущая способность соединения «втулка-корпус» достигается для пружинной вставки «HeliCoil» при меньшем ее наружном диаметре по сравнению с обычной стальной футоркой. Это позволяет уменьшить поперечный габарит посадочного места;
- не требуется клей или герметик для посадочного места;
- стопорение болта в отверстии по типу самоконтрящейся гайки (для втулок HeliCoil *screw lock*), с возможностью многократной разборки;
- стабильно низкая шероховатость резьбы вставки (полированная поверхность) снижает коэффициент трения и, следовательно, напряжения кручения в затянутом болте, повышает износостойкость соединения при многократных сборках и стабильность усилия затяжки при том же самом крутящем моменте.

Внедрение пружинных соединительных элементов «HeliCoil» позволит снизить массу изделий, трудоемкость изготовления, цикл сборки и значительно снизить расход материала.

Разработка перечисленных выше и других перспективных конструкций и технологий, обеспечивающих повышение надежности, долговечности, снижение веса позволяют успешно решать вопросы повышения тактико-технических характеристик и создания конкурентоспособные изделий ракетно-космической техники.

А.С. КОТОВ

АНАЛИЗ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАКТОРОВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ПЕРЕНАЛАЖИВАЕМОСТЬ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ЛИНИЙ, МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ В СЕРИЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

У статті розглянуті питання розробки і впровадження переналагоджуваних автоматичних ліній для обробки широкої номенклатури деталей в умовах серійного виробництва.

При традиционной организации технологического процесса в мелкосерийном производстве время обработки детали составляет всего 5% общего времени от получения заготовки до выхода готовой продукции, причем в этой доле машинное время составляет лишь 20%. На промежуточных операциях и пролеживании деталей теряется 95% времени. Значительное сокращение этих потерь достигается при организации комплексно-автоматизированных производств за счет концентрации операций, синхронизации основных и вспомогательных переходов, автоматизации загрузочно-разгрузочных, транспортных и складских работ, общего повышения производительности, вызванного автоматизацией процессов и др. (1)

В настоящее время разрабатываются и внедряются переналаживаемые автоматизированные линии (ПАЛ) для обработки широкой номенклатуры деталей в серийном производстве.

В состав ПАЛ входят современные многоцелевые станки типа "Обрабатывающий центр", транспортно-передающие и другие вспомогательные устройства, электронно-вычислительные машины для управления всеми процессами. Стоимость такой линии, даже по сравнению с обычными станками с программным управлением, очень высока. Отсюда следует, что при эксплуатации такой линии необходимо обеспечить ее работу с высокой экономической эффективностью.

В серийном производстве эту задачу можно решить в том случае, если автоматизированная линия имеет возможность быстро перестраиваться с обработки деталей одной конструктивно-технологической группы на обработку деталей другой группы. Вот почему ключевой проблемой при создании автоматизированных комплексов в серийном производстве является обеспечение быстрой их переналаживаемости при освоении новых изделий.

Высокая степень автоматизации и повышенные затраты на ПАЛ должны окупаться соответствующим повышением производительности труда. По данным некоторых предприятий, это повышение должно быть в пределах $1,1 \div 1,2$; коэффициент повышения может колебаться в широких пределах, это зависит от конкретных условий производства. Показатель это очень важен, расчет его необходимо вести по единой методике.

Повышение производительности в $1,1 \div 1,2$ раза за счет автоматизации загрузки станка может быть выполнено при условии количества деталей партии не менее 40 шт. для труднообрабатываемых деталей, например типа тел вращения, и не менее $20 \div 25$ шт. для деталей средней трудоемкости, например плоских и корпусных.

Перевод деталей на автоматизированные участки при годовой программе 20 деталей неэффективен ввиду резкого возрастания удельных затрат, связанных с частой переналадкой станков, погрузочно-разгрузочных средств, программирования; при годовой программе более 200 деталей – нецелесообразен, так как такая программа характерна для серийного и крупносерийного производств с высокой оснащенностью и производительными станками. (2)

Переналаживаемые автоматизированные линии характеризуются групповой формой организации технологического процесса, базирующегося на общности базовых и обрабатываемых поверхностей единой последовательности обработки. Групповое производство в условиях серийного производства позволяет значительно повысить технико-экономические показатели производственной деятельности участков и качество выпускаемой продукции. Применение комплексной автоматизации в серийном производстве немыслимо без внедрения групповых методов обработки.

В условиях серийного и мелкосерийного производств наибольшее распространение получил метод группирования деталей по применяемому для их обработки оборудованию, общности настройки станка, по единству технологической оснастки. Представляется, что этот метод группирования в условиях ПАЛ в наибольшей степени отвечает требованиям ее быстрой переналадки. Современная организация ТПП группового производства для ПАЛ должна строиться на базе стандартизации и унификации.

Особенно важно на этапе подготовка, на основе методики группирования деталей, создать конструктивно-унифицированные размерные и технологические ряды изделий в целях упрощения и ускорения перехода с изготовления одной конструкции на изготовление другой, унифицировать

действующие технологические процессы, создать условия для автоматизации процессов и т.д.

Вопрос классификации при этом – один из стержневых вопросов: с него должна начинаться разработка основ подготовки группового производства. В классификаторе деталей, обрабатываемых в ПАЛ, должны найти отражение такие основные технологические признаки, как общность технологических операций, применяемого оборудования, режимов обработки, технологической оснастки.

Так как свойства деталей разнообразны по характеру, а их численное значение колеблется в широких пределах, то и оборудование, применяемое в ПАЛ, будет самым различным (по принадлежности к группе, типу, уровню автоматизации и т.п.). При обработке деталей одной конструктивно-технологической группы и при переходе на обработку деталей другой группы возникает необходимость в переналадке соответствующих функциональных элементов станков. Для того чтобы переналадка стала возможной и чтобы ее можно было выполнить с наименьшими затратами, необходимо, чтобы оборудование (даже разных групп) обладало свойством конструктивной и технологической преемственности. Это требование должно обязательно учитываться при создании нового оборудования и модернизации старого. Повышение конструктивной и технологической преемственности оборудования достигается путем заимствования и унификации. Создание автоматизированного оборудования из взаимозаменяемых унифицированных и стандартных элементов позволяет придать его конструкции свойство обратимости, т.е. многократного применения его элементов в новых компоновках оборудования. Переналадка такого оборудования при смене конструктивно-технологической группы деталей заключается в замене одних унифицированных элементов другими.

Сменяемые функциональные элементы станков должны обеспечивать обработку определенного диапазона типоразмеров обрабатываемых деталей.

Переналаживаемые автоматизированные линии предъявляют особые требования и к технологической оснастке.

Создание оптимальных унифицированных конструкций приспособлений и их элементов для многоцелевых станков, определение и экономическое обоснование типажа, номенклатуры и количества оснастки возможно только на основе системного анализа оснащаемых концентрированных операций. При анализе должны быть выявлены факторы, определяющие схемы и качественные стороны конструкции. Учет этих факторов особенно важен при подготовке оснащения ускоренными методами, например, при выборе из имеющегося комплекта УСПО.

При выборе схемы базирования приспособления необходимо обеспечить свободный доступ режущих инструментов к обрабатываемым поверхностям с максимального числа сторон, возможность удаления стружки, а также возможность контроля установки детали в исходное положение. Необходимо учитывать также, что схема базированных во многом определяет сложность механизмов автоматической загрузки заготовок в приспособление.

Особенностью обработки деталей на многоцелевых станках является и то, что обработка отверстий мерным инструментом производится, как правило, без направления режущего инструмента. Требование предотвращения увода инструмента должно быть учтено при разработке конструкции приспособления.

При выборе схемы базирования приспособления необходимо обеспечить свободный доступ режущих инструментов к обрабатываемым поверхностям с максимального числа сторон, возможность удаления стружки, а также возможность контроля установки детали в исходное положение. Необходимо учитывать также, что схема базирования во многом определяет сложность механизмов автоматической загрузки заготовок в приспособление.

Особенностью обработки деталей на многоцелевых станках является и то, что обработка отверстий мерным инструментом производится, как правило, без направления режущего инструмента. Требование предотвращения увода инструмента должно быть учтено при разработке конструкции приспособления.

Полная автоматизация процесса обработки деталей превращает приспособление в неотъемлемую часть станка, т.е. оборудование и оснастка должны составлять одно целое, образуя типовые переналаживаемые блоки. Оснастка должна снабжаться блоками управления и другими элементами автоматизации для программирования делительных операций, перемещения на другую позицию, обеспечения кантования или перемещения детали после обработки, синхронизации работы приспособления с работой транспортных устройств, манипуляторов, стружкоотводящих приспособлений, автоматической переналадки приспособления и др. Управление приспособлением должно осуществляться от системы управления станка, работа или ЭВМ, управляющей всем комплексом.

Кроме нижеуказанного, к приспособлениям применяемым в ПАЛ, предъявляются требования:

- широкие возможности и быстрота переналадки;
- высокий уровень стандартизации на основе унификации, типизации и агрегатирования;
- возможность многократного использования при смене объектов

изготовления;

- соответствие конструктивных параметров компоновочной схеме и конструкции грузочных устройств;
- высокая точность;
- агрегатирование и блочно-модульное построение конструкции по заданным техническим параметрам;
- простота и надежность управления.

Из проведенного анализа проблем создания и внедрения перенастраиваемых автоматизированных линий можно прийти к выводу, что основными конструктивно-технологическими факторами, определяющими перенастраиваемость технологического процесса, являются:

1. Факторы, связанные с предметом труда:

- конструктивная форма деталей;
- виды обрабатываемых и базирующих поверхностей;
- точность выполнения размеров;
- шероховатость;
- габаритные размеры;
- материал;
- вид заготовок.

2. Вид технологического процесса:

- единичный;
- типовой;
- степень детализации;
- последовательность операций;
- режим резания;
- схемы базирования.

3. Факторы, связанные со средствами и орудиями труда:

- технологическое оборудование;
- технологическая оснастка;
- режущий инструмент;
- грузочно-разгрузочные и транспортные средства.

Список литературы: 1. Бойцов В.В. Научные основы комплексной стандартизации технологической подготовки производства. – М.: Машиностроение, 1982, 319с.
2. Воскобойников Б.С. Комплексно-автоматизированные системы из станков с ЧПУ для обработки корпусных деталей. – М.: Станки и инструмент. 1999. - № 5. – с. 31 – 34.

Поступила в редколлегию 15.05.2008

УДК.338.366.4

М.В. ЛИТВИНЕНКО

УЛУЧШЕНИЕ ОРГАНИЗАЦИОННЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ПЛАСТМАССОВЫХ СЦИНТИЛЛЯТОРОВ

Стаття присвячена проблемі організації високоефективного виробництва пластмасових сцинтиляційних профілів, призначених для комплектації радіометричної апаратури для досліджень фізики високих енергій. У результаті комплексного вирішення науково-організаційних, технологічних та економічних завдань, що мають місце при виробництві вітчизняних пластмасових сцинтиляторів, вирішені дві першочергові: збільшена продуктивність і знижена виробнича собівартість.

Article is devoted to a problem of the organization of highly effective manufacture plastic scintillation the structures intended for a complete set of the radiometric equipment for researches of physics high energy. As a result of the complex decision scientific - organizational, science of materials, the technological and economic tasks having a place by manufacture domestic plastic scintillator, two are solved prime: productivity is increased and the industrial cost price is reduced.

Современный рынок пластмассовых сцинтилляторов (ПС) требует от руководителей предприятий, специализирующихся на их выпуске, значительных усилий по обеспечению конкурентных преимуществ (качество/цена) продукции, которые являются гарантом продолжительного эффективного функционирования предприятия и его положения на внутреннем и внешнем производственных рынках.

Большим спросом в настоящее время при строительстве детекторных установок для экспериментов в области ядерной физики и физики высоких энергий приобретают длиномерные пластмассовые сцинтилляторы в виде полос (ПС стрипов) длиной до 7 метров, со сбором света через спектросмещающее волокно (WLS-волокно). Спрос на такие изделия на мировом рынке (Япония, США, Швейцария, Франция) достаточно высокий при условии гарантии высокого качества.

При организации производственного процесса ПС стрипов имеет место тесное сотрудничество материаловедов, специалистов по механической обработке и экономике. В первую очередь это связано со сложностью и определенной новизной производства длиномерных ПС стрипов. Существует ряд работ, посвященных вопросам производства ПС [1-4]. Бесспорный лидер в исследовании процессов полимеризации и обработки – Институт сцинтилляционных материалов НТК "Институт монокристаллов" НАН Украины, г. Харьков.

Анализ существующей ситуации производства отечественных ПС-стрипов показал – на сегодняшний день, учитывая, что удалось добиться значительных результатов в технологии производства [5, 6], мало эффективно

функционируют организационная и финансовая составляющие. Имеют место значительные материальные и трудовые затраты на производство ПС стрипов, а прибыль от их реализации с трудом можно назвать удовлетворительной. На международном рынке цены на ПС продукцию уже сложились и в данном случае необходимо добиться снижения затрат на их производство за счет эффективной организации производственного процесса и разработки оригинальной экономической стратегии.

Цель данной работы – улучшение экономических и организационных процессов производства отечественных ПС.

Основываясь на опыте организации обработки ПС подчеркнута особая важность в мероприятиях ориентированных на качественное улучшение экономических и организационных процессов производства отечественных пластмассовых сцинтилляторов (рис. 1).

Задачи, решаемые при организации высокоэффективного производства ПС стрипов

Научно-организационные	Материаловедческие	Технологические	Экономические
<ul style="list-style-type: none"> • комплексное решение задач, направленных на организацию рационального производства соэкструзионных стрипов с учетом объема и качества готовых ПС 	<ul style="list-style-type: none"> • правильный выбор для полимеризации ПС марки мономерного сырья; • получение и подготовка к экструзии блочного полистирольного сцинтиллятора; • выбор материала светоотражающего покрытия с подходящей для экструдирования вязкостью 	<ul style="list-style-type: none"> • отработка технологических режимов процесса полимеризации для получения сцинтилляционного материала с высокой прозрачностью и сцинтилляционной эффективностью и молекулярно-массовым распределением • механическая обработка 	<ul style="list-style-type: none"> • снижение затрат на проектирование; • снижение длительности цикла производства изделий; • сокращение затрат на материал; • сокращение затрат на единицу продукции; • уменьшение величины оборотных средств (в части незавершенного производства)

Рис. 1 – Организация высокоэффективного производства ПС стрипов

В ходе сотрудничества НТК "Институт монокристаллов" НАН Украины, ООО НПП «Амкрис-Пласт» и НТУ «ХПИ» при решении материаловедческих задач получены следующие результаты [6]:

– в качестве мономерного сырья выбран мономер стирола высшей очистки с содержанием основного вещества не менее 99,8 % масс. и наличием ненормированных примесей (дивинилбензол, бензальдегид, фенилацетат и т.п.) в пределах 0,0005 – 0,01 % масс.;

– получен блочный полистирольный сцинтиллятор, материал которого легко формируется в стрипы требуемых размеров и конфигурации при

оптимальных режимах оборудования, а готовые ПС стрипы соответствуют по размерам, форме и свойствам условиям эксплуатации.

Технологические задачи включают всю совокупность вопросов по технологии получения блочного сцинтиллятора на основе полистирола, по технологии его экструдирования, по аппаратному оформлению технологических процессов. К ним относятся:

– отработка технологических режимов процесса полимеризации, которая связана: с разработкой условий подготовки сырья для экструзии стрипов; с разработкой технологических параметров экструзии при которых расплав хорошо формируется в стрипы нужной формы и размеров, а эксплуатационные характеристики готовых ПС соответствуют требуемым значениям;

– выбор режима соэкструзии для стрипов с прочным и равномерным по толщине покрытием;

– выбор условий фрезерования канавки на стрипе для спектросмещающего волокна;

– выбор типоразмера оборудования таким образом, чтобы максимально использовать его возможности, обеспечивать высокую производительность при качественном изготовлении стрипов;

– разработка технологического регламента – рекомендаций по созданию формулирующего оборудования.

Как уже отмечалось научно-организационные задачи – это совокупность задач, направленных на организацию рационального производства стрипов с учетом объема и качества готовых ПС. Одна из главных задач создания серийного способа производства – повышение суточной производительности установки. Проведенная модернизация установки позволила повысить суточную производительность в три раза (табл. 1).

Таблица 1 – Сравнительный анализ технических возможностей установки для получения ПС стрипов до и после ее модернизации

До модернизации	После модернизации
<ul style="list-style-type: none"> • отсутствует система охлаждения • скорость экструзии – 30-40 см/мин • объем загрузки – 60 л • суточная производительность – 35 шт 	<ul style="list-style-type: none"> • установлена система охлаждения • установлен насос – скорость экструзии 170-200 см/мин • новый рабочий цилиндр – объем загрузки 260 л • суточная производительность – 100 шт

Если рассматривать большой временной цикл (например, месяц), то наблюдается периодичность в количестве полученных стрипов (см. рис.2,а) и плато на графике роста суммарного количества продукции (рис. 2,б).

Периодичность экструзионного процесса определяется тем, что стадия подготовки к экструзии блочного полистирольного сцинтиллятора (полуфабриката) занимает четверо суток. На данном этапе именно периодичность полимеризационного процесса ограничивает месячную производительность на уровне 1500-1600 ПС стрипов.

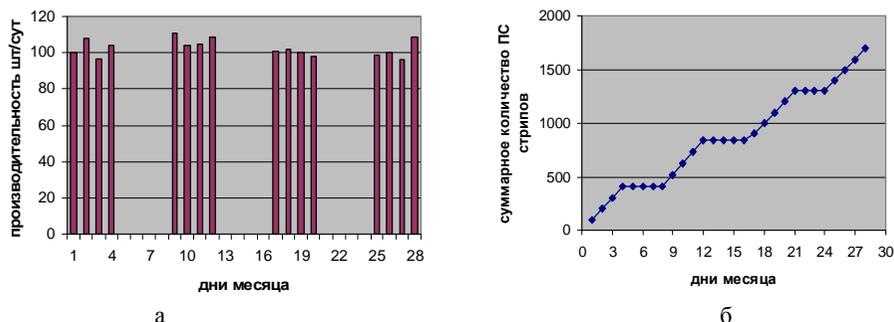


Рис. 2 – Суточная производительность промышленной установки (а) и рост суммарного количества ПС стрипов (б) в течение месяца

Для устранения перерывов в подготовке полуфабриката на участке экструзии было рекомендовано изготовить и ввести в эксплуатацию второй полимеризатор. Наличие второго полимеризатора позволило вести подготовку полуфабриката по очереди с первым и обеспечило постоянное его наличие. Принципиально в схеме экструзии ничего не изменилось, но были устранены простои из-за отсутствия расплава блочного сцинтиллятора. В результате производительность увеличилась почти в два раза (рис. 3).

Автором разработана и внедрена система производственного контроля качества, позволяющая выявить бракованные ПС стрипы еще вначале производственного цикла их изготовления (рис. 4).

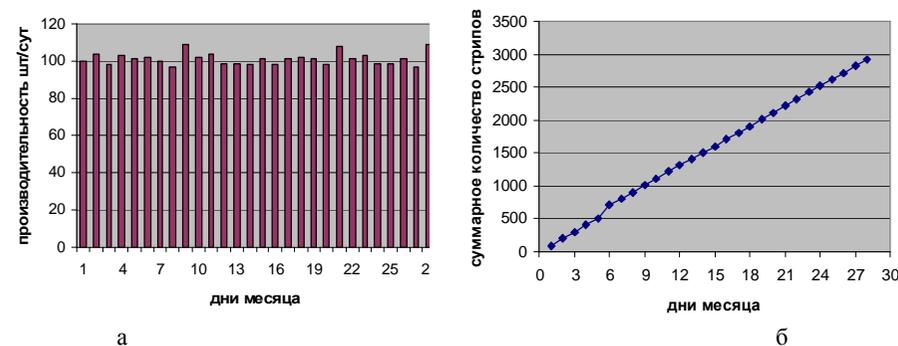


Рис. 3 – Суточная производительность промышленной установки (а) и рост суммарного количества ПС стрипов (б) в течение месяца при работе с двумя полимеризаторами



Рис. 4 – Система производственного контроля качества ПС стрипов

Модернизация установки, получение блочного полистирольного сцинтиллятора, устранение простоев и внедрение системы производственного

контроля качества производства отечественных ПС-стрипов позволили реализовать некоторые из основных факторов снижения себестоимости:

– относительное снижение себестоимости за счет экономии материальных затрат ($\% \Delta C_m$) в результате изменения расхода сырья (снижение брака) в пересчете на единицу продукции:

$$\% \Delta C_m = (1 - I_m * I_c) * \alpha_{м.з} * 100 = (1 - 0,845) * 0,6 * 100 = 9,3\%$$

где I_m – индекс норм затрат материальных ресурсов на один ПС-стрип;

I_c – индекс цен на единицу материального ресурса;

$\alpha_{м.з}$ – доля материальных затрат в себестоимости ПС-стрипа.

– относительное снижение себестоимости ($\% \Delta C_{п.п}$) за счет роста производительности труда:

$$\% \Delta C_{п.п} = \alpha_{з.п} * (1 - (I_{з.п} / I_{п.п})) * 100\% = 0,22 * (1 - 0,3) * 100 = 15,4\%$$

где $I_{з.п}$ – индекс роста заработной платы;

$I_{п.п}$ – индекс роста продуктивности труда;

$\alpha_{з.п}$ – доля заработной платы в себестоимости ПС-стрипа.

В результате, проведенной работы успешно решены следующие технико-экономические задачи:

– увеличен объем выпуска изделий за счет сокращения простоев оборудования, потерь рабочего времени и длительности производственного цикла;

– снижены затраты на материал за счет сокращения брака, своевременного контроля и корректировки производственного процесса;

– уменьшена величина оборотных средств (в части незавершенного производства) за счет их ускоренной оборачиваемости в результате сокращения длительности цикла производства.

Все перечисленное выше позволит добиться сокращения затрат на единицу продукции (на ПС стрип) и увеличить прибыль, что имеет особую важность и значимость для существующей производственной ситуации.

Основной вывод проведенной работы – в результате комплексного решения материаловедческих, технологических и научно-организационных задач разработана и внедрена в эксплуатацию усовершенствованная технология изготовления ПС стрипов. Это обеспечило увеличение производительности в шесть раз (160 стрипов в сутки), снижение процента брака до 1,5%, а производственной себестоимости на 25%.

Список литературы: 1. Гринев Б.В., Сенчишин В.Г. Пластмассовые сцинтилляторы. – Х.: Акта, 2003. С. 157-164. 2. Заявка на патент №20041216828 от 27.12.04 «Спосіб одержання світловідбиваючого покриття на поверхні виробів з полімерних сцинтиляційних матеріалів». 3. V. Senchyshyn, B.Grunyov, S.Melnychuk, A.Adadurov, N.Khlapova, M.Dracos, A.Olchevski, Y.Gornushkin, A.Nozdryn, A.Sadovski. Low Cost Extruded Plastic Scintillating Strips for Opera Experiment. Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, 2005. Abstracts Books. 4. Н.В. Везуб, М.В. Литвиненко, С.В. Мельничук, В.Э. Леман, С.С. Миненко. Особенности фрезерования канавки под световод на полистирольных сцинтилляционных профилях // Весник НТУ «ХПИ». - Харьков.- 2005.- №23, – С. 45-53. 5. Литвиненко М.В. Повышение функциональных и эксплуатационных характеристик оптических полистирольных изделий полученных фрезерованием. Дис. ... к-та техн. наук. – Харьков, 2004. 183 с. 6. Гринев Б.В., Сенчишин В.Г., Мельничук С.В., Литвиненко М.В., Лагутин В.Н., Ольшевский А.Г., Ноздрин А.А., Горнушкин Ю.А., М. Dracos. Высокоэффективная технология серийного изготовления длинномерных пластмассовых сцинтилляторов. // Пластические массы, Россия.– Москва, 2006.– №11. – С. 47-51.7.

Поступила в редколлегию 15.05.2008

УДК 621.318:37

Г.Ю. МАРТЫНЕНКО

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ЖЕСТКОГО РОТОРА ТУРБОКОМПРЕССОРА В АКТИВНЫХ МАГНИТНЫХ ПОДШИПНИКАХ

Research of dynamics of rotors of turbocompressors with the active magnetic bearings is conducted on the basis of the offered mathematical model. The stability of motion of these rotors at the use of the developed method of discrete control by the magnetic bearings is proved. The results of calculations and experimental researches on definition of rational parameters of magnetic suspension for the experimental model of compressor are described.

Введение. Активные магнитные подшипники (АМП) являются альтернативой подшипникам качения, скольжения, газодинамическим и обладают по сравнению с ними целым рядом преимуществ (отсутствие смазочных систем, снижение потерь на трение, сравнительно большой зазор и т.д.) [1]. АМП в настоящее время используются в различных роторных машинах и агрегатах, например, в качестве опор роторов турбомолекулярных и питательных насосов, металлорежущих станков (электрошпинделя), компрессоров нефтедобывающих и газоперекачивающих станций (ГПА) и др.

При математическом описании системы «ротор в АМП» выделяются следующие части: математическая модель ротора, модель подшипников и закон управления, который реализуется с помощью системы управления [2]. Корректное определение и проверка параметров алгоритмов управления с помощью численных экспериментов возможно только в случае адекватного

математического моделирования данной системы и взаимосвязанных магнитомеханических явлений происходящих в ней.

При анализе ряда технических устройств уравнения электромеханических колебаний линеаризуют. Такой подход применяется и для АМП [3]. Так, моделирование магнитомеханической системы «ротор в АМП» осуществляется с помощью дифференциальных уравнений движения и дифференциальных уравнений для токов в линейном приближении. При этом линеаризуются в окрестности положения равновесия токи в цепях и управляющие напряжения на обмотках [4]. Линейная модель подвеса записывается в предположении малости отклонений переменных от их номинальных значений. В действительности эти отклонения могут быть значительными, а значит в предельных режимах (насыщение магнитной цепи, нулевой ток, нулевой зазор и т.д.) линейная модель подвеса теряет смысл [5]. Эти же недостатки могут быть присущи и блокам управления положением ротора, построенным на таких линеаризованных моделях.

1. Постановка задачи. Целью данной работы является исследование динамического поведения ротора в АМП на примере модели турбокомпрессора. При этом математическое описание полностью управляемого электромагнитного подвеса ротора в АМП должно адекватно учитывать нелинейную взаимосвязь происходящих в такой системе процессов – электрических, магнитных и механических.

2. Описание электромеханических систем. Технические электромеханические системы описываются уравнениями Лагранжа-Максвелла, имеющими структуру уравнений механики. В случае, когда токи проводимости замкнуты, и в электрических ветвях отсутствуют конденсаторы, электромеханические системы описываются уравнениями, аналогичными уравнениям Рауса в механике [6]:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_r} - \frac{\partial T}{\partial q_r} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_r} = -\frac{\partial W}{\partial q_r} + Q_r & (r = 1, \dots, M) \\ \frac{\partial \Psi_k}{\partial t} + \sum_{s=1}^N r_{Cks} \frac{\partial W}{\partial \Psi_s} = E_k & (k = 1, \dots, N) \end{cases} \quad (1)$$

где T и Π – кинетическая и потенциальная энергии, $W=W(\Psi_1, \dots, \Psi_N, q_1, \dots, q_M)$ – энергия магнитного поля, q_r – обобщенные механические координаты, Q_r – непотенциальные обобщенные силы, M – число обобщенных механических координат, Ψ_k – потоки индукции (потокосцепления), N – число замкнутых неразветвленных контуров с контурными токами i_k , r_{Cks} – активные сопротивления электрических контуров, E_k – алгебраическая сумма сторонних электродвижущих сил в k -том контуре, причем:

$$\Psi_k = \frac{\partial W}{\partial i_k}, \quad i_s = \frac{\partial W}{\partial \Psi_s}. \quad (2)$$

2. Схема магнитного подвеса ротора. В работе методика математического описания системы «ротор в АМП» рассматривается на примере одного из вариантов полностью управляемого электромагнитного подвеса ротора турбокомпрессора. Его схема представлена на рисунке 1.

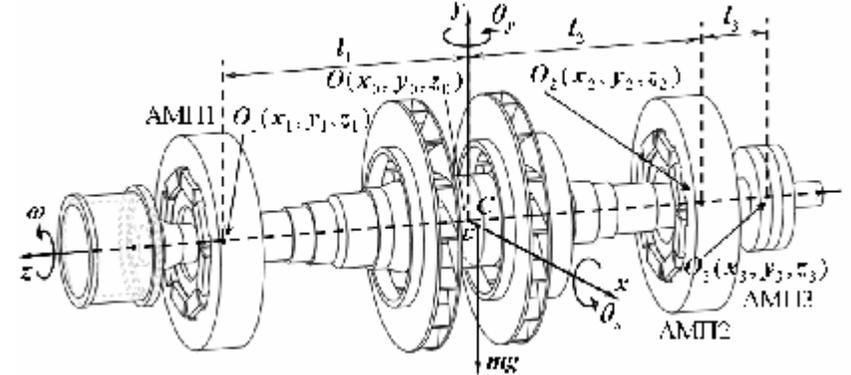


Рис. 1 – Схема подвеса ротора в активных магнитных подшипниках

В качестве двух радиальных опор используются восьмиполусные магнитные подшипники, а в качестве осевой – упорный магнитный подшипник с броневыми сердечниками [4]. Они представлены на рисунке 2.

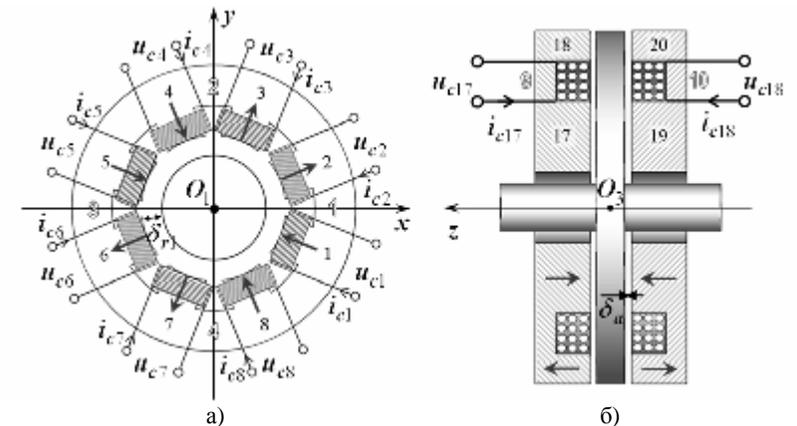


Рис. 2 – Магнитные подшипники: а) радиальный АМП1, б) осевой АМП3

На рисунке 2 числами от 1 до 20 обозначены номера полюсов, а от 1 до 10 – электромагниты. В каждом из радиальных подшипников АМП1 и АМП2 попарным соединением полюсных катушек могут

быть образованы по четыре электромагнита [2]. Полагается, что на каждую полюсную катушку подается управляющее напряжение u_{ck} . Его величина определяется в соответствии с применяемым алгоритмом управления в зависимости от параметров регулирования [4]. При протекании тока i_{ck} через обмотку k -ой полюсной катушки с количеством витков w_k и активным сопротивлением r_{ck} возникает магнитодвижущая сила (МДС) $e_k = w_k i_{ck}$, которая вызывает магнитный поток в магнитной цепи АМП. Направления потоков на рисунках 2 и 3 обозначены красными стрелками. При центральном положении ротора номинальный воздушный зазор между полюсами радиальных АМП и цапфами равен δ_{r1} в АМП1 и δ_{r2} в АМП2 (см. рис. 2). Номинальный воздушный зазор между статором и диском осевой опоры АМП3 с каждой стороны равен δ_a .

4. Математическая модель жесткого ротора. Рассмотрим пространственную расчетную схему вращающегося абсолютно жесткого ротора на магнитном подвесе (рис. 1). Для однозначного позиционирования ротора в пространстве вводится неподвижная прямоугольная правая система координат. Ее начало O^* расположено на геометрической продольной оси ротора, который находится в центральном положении. Оси координат связаны с ротором в данном положении так: ось O^*z совпадает с геометрической продольной осью ротора, а оси O^*x и O^*y расположены в плоскости перпендикулярной оси O^*z и проходящей через центр тяжести ротора C . Для ротора в некотором произвольном положении через $O(x_0, y_0, z_0)$ обозначен геометрический центр поперечного сечения, проходящего через центр тяжести ротора. Центры опорных участков ротора на АМП1 и АМП2 обозначены через $O_1(x_1, y_1, z_1)$ и $O_2(x_2, y_2, z_2)$ соответственно (рис.1). Расстояние между O и O_1 равно l_1 , а между O и O_2 равно l_2 . Для определения положения ротора могут использоваться две связанные группы обобщенных координат $\xi = (x_0, y_0, z_0, \theta_x, \theta_y)$ или $q = (x_1, y_1, x_2, y_2, z_3)$. Здесь θ_x, θ_y – углы поворота вокруг осей O^*x и O^*y , а z_3 – координата центра диска АМП3 O_3 .

В этом случае движение вращающегося абсолютно жесткого ротора на АМП описывается системой дифференциальных уравнений (СДУ) 2-го порядка, включающей 5 уравнений [5]:

$$\begin{cases} m \frac{d^2 x_0}{dt^2} = -\frac{\partial W}{\partial x_0} + Q_x + mw^2(e_1 \cos wt - e_2 \sin wt), \\ m \frac{d^2 y_0}{dt^2} = -\frac{\partial W}{\partial y_0} + Q_y + mw^2(e_1 \sin wt + e_2 \cos wt), \\ m \frac{d^2 z_0}{dt^2} = -\frac{\partial W}{\partial z_0} + Q_z, \\ J_e \frac{d^2 q_x}{dt^2} + J_p w \frac{dq_y}{dt} = -\frac{\partial W}{\partial q_x} + Q_{q_x} + (J_e - J_p)w^2(g_1 \cos wt - g_2 \sin wt), \\ J_e \frac{d^2 q_y}{dt^2} - J_p w \frac{dq_x}{dt} = -\frac{\partial W}{\partial q_y} + Q_{q_y} + (J_e - J_p)w^2(g_1 \sin wt + g_2 \cos wt), \end{cases} \quad (3)$$

где m – масса ротора, e_1, e_2 и γ_1, γ_2 – линейные и угловые параметры неуровновешенности, J_e, J_p – экваториальный и полярный моменты инерции ротора, w – угловая скорость, $P_{\xi} = -\partial W / \partial \xi_r$ – электромагнитные реакции подвеса, Q_r – обобщенные внешние силы и моменты.

5. Модель магнитных подшипников. Для данного варианта полного электромагнитного подвеса (рис. 1) АМП содержат $N=18$ электромагнитных контуров с токами i_{ck} , активными сопротивлениями r_{ck} и входными напряжениями u_{ck} (управляющими сигналами). Насыщением и магнитным гистерезисом пренебрегаем. Вторая часть СДУ математической модели согласно (1) состоит из 18 уравнений относительно потокоцеплений. Они соответствуют второму закону Кирхгофа для магнитных цепей и являются формой записи закона полного тока для каждого k -го контура системы:

$$\frac{\partial \Psi_{ck}}{\partial t} + r_{ck} \frac{\Psi_{ck}}{\Psi_{ck}} = u_{ck} \quad (k = 1, \dots, N), \quad (4)$$

где Ψ_{ck} – потокоцепления (полные магнитные потоки через контуры катушек), r_{ck} – активные сопротивления обмоток, u – N -мерный вектор-столбец управляющих напряжений, которые подаются на обмотки АМП.

Если принять, что магнитный поток, охватываемый каждым витком катушки одинаков, то полный магнитный поток через контур:

$$\Psi_{ck} = w_k \Phi_k. \quad (5)$$

Магнитный поток Φ_k через площадь S_k участка магнитной цепи [7]:

$$\Phi_k = B_k S_k. \quad (6)$$

Магнитное сопротивление участка магнитной цепи [7]:

$$R_k = l_k / (\mu_0 \mu_k S_k), \quad (7)$$

где l_k – длина участка магнитной цепи, S_k – площадь поперечного сечения, μ_0 – магнитная постоянная, μ_k – относительная магнитная проницаемость.

Тогда энергия магнитного поля участка цепи равна [7]:

$$W_k = R_k \Phi_k^2 / 2, \quad (8)$$

а энергия всей магнитной цепи равна сумме энергий участков этой цепи.

Если через W_I , W_{II} и W_{III} обозначить энергию магнитных цепей АМП1, АМП2 и АМП3 соответственно, то энергия магнитного поля в магнитных цепях полного электромагнитного подвеса ротора на АМП равна:

$$W = W_I + W_{II} + W_{III}. \quad (9)$$

6. Определение магнитных потоков. Полное потокосцепление k -го контура Ψ_{ck} зависит не только от тока в k -м контуре, но и от токов в других контурах магнитосвязанных с k -м контуром [7]. В этом случае для корректного определения магнитных потоков в участках магнитных цепей предлагается использовать подробные эквивалентные схемы.

Определение магнитных потоков в магнитной цепи радиального АМП1 может быть произведено на основе рассмотрения ее эквивалентной схемы. Она представлена на рисунке 3. Здесь приняты следующие обозначения: Φ_k – магнитные потоки участков цепи, причем Φ_1, \dots, Φ_8 – через сечения полюсов, Φ_9, \dots, Φ_{16} – через воздушные зазоры под полюсами, $\Phi_{17}, \dots, \Phi_{24}$ – через ярмо статора, $\Phi_{25}, \dots, \Phi_{32}$ – рассеяния через воздушные зазоры между полюсами статора, $\Phi_{33}, \dots, \Phi_{40}$ – через цапфу, расположенную на роторе, $\Phi_{C1}, \dots, \Phi_{C16}$ – контурные; R_k – магнитные сопротивления участков цепи, причем R_{pk} – полюсов, R_{gk} – воздушных зазоров между полюсами и ротором, R_{sk} – участков ярма статора между двумя полюсами, R_{jk} – рассеяния между полюсами (воздушных зазоров), R_{ak} – участков ротора; e_k – магнитодвижущие силы катушек, причем $e_1 = i_{c1} w_1, \dots, e_8 = i_{c8} w_8$.

Расчет магнитной цепи радиального АМП1 может быть выполнен на основе закона, подобного второму закону Кирхгофа для электрических цепей с использованием схемы замещения (рис. 3). Для расчета магнитных цепей могут применяться различные методы, в том числе, метод узловых

потенциалов или метод контурных потоков. Применение метода контурных потоков (аналога метода контурных токов) приводит к системе алгебраических уравнений относительно контурных потоков. Ее решение позволяет найти контурные потоки, через которые определяются и потоки во всех ветвях. Так потоки несмежных ветвей равны контурным потокам, если их направления совпадают, и равны контурным потокам с обратным знаком, если не совпадают. Также определяются и потоки смежных ветвей [8].

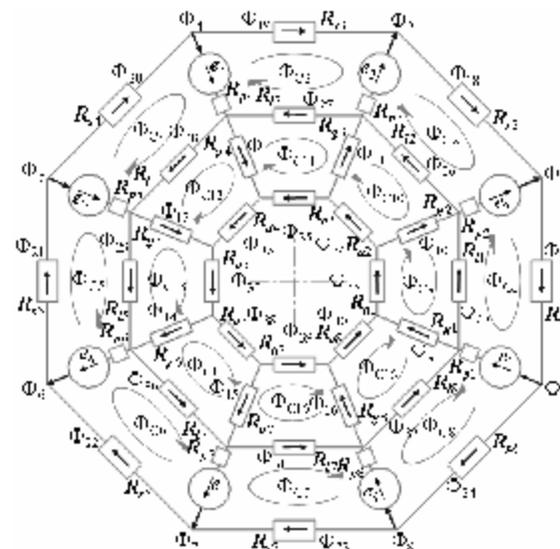


Рис. 3 – Эквивалентная схема замещения электромагнитной цепи АМП1

Определение магнитных потоков $\Phi_{41}, \dots, \Phi_{80}$ в магнитной цепи радиального АМП2 выполняется с использованием такого же подхода на основе рассмотрения аналогичных модели и схемы замещения (см. рис. 2, 3).

Магнитная цепь осевого АМП3 может быть замещена схемой, приведенной на рисунке 4. Здесь приняты обозначения, аналогичные обозначениям магнитных потоков, сопротивлений и магнитодвижущих сил для АМП1 (рис. 3). Расчет магнитной цепи осевого АМП3 может быть выполнен с использованием данной схемы замещения на основе применения метода контурных потоков или узловых потенциалов.

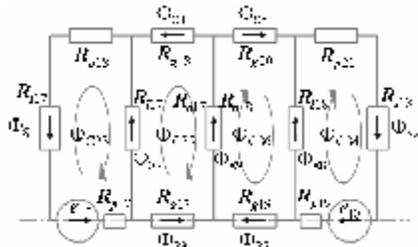


Рис. 4 – Эквивалентная схема замещения электромагнитной цепи АМПЗ

7. Дискретное управление движением ротора в АМП. При управлении движением ротора для его удержания вблизи центрального положения в зазорах всех АМП на каждую полюсную катушку системой управления подается управляющее напряжения u_{ck} , величина которого определяется в соответствии с применяемым алгоритмом управления в зависимости от параметров регулирования – значений обобщенных координат, как механических ξ_r , так и электромагнитных Ψ_{ck} .

Для управления движением ротора компрессора в АМП предлагается использовать один из способов дискретного управления электромагнитным подшипником [9]. Он заключается в том, что выбирается величина напряжения (U), подаваемого на катушки с обмотками управления. Задаются m фиксированных уровней отклонений от центрального положения, $2m$ величин скоростей движения, $2m$ пороговых значений разности токов в диаметрально противоположных катушках с обмотками управления. Через одинаковый промежуток времени определяются токи, отклонения и скорости движения шеек ротора. После сравнения измеренных величин с эталонными (уровневыми величинами) формируются управляющие воздействия и на управляющие обмотки подаются, либо напряжения $u_{ck}=U$, либо $u_{ck}=0$.

8. Численные исследования. Решение задачи определения параметров управления, обеспечивающих устойчивость движения ротора на магнитном подвесе, проводилось для модели компрессора ГПА, приведенной на рисунке 5. Данная модель является уменьшенной копией турбокомпрессора с заменой подшипников скольжения активными магнитными подшипниками.

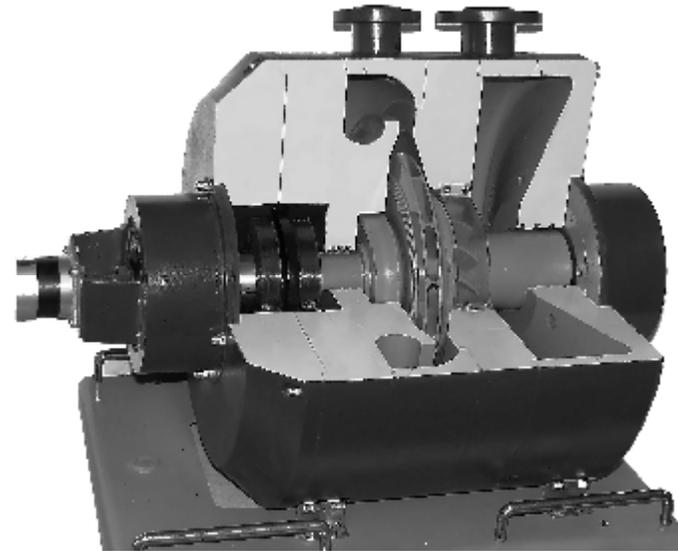


Рис. 5 – Модель компрессора ГПА с магнитными подшипниками

Проведение вариантных расчетов выполнялось с помощью имитационной модели (ИМ) [10], в основу которой положена СДУ (2)-(4). Решение данной системы в ИМ производится методом Рунге-Кутты 7-го порядка с предварительным приведением к эквивалентной СДУ в нормализованной форме с помощью введения новых переменных и линейного комбинирования. Кроме того, в ИМ предусмотрена возможность внесения в измеряемые параметры управления случайной погрешности с заданным предельным значением для исследования ее влияния на устойчивость движения ротора на АМП.

При проведении численных экспериментов вносились кинематические возмущения – отклонения шеек ротора на величину зазора. Исследования позволили найти по заданным параметрам АМП параметры алгоритма управления (см. п. 7), обеспечивающие устойчивость движения ротора в переходном процессе и установившегося движения при заданных значениях допустимых отклонений. Осциллограммы вертикального движения опорных участков ротора в зазорах радиальных АМП1 и АМП2 приведены на рисунках 6-8.

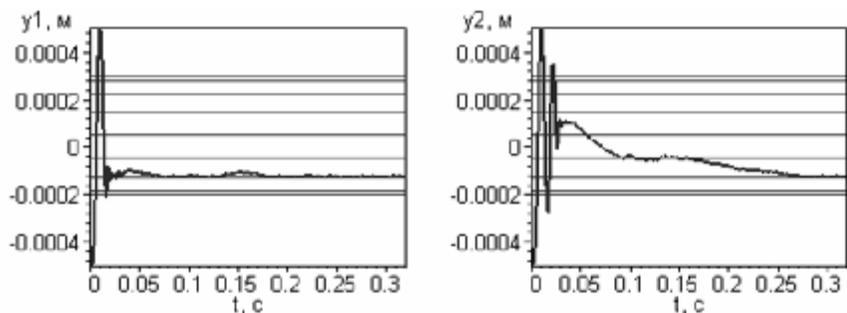


Рис. 6 – Траектория движения ротора в вертикальном направлении

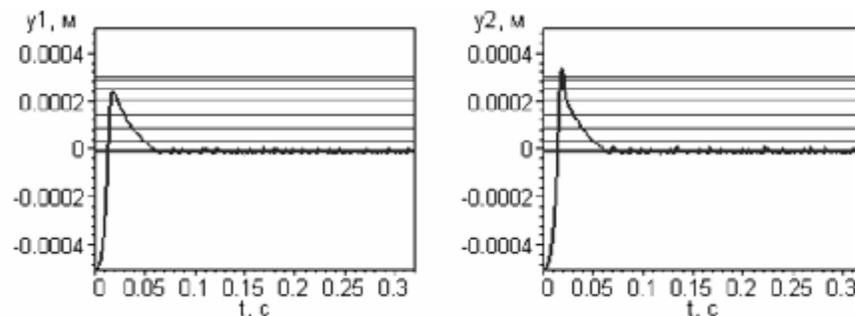


Рис.8 – Траектория движения ротора в вертикальном направлении

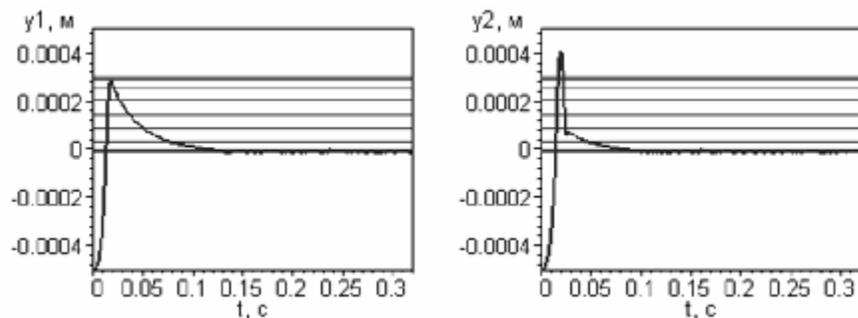


Рис. 7 – Траектория движения ротора в вертикальном направлении

Из рисунка 6 следует, что при относительно широком диапазоне уровней управления по отклонениям (показаны горизонтальными линиями) и малом демпфировании в переходном процессе отклонения ротора могут быть равны величине зазора. При сужении диапазона уровней управления и увеличении демпфирования в системе с помощью увеличения активных сопротивлений в цепях электромагнитов в четыре раза удается достичь уменьшения максимальных отклонений в переходном процессе до 80 % от зазора (рис. 7).

Дальнейшее увеличение активных сопротивлений позволяет снизить максимальные отклонения до 60 % от зазора (рис. 8). В последних двух случаях параметры управления обеспечивают стационарные колебания ротора с амплитудами, не превышающими 10 % от зазора, при внесении указанных выше возмущающих воздействий.

Результаты расчетных исследований, приведенные на рисунке 9, иллюстрируют возможности алгоритма управления обеспечить устойчивость движения ротора при измерительных погрешностях в пределах 10 %. В данном случае изменяется длительность переходного процесса, но амплитуда стационарных колебаний ротора также не превосходит 10-15 % от зазора.

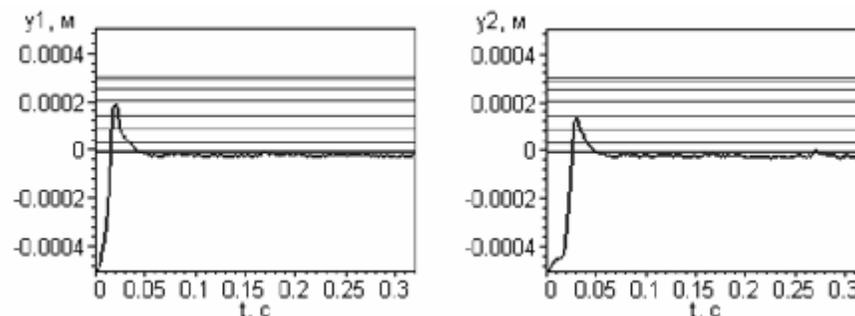


Рис. 9 – Траектория движения ротора при погрешности измерений

Заключение. В работе рассмотрена нелинейная математическая модель подвеса жесткого ротора в активных магнитных подшипниках. Основное отличие имитационной модели, построенной с использованием предложенной математической модели, – возможность более адекватного моделирования поведения ротора на АМП при его приближении к полюсам.

Модели такого типа могут использоваться для проведения численных экспериментов по нахождению реальных границ применения линейных и нелинейных алгоритмов управления и определения их параметров, позволяющих обеспечить устойчивость движения ротора в заданных пределах.

Другим приложением имитационных вычислительных моделей является

разработка и оптимизация алгоритмов управления системы ротор на АМП, а также исследование динамического поведения этой системы с определением резонансных режимов и последующей отстройкой от них.

С помощью описанной имитационной модели исследовано динамическое поведение системы «ротор в АМП». Показано, что при внесении кинематических возмущений подбором параметров предложенного дискретного алгоритма управления возможно добиться величин максимальных отклонений шеек опорных участков ротора в переходных процессах и амплитуд стационарных колебаний, не превышающих заданных значений. Результатами численных экспериментов подтверждена устойчивость данного алгоритма к возможному возникновению случайных погрешностей измерений параметров управления.

Список литературы: 1. Siegart R, Bleuler H, Traxler A. Industrial Magnetic Bearings. Gordon and Breach Science Publisher, –Amsterdam, 2000. 2. Steven M, Nataraj C. Suppression of Base Excitation of Rotors on Magnetic Bearings. International Journal of Rotating Machinery. Vol. 2007, Article ID 91276. –10 p. 3. G. Schweitzer, H. Bleuler and A. Traxler Active magnetic bearings. –Zurich: ETH, 1994. –244 p. 4. Maslen E.H. Magnetic bearings. University of Virginia Department of Mechanical, Aerospace, and Nuclear Engineering Charlottesville, Virginia, 2000. –229 p. 5. Журавлев Ю.Н. Активные магнитные подшипники: Теория, расчет, применение. –СПб.: Политехника, 2003. –206 с. 6. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. / Ред. В.Н. Челомей (пред). –М.: Машиностроение, 1979. - Т.2: Колебания нелинейных механических систем. / Под ред. И.И. Блехмана. –351 с. 7. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: Учебник для студентов энергетических и электротехнических ВУЗов. –М.: Высш. шк., 1973. –752 с. 8. Борисов Ю.М., Липатов Д.Н., Зорин Ю.Н. Электротехника. Учебник для ВУЗов. –М.: Энергоатомиздат, 1985. –552 с. 9. Патент № 2277190. Российская Федерация. МПК F16C 32/04. Способ дискретного управления электромагнитным подвесом вращающихся роторов / ОАО «Сумское НПО им. М.В. Фрунзе», НТУ «ХПИ»; Роговой Е.Д., Бухолдин Ю.С., Левашов В.А., Мартыненко Г.Ю., Смирнов М.М. –№ 2003121317/11. –Заявл. 10.07.2003 г. Опубл. 27.05.2006 г. // Изобретения. Официальный бюллетень, 2006. –№15. 10. Мартыненко Г.Ю. Исследование устойчивости движения ротора в управляемых электромагнитных подшипниках с помощью нелинейной имитационной вычислительной модели / Проблемы машиностроения. –Харьков: ИПМаш НАН Украины, 2005. –Т.8, №1. –С. 47-58.

Поступила в редколлегию 15.05.2008

УДК 621.318:37

Г.Ю. МАРТЫНЕНКО

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ЖЕСТКОГО РОТОРА ТУРБОКОМПРЕССОРА В АКТИВНЫХ МАГНИТНЫХ ПОДШИПНИКАХ

Research of dynamics of rotors of turbocompressors with the active magnetic bearings is conducted on the basis of the offered mathematical model. The stability of motion of these rotors at the use of the

developed method of discrete control by the magnetic bearings is proved. The results of calculations and experimental researches on definition of rational parameters of magnetic suspension for the experimental model of compressor are described.

Введение. Активные магнитные подшипники (АМП) являются альтернативой подшипникам качения, скольжения, газодинамическим и обладают по сравнению с ними целым рядом преимуществ (отсутствие смазочных систем, снижение потерь на трение, сравнительно большой зазор и т.д.) [1]. АМП в настоящее время используются в различных роторных машинах и агрегатах, например, в качестве опор роторов турбомолекулярных и питательных насосов, металлорежущих станков (электрошпинделя), компрессоров нефтедобывающих и газоперекачивающих станций (ГПА) и др.

При математическом описании системы «ротор в АМП» выделяются следующие части: математическая модель ротора, модель подшипников и закон управления, который реализуется с помощью системы управления [2]. Корректное определение и проверка параметров алгоритмов управления с помощью численных экспериментов возможно только в случае адекватного математического моделирования данной системы и взаимосвязанных магнитомеханических явлений происходящих в ней.

При анализе ряда технических устройств уравнения электромеханических колебаний линеаризуют. Такой подход применяется и для АМП [3]. Так, моделирование магнитомеханической системы «ротор в АМП» осуществляется с помощью дифференциальных уравнений движения и дифференциальных уравнений для токов в линейном приближении. При этом линеаризуются в окрестности положения равновесия токи в цепях и управляющие напряжения на обмотках [4]. Линейная модель подвеса записывается в предположении малости отклонений переменных от их номинальных значений. В действительности эти отклонения могут быть значительными, а значит в предельных режимах (насыщение магнитной цепи, нулевой ток, нулевой зазор и т.д.) линейная модель подвеса теряет смысл [5]. Эти же недостатки могут быть присущи и блокам управления положением ротора, построенным на таких линеаризованных моделях.

1. Постановка задачи. Целью данной работы является исследование динамического поведения ротора в АМП на примере модели турбокомпрессора. При этом математическое описание полностью управляемого электромагнитного подвеса ротора в АМП должно адекватно учитывать нелинейную взаимосвязь происходящих в такой системе процессов – электрических, магнитных и механических.

2. Описание электромеханических систем. Технические электромеханические системы описываются уравнениями Лагранжа-Максвелла, имеющими структуру уравнений механики. В случае, когда токи проводимости замкнуты, и в электрических ветвях отсутствуют конденсаторы, электромеханические системы описываются уравнениями,

аналогичными уравнениям Рауса в механике [6]:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_r} - \frac{\partial T}{\partial q_r} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_r} = -\frac{\partial W}{\partial q_r} + Q_r & (r=1, \dots, M) \\ \frac{\partial \Psi_k}{\partial t} + \sum_{s=1}^N r_{Cks} \frac{\partial W}{\partial \Psi_s} = E_k & (k=1, \dots, N) \end{cases} \quad (1)$$

где T и Π – кинетическая и потенциальная энергии, $W=W(\Psi_1, \dots, \Psi_N, q_1, \dots, q_M)$ – энергия магнитного поля, q_r – обобщенные механические координаты, Q_r – непотенциальные обобщенные силы, M – число обобщенных механических координат, Ψ_k – потоки индукции (потокосцепления), N – число замкнутых неразветвленных контуров с контурными токами i_k , r_{Cks} – активные сопротивления электрических контуров, E_k – алгебраическая сумма сторонних электродвижущих сил в k -том контуре, причем:

$$\Psi_k = \frac{\partial W}{\partial i_k}, \quad i_s = \frac{\partial W}{\partial \Psi_s}. \quad (2)$$

2. Схема магнитного подвеса ротора. В работе методика математического описания системы «ротор в АМП» рассматривается на примере одного из вариантов полностью управляемого электромагнитного подвеса ротора турбокомпрессора. Его схема представлена на рисунке 1.

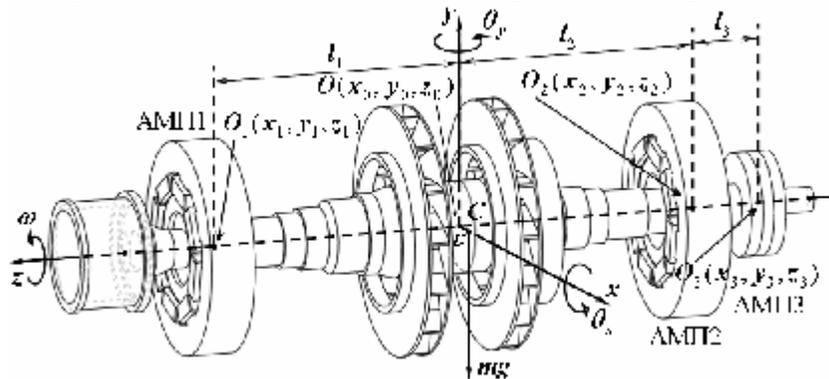


Рис. 1 – Схема подвеса ротора в активных магнитных подшипниках

В качестве двух радиальных опор используются восьмиполюсные магнитные подшипники, а в качестве осевой – упорный магнитный подшипник с броневыми сердечниками [4]. Они представлены на рисунке 2.

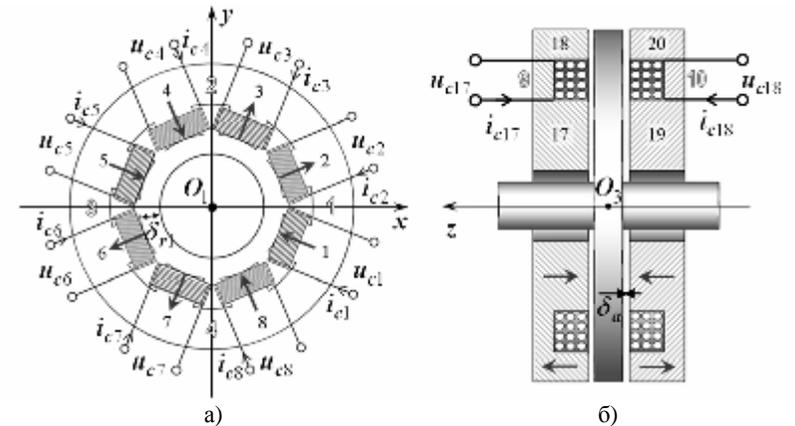


Рис. 2 – Магнитные подшипники: а) радиальный АМП1, б) осевой АМП3

На рисунке 2 числами от 1 до 20 обозначены номера полюсов, а от 1 до 10 – электромагниты. В каждом из радиальных подшипников АМП1 и АМП2 попарным соединением полюсных катушек могут быть образованы по четыре электромагнита [2]. Полагается, что на каждую полюсную катушку подается управляющее напряжение u_{ck} . Его величина определяется в соответствии с применяемым алгоритмом управления в зависимости от параметров регулирования [4]. При протекании тока i_{ck} через обмотку k -ой полюсной катушки с количеством витков w_k и активным сопротивлением r_{ck} возникает магнитодвижущая сила (МДС) $e_k = w_k i_{ck}$, которая вызывает магнитный поток в магнитной цепи АМП. Направления потоков на рисунках 2 и 3 обозначены красными стрелками. При центральном положении ротора номинальный воздушный зазор между полюсами радиальных АМП и цапфами равен δ_{r1} в АМП1 и δ_{r2} в АМП2 (см. рис. 2). Номинальный воздушный зазор между статором и диском осевой опоры АМП3 с каждой стороны равен δ_a .

4. Математическая модель жесткого ротора. Рассмотрим пространственную расчетную схему вращающегося абсолютно жесткого ротора на магнитном подвесе (рис. 1). Для однозначного позиционирования ротора в пространстве вводится неподвижная прямоугольная правая система координат. Ее начало O^* расположено на геометрической продольной оси ротора, который находится в центральном положении. Оси координат связаны с ротором в данном положении так: ось O^*z совпадает с геометрической продольной осью ротора, а оси O^*x и O^*y расположены в плоскости перпендикулярной оси O^*z и проходящей через центр тяжести ротора C . Для ротора в некотором произвольном положении через $O(x_0, y_0, z_0)$

обозначен геометрический центр поперечного сечения, проходящего через центр тяжести ротора. Центры опорных участков ротора на АМП1 и АМП2 обозначены через $O_1(x_1, y_1, z_1)$ и $O_2(x_2, y_2, z_2)$ соответственно (рис.1). Расстояние между O и O_1 равно l_1 , а между O и O_2 равно l_2 . Для определения положения ротора могут использоваться две связанные группы обобщенных координат $\xi=(x_0, y_0, z_0, \theta_x, \theta_y)$ или $q=(x_1, y_1, x_2, y_2, z_3)$. Здесь θ_x, θ_y – углы поворота вокруг осей O^*x и O^*y , а z_3 – координата центра диска АМП3 O_3 .

В этом случае движение вращающегося абсолютно жесткого ротора на АМП описывается системой дифференциальных уравнений (СДУ) 2-го порядка, включающей 5 уравнений [5]:

$$\begin{cases} m \frac{d^2 x_0}{dt^2} = -\frac{\partial W}{\partial x_0} + Q_x + mw^2(e_1 \cos wt - e_2 \sin wt), \\ m \frac{d^2 y_0}{dt^2} = -\frac{\partial W}{\partial y_0} + Q_y + mw^2(e_1 \sin wt + e_2 \cos wt), \\ m \frac{d^2 z_0}{dt^2} = -\frac{\partial W}{\partial z_0} + Q_z, \\ J_e \frac{d^2 q_x}{dt^2} + J_p w \frac{dq_y}{dt} = -\frac{\partial W}{\partial q_x} + Q_{q_x} + (J_e - J_p)w^2(g_1 \cos wt - g_2 \sin wt), \\ J_e \frac{d^2 q_y}{dt^2} - J_p w \frac{dq_x}{dt} = -\frac{\partial W}{\partial q_y} + Q_{q_y} + (J_e - J_p)w^2(g_1 \sin wt + g_2 \cos wt), \end{cases} \quad (3)$$

где m – масса ротора, e_1, e_2 и γ_1, γ_2 – линейные и угловые параметры неуравновешенности, J_e, J_p – экваториальный и полярный моменты инерции ротора, w – угловая скорость, $P_{\xi_r} = -\partial W / \partial \xi_r$ – электромагнитные реакции подвеса, Q_r – обобщенные внешние силы и моменты.

5. Модель магнитных подшипников. Для данного варианта полного электромагнитного подвеса (рис. 1) АМП содержат $N=18$ электромагнитных контуров с токами i_{ck} , активными сопротивлениями r_{ck} и входными напряжениями u_{ck} (управляющими сигналами). Насыщением и магнитным гистерезисом пренебрегаем. Вторая часть СДУ математической модели согласно (1) состоит из 18 уравнений относительно потокоцеплений. Они соответствуют второму закону Кирхгофа для магнитных цепей и являются формой записи закона полного тока для каждого k -го контура системы:

$$\frac{\partial \Psi_{ck}}{\partial t} + r_{ck} \frac{\Psi_{ck}}{\Psi_{ck}} = u_{ck} \quad (k=1, \dots, N), \quad (4)$$

где Ψ_{ck} – потокоцепления (полные магнитные потоки через контуры катушек), r_{ck} – активные сопротивления обмоток, u – N -мерный

вектор-столбец управляющих напряжений, которые подаются на обмотки АМП.

Если принять, что магнитный поток, охватываемый каждым витком катушки одинаков, то полный магнитный поток через контур:

$$\Psi_{ck} = w_k \Phi_k. \quad (5)$$

Магнитный поток Φ_k через площадь S_k участка магнитной цепи [7]:

$$\Phi_k = B_k S_k. \quad (6)$$

Магнитное сопротивление участка магнитной цепи [7]:

$$R_k = l_k / (\mu_0 \mu_k S_k), \quad (7)$$

где l_k – длина участка магнитной цепи, S_k – площадь поперечного сечения, μ_0 – магнитная постоянная, μ_k – относительная магнитная проницаемость.

Тогда энергия магнитного поля участка цепи равна [7]:

$$W_k = R_k \Phi_k^2 / 2, \quad (8)$$

а энергия всей магнитной цепи равна сумме энергий участков этой цепи.

Если через W_I, W_{II} и W_{III} обозначить энергию магнитных цепей АМП1, АМП2 и АМП3 соответственно, то энергия магнитного поля в магнитных цепях полного электромагнитного подвеса ротора на АМП равна:

$$W = W_I + W_{II} + W_{III}. \quad (9)$$

6. Определение магнитных потоков. Полное потокоцепление k -го контура Ψ_{ck} зависит не только от тока в k -м контуре, но и от токов в других контурах магнитосвязанных с k -м контуром [7]. В этом случае для корректного определения магнитных потоков в участках магнитных цепей предлагается использовать подробные эквивалентные схемы.

Определение магнитных потоков в магнитной цепи радиального АМП1 может быть произведено на основе рассмотрения ее эквивалентной схемы. Она представлена на рисунке 3. Здесь приняты следующие обозначения: Φ_k – магнитные потоки участков цепи, причем Φ_1, \dots, Φ_8 – через сечения полюсов, Φ_9, \dots, Φ_{16} – через воздушные зазоры под полюсами, $\Phi_{17}, \dots, \Phi_{24}$ – через ярмо статора, $\Phi_{25}, \dots, \Phi_{32}$ – рассеяния через воздушные зазоры между полюсами статора, $\Phi_{33}, \dots, \Phi_{40}$ – через цапфу, расположенную на роторе,

$\Phi_{C1}, \dots, \Phi_{C16}$ – контурные; R_k – магнитные сопротивления участков цепи, причем R_{pk} – полюсов, R_{gk} – воздушных зазоров между полюсами и ротором, R_{sk} – участков ярма статора между двумя полюсами, R_{lk} – рассеяния между полюсами (воздушных зазоров), R_{ak} – участков ротора; e_k – магнитодвижущие силы катушек, причем $e_1 = i_{c1} w_1, \dots, e_8 = i_{c8} w_8$.

Расчет магнитной цепи радиального АМП1 может быть выполнен на основе закона, подобного второму закону Кирхгофа для электрических цепей с использованием схемы замещения (рис. 3). Для расчета магнитных цепей могут применяться различные методы, в том числе, метод узловых потенциалов или метод контурных потоков. Применение метода контурных потоков (аналога метода контурных токов) приводит к системе алгебраических уравнений относительно контурных потоков. Ее решение позволяет найти контурные потоки, через которые определяются и потоки во всех ветвях. Так потоки несмежных ветвей равны контурным потокам, если их направления совпадают, и равны контурным потокам с обратным знаком, если не совпадают. Также определяются и потоки смежных ветвей [8].

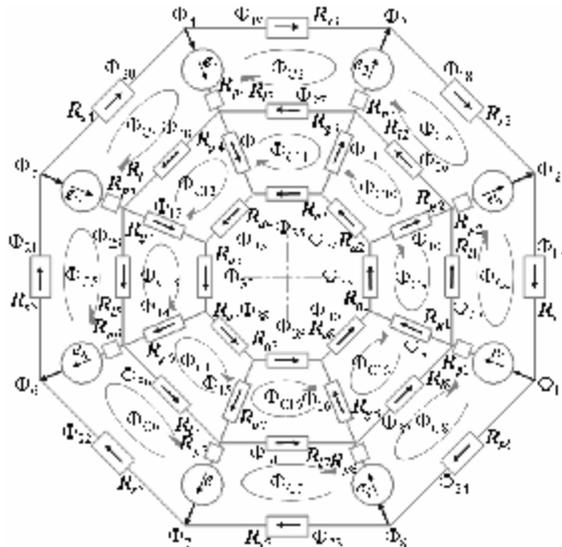


Рис. 3 – Эквивалентная схема замещения электромагнитной цепи АМП1

Определение магнитных потоков $\Phi_{41}, \dots, \Phi_{80}$ в магнитной цепи радиального АМП2 выполняется с использованием такого же подхода на основе рассмотрения аналогичных модели и схемы замещения (см. рис. 2, 3).

Магнитная цепь осевого АМП3 может быть замещена схемой, приведенной на рисунке 4. Здесь приняты обозначения, аналогичные обозначениям магнитных потоков, сопротивлений и магнитодвижущих сил для АМП1 (рис. 3). Расчет магнитной цепи осевого АМП3 может быть выполнен с использованием данной схемы замещения на основе применения метода контурных потоков или узловых потенциалов.

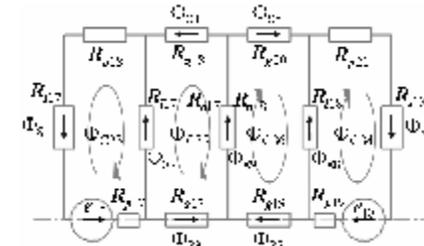


Рис. 4 – Эквивалентная схема замещения электромагнитной цепи АМП3

7. Дискретное управление движением ротора в АМП. При управлении движением ротора для его удержания вблизи центрального положения в зазорах всех АМП на каждую полюсную катушку системой управления подается управляющее напряжения u_{ck} , величина которого определяется в соответствии с применяемым алгоритмом управления в зависимости от параметров регулирования – значений обобщенных координат, как механических ξ , так и электромагнитных Ψ_{ck} .

Для управления движением ротора компрессора в АМП предлагается использовать один из способов дискретного управления электромагнитным подшипником [9]. Он заключается в том, что выбирается величина напряжения (U), подаваемого на катушки с обмотками управления. Задаются m фиксированных уровней отклонений от центрального положения, $2m$ величин скоростей движения, $2m$ пороговых значений разности токов в диаметрально противоположных катушках с обмотками управления. Через одинаковый промежуток времени определяются токи, отклонения и скорости движения шеек ротора. После сравнения измеренных величин с эталонными (уровневыми величинами) формируются управляющие воздействия и на управляющие обмотки подаются, либо напряжения $u_{ck} = U$, либо $u_{ck} = 0$.

8. Численные исследования. Решение задачи определения параметров управления, обеспечивающих устойчивость движения ротора на магнитном подвесе, проводилось для модели компрессора ГПА, приведенной на рисунке 5. Данная модель является уменьшенной копией турбокомпрессора с заменой подшипников скольжения активными магнитными подшипниками.

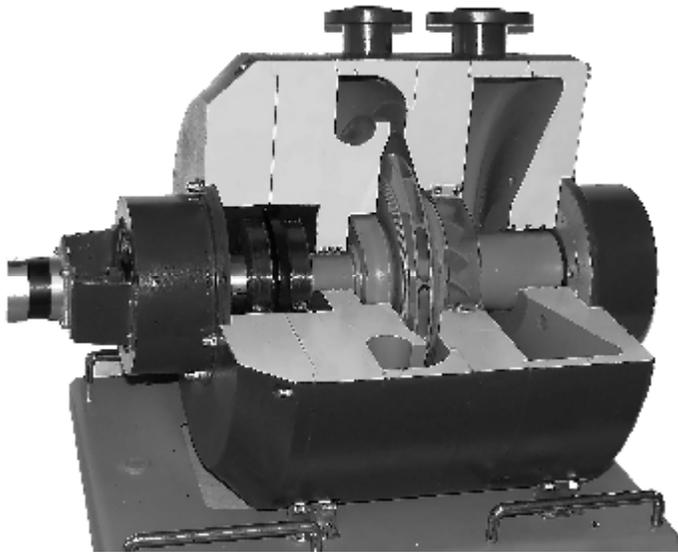


Рис. 5 – Модель компрессора ГПА с магнитными подшипниками

Проведение вариантных расчетов выполнялось с помощью имитационной модели (ИМ) [10], в основу которой положена СДУ (2)-(4). Решение данной системы в ИМ производится методом Рунге-Кутты 7-го порядка с предварительным приведением к эквивалентной СДУ в нормализованной форме с помощью введения новых переменных и линейного комбинирования. Кроме того, в ИМ предусмотрена возможность внесения в измеряемые параметры управления случайной погрешности с заданным предельным значением для исследования ее влияния на устойчивость движения ротора на АМП.

При проведении численных экспериментов вносились кинематические возмущения – отклонения шеек ротора на величину зазора. Исследования позволили найти по заданным параметрам АМП параметры алгоритма управления (см. п. 7), обеспечивающие устойчивость движения ротора в переходном процессе и установившегося движения при заданных значениях допустимых отклонений. Осциллограммы вертикального движения опорных участков ротора в зазорах радиальных АМП1 и АМП2 приведены на рисунках 6-8.

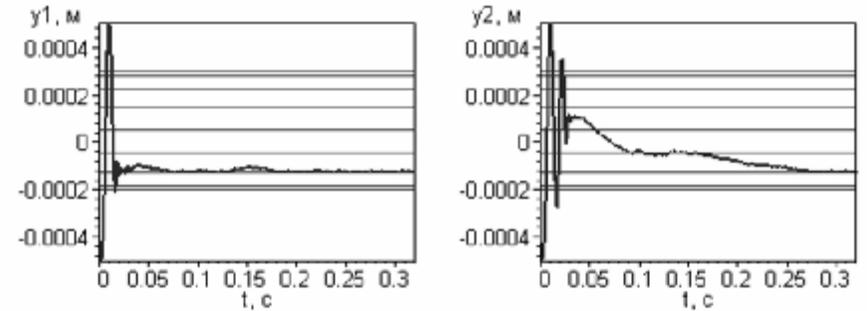


Рис. 6 – Траектория движения ротора в вертикальном направлении

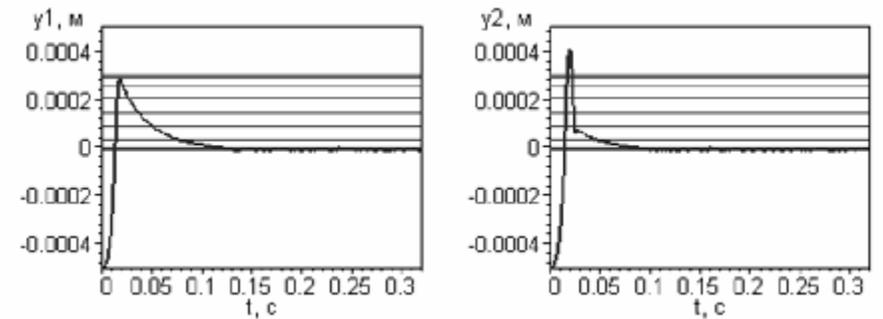


Рис. 7 – Траектория движения ротора в вертикальном направлении

Из рисунка 6 следует, что при относительно широком диапазоне уровней управления по отклонениям (показаны горизонтальными линиями) и малом демпфировании в переходном процессе отклонения ротора могут быть равны величине зазора. При сужении диапазона уровней управления и увеличении демпфирования в системе с помощью увеличения активных сопротивлений в цепях электромагнитов в четыре раза удается достичь уменьшения максимальных отклонений в переходном процессе до 80 % от зазора (рис. 7).

Дальнейшее увеличение активных сопротивлений позволяет снизить максимальные отклонения до 60 % от зазора (рис. 8). В последних двух случаях параметры управления обеспечивают стационарные колебания ротора с амплитудами, не превышающими 10 % от зазора, при внесении указанных выше возмущающих воздействий.

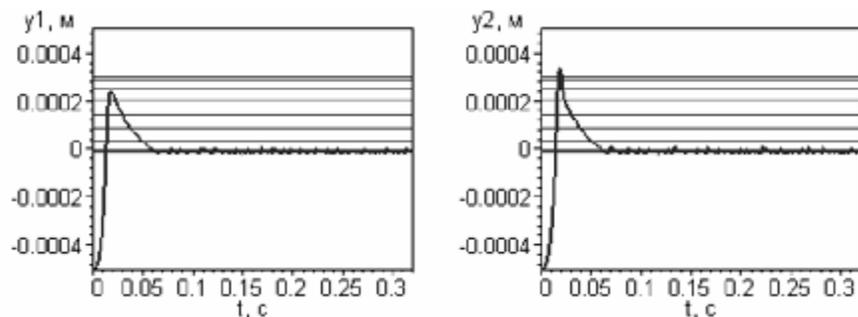


Рис.8 – Траектория движения ротора в вертикальном направлении

Результаты расчетных исследований, приведенные на рисунке 9, иллюстрируют возможности алгоритма управления обеспечить устойчивость движения ротора при измерительных погрешностях в пределах 10 %. В данном случае изменяется длительность переходного процесса, но амплитуда стационарных колебаний ротора также не превосходит 10-15 % от зазора.

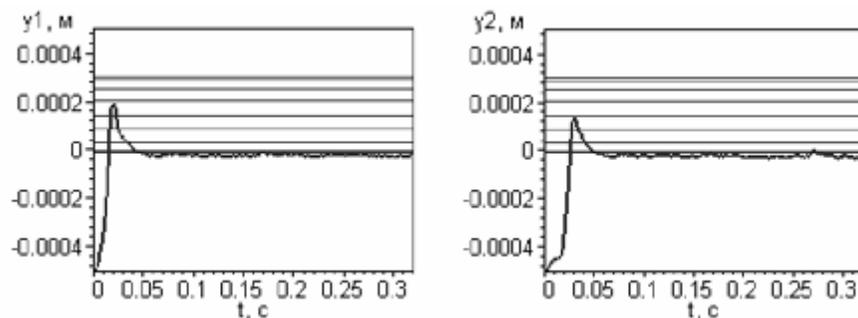


Рис. 9 – Траектория движения ротора при погрешности измерений

Заключение. В работе рассмотрена нелинейная математическая модель подвеса жесткого ротора в активных магнитных подшипниках. Основное отличие имитационной модели, построенной с использованием предложенной математической модели, – возможность более адекватного моделирования поведения ротора на АМП при его приближении к полюсам.

Модели такого типа могут использоваться для проведения численных экспериментов по нахождению реальных границ применения линейных и нелинейных алгоритмов управления и определения их параметров, позволяющих обеспечить устойчивость движения ротора в заданных пределах.

Другим приложением имитационных вычислительных моделей является

разработка и оптимизация алгоритмов управления системы ротор на АМП, а также исследование динамического поведения этой системы с определением резонансных режимов и последующей отстройкой от них.

С помощью описанной имитационной модели исследовано динамическое поведение системы «ротор в АМП». Показано, что при внесении кинематических возбуждений подбором параметров предложенного дискретного алгоритма управления возможно добиться величин максимальных отклонений шеек опорных участков ротора в переходных процессах и амплитуд стационарных колебаний, не превышающих заданных значений. Результатами численных экспериментов подтверждена устойчивость данного алгоритма к возможному возникновению случайных погрешностей измерений параметров управления.

Список литературы: 1. Siegart R, Bleuler H, Traxler A. Industrial Magnetic Bearings. Gordon and Breach Science Publisher, –Amsterdam, 2000. 2. Steven M, Nataraj C. Suppression of Base Excitation of Rotors on Magnetic Bearings. International Journal of Rotating Machinery. Vol. 2007, Article ID 91276. –10 p. 3. G. Schweitzer, H. Bleuler and A. Traxler Active magnetic bearings. –Zurich: ETH, 1994. –244 p. 4. Maslen E.H. Magnetic bearings. University of Virginia Department of Mechanical, Aerospace, and Nuclear Engineering Charlottesville, Virginia, 2000. –229 p. 5. Журавлев Ю.Н. Активные магнитные подшипники: Теория, расчет, применение. –СПб.: Политехника, 2003. –206 с. 6. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. / Ред. В.Н. Челомей (пред). –М.: Машиностроение, 1979. - Т.2: Колебания нелинейных механических систем. / Под ред. И.И. Блехмана. –351 с. 7. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: Учебник для студентов энергетических и электротехнических ВУЗов. –М.: Высш. шк., 1973. –752 с. 8. Борисов Ю.М., Липатов Д.Н., Зорин Ю.Н. Электротехника. Учебник для ВУЗов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. –552 с. 9. Патент № 2277190. Российская Федерация. МПК F16C 32/04. Способ дискретного управления электромагнитным подвесом вращающихся роторов / ОАО «Сумское НПО им. М.В. Фрунзе», НТУ «ХПИ»; Роговой Е.Д., Бухолдин Ю.С., Левашов В.А., Мартыненко Г.Ю., Смирнов М.М. –№ 2003121317/11. –Заявл. 10.07.2003 г. Опубл. 27.05.2006 г. // Изобретения. Официальный бюллетень, 2006. –№15. 10. Мартыненко Г.Ю. Исследование устойчивости движения ротора в управляемых электромагнитных подшипниках с помощью нелинейной имитационной вычислительной модели / Проблемы машиностроения. –Харьков: ИПМаш НАН Украины, 2005. –Т.8, №1. –С. 47-58.

Поступила в редколлегию 15.05.2008

УДК 621.165, 532.6

А.В. ПУСАНОВ

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИПМаш НАН УКРАИНЫ В ОБЛАСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПРОТОЧНЫХ ЧАСТЯХ ТУРБОМАШИН

The basic results and research directions of IPMash NAS of Ukraine in fields of mathematical simulation of gas dynamics in turbo-machines are presented. Modern numerical methods for 3D gas dynamic analysis and for design, modernization and determination of directions of aerodynamic improvement for turbo-machines are considered.

Введение

Повышение экономичности и надежности турбомашин является актуальной задачей для многих отраслей промышленности Украины и мира, таких как энергетика, авиация, газотранспортная система, коммунальное хозяйство и др. Важнейшей составляющей решения этой комплексной проблемы есть аэродинамическое совершенствование проточных частей турбомашин. Традиционно в этом процессе решающую роль играет физический эксперимент. Однако в настоящее время существенно возросло значение численного эксперимента, который не может заменить физический, но с его помощью возможно значительно сократить объем экспериментальных исследований. Кроме того, численный эксперимент обладает такими преимуществами, как существенно меньшие материальные и временные трудозатраты, а также обеспечивает большую информативность и оперативность получаемых результатов. Для получения достоверных результатов численного эксперимента необходимо применение и развитие современных методов математического моделирования нестационарных газодинамических процессов в проточных частях турбомашин. В ИПМаш НАНУ это направление существует более 30 лет. У его истоков стояли академики Проскура Георгий Федорович и Шубенко-Шубин Леонид Александрович. Большой вклад в развитие этого направления внесли такие известные ученые института, как Соколовский Георгий Александрович, Гнесин Виталий Исаевич, Ершов Сергей Владимирович и др.

Основными направлениями исследований ИПМаш НАНУ в этой области являются:

- разработка математических моделей и их реализация в виде программных комплексов;
- расчетно-теоретические исследования нестационарных газодинамических процессов в проточных частях турбомашин;
- проектирование, модернизация и определение направлений аэродинамического совершенствования проточных частей турбомашин.

1. Математическая модель

На современном этапе развития вычислительной газодинамики наиболее приемлемым считается моделирование пространственных вязких течений сжимаемого теплопроводного газа на основе численного интегрирования осредненных уравнений Навье-Стокса [1], для замыкания которых необходимо использовать модель турбулентности. В настоящее время в мире одной из самых удачных для инженерных расчетов считается модель турбулентности SST Ментера [2]. Описанные уравнения являются

нелинейными дифференциальными уравнениями в частных производных смешанного гиперболически-параболического типа. Для их решения следует применять численные методы, которые обеспечивают выполнение определенных требований: консервативность, энтропийное условие, монотонность и точность. В ИПМаш НАНУ была разработана неявная ENO-схема Годунова повышенной точности, обладающая перечисленными свойствами [3, 4]. Решение задач вычислительной газодинамики требует огромных ресурсов ВТ, что вызывает необходимость создания специальных алгоритмов, которые позволяют рационально использовать возможности ЭВМ. В Институте был разработан специальный метод локальной структуризации неструктурированной сеток [5], его применение позволило создать достаточно экономичные программные комплексы [6, 7], которые по быстродействию превосходят в 5-10 раз, требуют в 3-7 раз меньше оперативной памяти по сравнению с зарубежными аналогами и обладают следующими свойствами:

– обеспечивают удовлетворительную точность получаемых результатов как по качественной структуре трехмерных вязких течений, так и по количественной оценке характеристик турбомашин. Рассогласование при расчете потерь кинетической энергии и КПД ступеней турбин составляет около 0,5 – 1% (абсолютных) [8];

– хорошо зарекомендовали себя при проектировании и модернизации лопаточных машин [8];

– используются рядом предприятий Украины, России и Польши при разработке и исследовании турбомашин.

2. Расчетно-теоретические исследования нестационарных газодинамических процессов в проточных частях турбомашин

Поток в проточных частях турбомашин является существенно пространственным и нестационарным. Такие явления, как вторичные течения оказывают значительное влияние на аэродинамические характеристики осевых машинах, а в осерадиальных и радиальных проточных частях эти физические эффекты приобретают качественные изменения, за счет чего их удельный вес в формировании общей картины потока еще более усиливается. Кроме того, в радиальных лопаточных машинах за счет конструктивно заложенного разворота течения в двух (тангенциальной и меридиональной) поверхностях «трехмерность» потока принципиально возрастает, что приводит к практически неизбежному появлению отрывов. Существенное влияние на общую структуру течения оказывают выдувы охлаждающего воздуха в турбинах и отборы в компрессорах, перетечки в надбандажных и диафрагменных уплотнениях, учет и анализ этих факторов также важен для обеспечения согласованной работы отдельных элементов проточной части. При совместной работе элементов проточной части турбомашин происходит их взаимное влияние друг на друга, что приводит к усложнению структуры течения, прежде всего к усилению трехмерности потока. За счет

взаимного движения лопаточных аппаратов друг относительно друга возникает периодически нестационарное изменение конфигурации проточной части, что неизбежно приводит к появлению нестационарных эффектов, усложняющих картину течения, таких как: прохождение потенциальной и следовой неравномерностей; дополнительное радиальное перемешивание потока; клокинг-эффект и др. В основном исследование описанных явлений проводилось экспериментально, и, несмотря на достаточно большое число работ, посвященных этим вопросам, имеющиеся знания в этой области весьма ограничены [9, 10, 11 и др.]. Использование численного эксперимента для изучения сложных, существенно пространственных газодинамических процессов в проточных частях турбомашин открывает возможности для более глубокого понимания этих явлений, установления новых закономерностей и выработки полезных рекомендаций при решении важных технических задач.

2.1. Структура вторичных течений в прямой турбинной решетке

Геометрические характеристики решетки и результаты ее экспериментального исследования подробно описаны в работах [12, 13]. Детальное сопоставление расчетных и экспериментальных данных приведено в работе [14]. На рис. 1 с помощью линий тока представлена полученная в расчете структура вторичных течений. На рис. 1,б показана полная картина вторичных течений у торцевой поверхности, а на рис. 1,а дополнительно изображены линии тока в ядре потока. Видно, что течения в концевых сечениях и в невозмущенном потоке существенно отличаются. На рис. 1,в представлена визуализация подковообразного вихря. Вблизи входной кромки расположена точка торможения потока (седловая точка), от которой отходят две ветви подковообразного вихря: одна – со стороны разрежения, а другая – со стороны давления лопатки (рис. 1,в). Течение в окрестности седловой точки можно интерпретировать как столкновение двух потоков: пограничного слоя со стороны входа и отраженной от лопатки струи, пришедшей из ядра потока.

Ветви подковообразного вихря закручиваются относительно друг друга и затекают на сторону разрежения лопатки, после чего движутся в направлении выхода, удаляясь от торцевой поверхности. Пограничный слой, приходящий со входа по торцевой поверхности, полностью «сворачивается» вокруг ветвей подковообразного вихря (рис. 1,г). На рис. 1,д показано перетекание в пограничном слое, формирующее каналный вихрь. Видно, что поток, попадающий в каналный вихрь, приходит из невозмущенной части течения, а не из пограничного слоя. Таким образом, на торцевой поверхности в зоне каналного вихря (за подковообразным вихрем) формируется «новый» пограничный слой. Канальный вихрь в месте затекания с торцевой поверхности на сторону разрежения лопатки инициирует появление углового вихря, показанного на рис. 1,е.

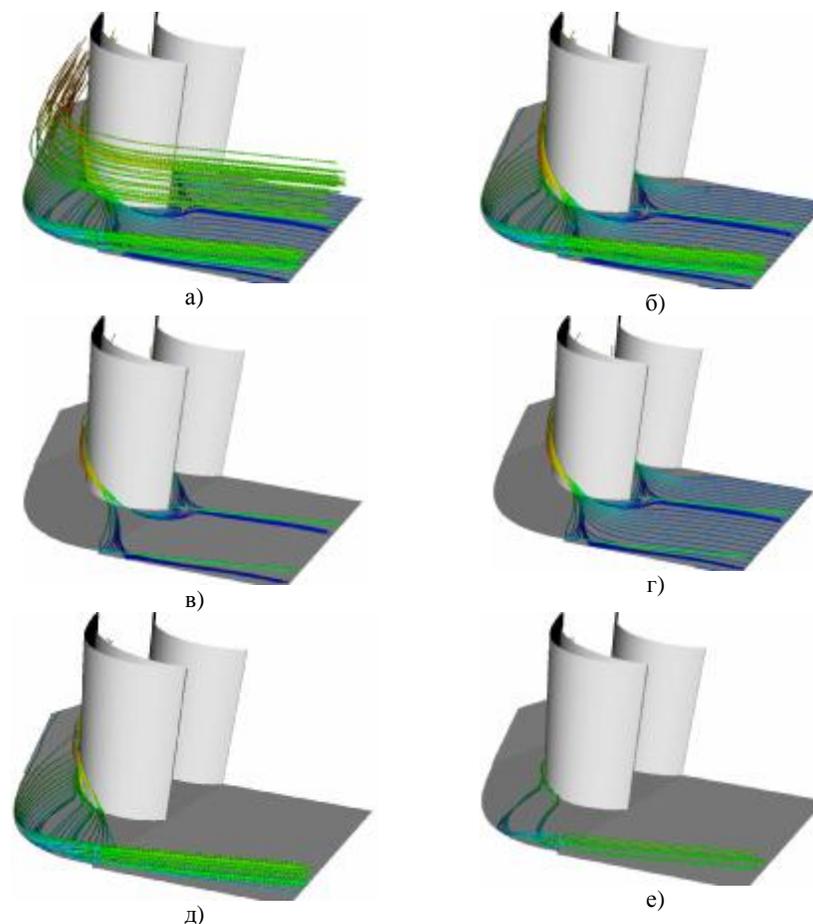


Рис. 1 – Визуализация вторичных течений (расчет)

На рис. 2 представлена визуализация вторичных течений, полученная в эксперименте [12], наблюдается хорошее качественное согласование численных и экспериментальных результатов.

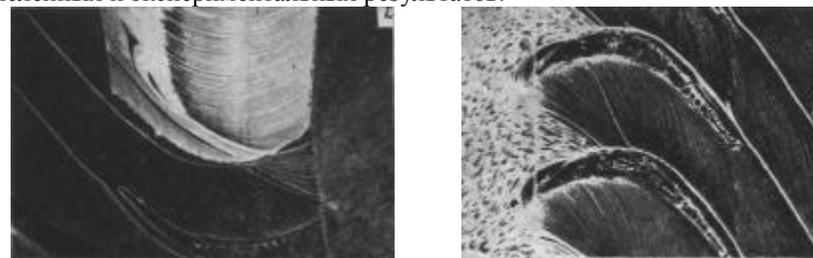


Рис. 2 – Структура вторичных течений (эксперимент)

2.2. Периодически нестационарное обтекание турбинной ступени

Выполнено численное исследование периодически нестационарного обтекания турбинной ступени, геометрические и газодинамические характеристики которой приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Геометрические и газодинамические характеристики турбинной ступени

Параметр	Статор	Ротор
Количество лопаток	68	94
Относительная высота лопатки (по среднему сечению)	1.55	2.36
Относительный шаг решетки (по среднему сечению)	0.98	0.87
Высота лопатки [мм]	101	126
Корневой диаметр [мм]	633	629
Частота вращения [об/мин]	-	5150
Осевой зазор [мм] (по среднему сечению)	21.4	
Полное давление на входе [МПа]	0.63726	
Полная температура на входе [К]	1213	
Статическое давление на выходе [МПа]	0.2225	

На рис. 3 дана визуализация линий тока в трех сечениях статора исследуемой ступени. Видно, что в области кромочного следа существует отклонение потока в сторону корневого обвода (по сравнению с основным течением). Такой эффект имеет место в случае неосевого направления потока за лопатками из-за локального нарушения условия радиального равновесия.

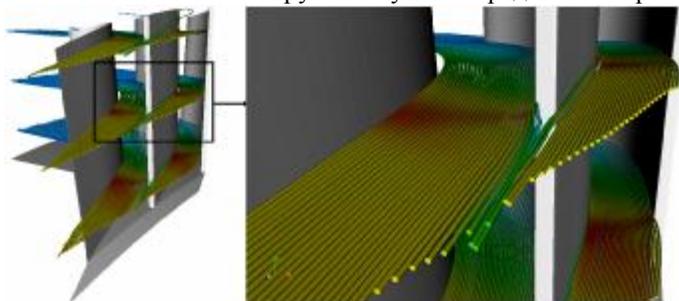


Рис. 3 – Линии тока. Статор

На рис. 4 с помощью изолиний энтропийной функции для четырех моментов времени на периоде изображен процесс прохождения кромочных следов от лопаток статора в среднем сечении ротора. После попадания следа в межлопаточный канал рабочего колеса он перерезается лопаткой и прижимается к стороне разрежения. Вблизи стороны разрежения, где скорость выше, чем в ядре потока и у стороны давления, происходит смыкание соседних следов.

Также на рис. 4 показаны отклонения векторов скорости от среднего значения. Из представленного рисунка хорошо видно, что в областях

прохождения следа возникают флуктуации течения в направлении, противоположном основному потоку, которые инициируют образование вихревых зон. Наличие кромочных следов вызывает дополнительное перетекание потока в радиальном направлении.

На рис. 5 изображено изменение структуры вторичных течений в роторе в зависимости от момента времени на периоде. Картина течения меняется существенным образом, причем при попадании в зону вторичных течений кромочный след сносится на сторону разрежения лопатки, что приводит к усилению трехмерности течения. Глубина периодического проникновения вторичных течений (усиленных кромочным следом) как от корневых, так и от периферийных обводов в сторону средних сечений лопаток ротора весьма значительна.

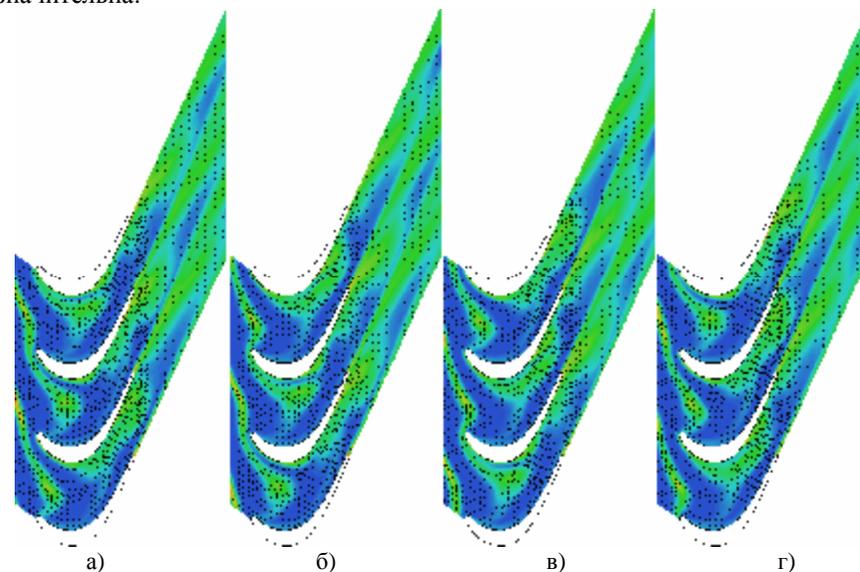


Рис. 4 – Энтропийная функция. Отклонения векторов скорости от среднего значения. Прохождение следов. (а) $t=0$; (б) $t=0,25T$; (в) $t=0,5T$; (г) $t=0,75T$

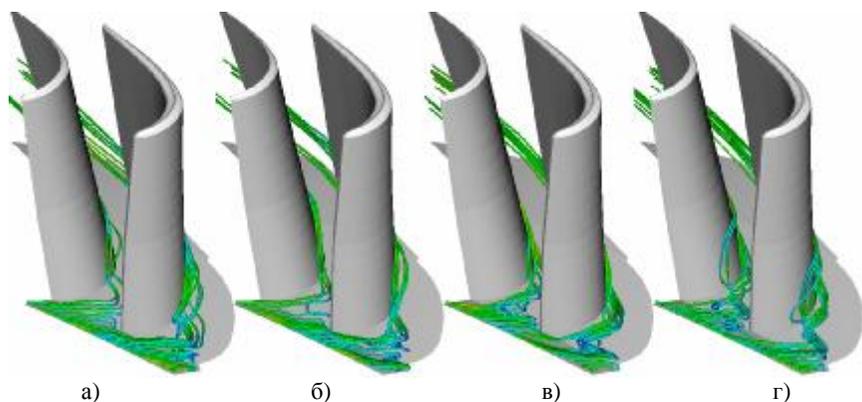


Рис. 5 – Линии тока. Ротор. Вторичные течения.
 (а) $t=0$; (б) $t=0,25T$; (в) $t=0,5T$; (г) $t=0,75T$

3. Проектирование, модернизация и определение направлений аэродинамического совершенствования проточных частей турбомашин

Результаты апробации математических моделей и проведенных исследований позволили перейти к выполнению работ по проектированию и модернизации проточных частей различных типов турбомашин: наземных и авиационных ГТД, газоперекачивающего оборудования; паровых турбин, турбодетандеров. Анализ и изучение газодинамических процессов позволяют определять направления аэродинамического совершенствования проточных частей. Так, в результате выполненных исследований было определено, как пространственная форма лопаток РК влияет на вторичные течения и каким образом можно уменьшить их интенсивность и, соответственно, уменьшить потери кинетической энергии (см. рис. 6). Установлено, что для коротких лопаток РК наименьшая интенсивность вторичных течений достигается при саблевидности РК в форме паруса (в отличие от лопаток НА, для которых оптимальной является саблевидность в форме седла).

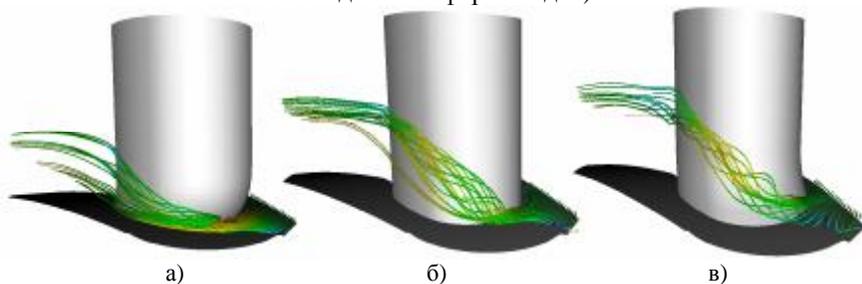


Рис. 6 – Визуализация линий тока в каналах РК с лопатками различных форм саблевидностей: а) – лопатка в форме паруса у корня; б) – прямая лопатка; в) – лопатка в форме седла у корня.

Наземные и авиационные ГТД – это устройства, уровень аэродинамического совершенства которых достаточно высок. Поэтому для них численный эксперимент наиболее актуален именно на этапе доводки. С его помощью удастся существенно сократить количество продувок (до 2-х раз), что приводит к сокращению времени, необходимого на доводку, и, соответственно, снижению материальных затрат. На рисунке 7 представлен пример доводки двигателя ДН80 (производитель «Зоря»-«Машпроект»). После проверки всей турбины была найдена возможность повышения КПД ТНД. В результате изменения формы лопаток улучшилась картина обтекания, «ушел» прикорневой отрыв потока, а КПД увеличился на 1,5%, мощность возросла на 300 кВт [15, 16].

На сегодняшний день программные комплексы ИПМаш НАНУ внедрены на ряде ведущих предприятий Украины, России и Польши, таких как: ЗМКБ «Прогресс», Запорожье, «Зоря»-«Машпроект», Николаев, «Салют», Москва, «Сатурн», Москва, «ЛМЗ», Санкт-Петербург, «Мотор-Сич», Запорожье, «СМНПО им.Фрунзе», Сумы, «Alstom», Эльблонг, Польша, «Турбогаз». Они стали важным инструментом для расчета трехмерных нестационарных течений в проточных частях турбомашин (это входные и выходные устройства, лопаточные аппараты, переходники и др.) и включены в процесс проектирования.

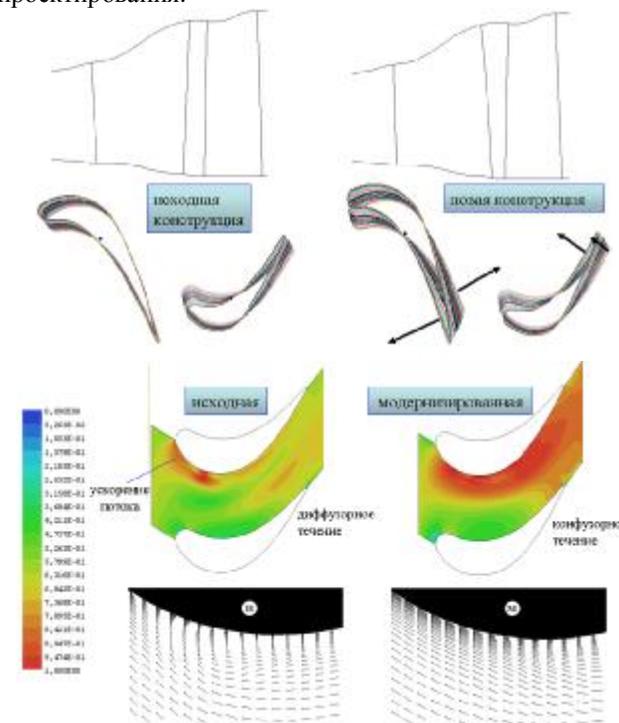


Рис. 7 – Модернизация ТНД ГТД ДН80

Заключення

В ИПМаш НАНУ створена наукова школа в області математичного моделювання нестационарних просторових турбулентних течій теплопровідного газу, на основі робіт якої створені сучасні методи аеродинамічного розрахунку, що дозволяють вивчати складні газодинамічні процеси і визначати способи аеродинамічного вдосконалення проточних частин турбомашин різного призначення.

Список літератури: 1. Андерсон Д. Вычислительная гидромеханика и теплообмен / Д. Андерсон, Дж. Таннехилл, Р. Плетчер – М.: Мир, 1990. – 725 с. 2. Menter F.R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications // AIAA J. – 1994. – 32, № 8. – Р. 1598–1605. 3. Ершов С.В. Квазимонотонная ENO схема повышенной точности для интегрирования уравнений Эйлера и Навье-Стокса // Мат. моделирование. – 1994. – 6, N 11. – С. 58–64. 4. Ершов С.В. Численное моделирование турбулентных отрывных течений в пространственных решетках с использованием неявной ENO схемы С.К. Годунова / С.В. Ершов, А.В. Русанов // Пробл. машиностроения. – 1998. – 1 № 1. – С. 70–78. 5. Русанов А.В. Универсальный метод организации численного интегрирования уравнений газовой динамики. Постановка задачи // Пробл. машиностроения. – 2004. – 7, N 3. – С. 9–13. 6. Ершов С.В. Комплекс программ розрахунку тривимірних течій газу в багатовісцевих турбомашинах “FlowER” / С.В. Ершов, А.В. Русанов: Свідчення про державну реєстрацію прав автора на твір, ПА № 77. Державне агентство України з авторських та суміжних прав, 19.02.1996. 7. Русанов А.В. Метод розрахунку тривимірних турбулентних течій в проточних частих произвольной формы / А.В. Русанов, С.В. Ершов // Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования. Сб. Науч. трудов. ИПМаш НАН Украины. – 2003. – 1. – С. 132–136. 8. Lampart P., Yerzhov S., Rusanov A. Validation of turbomachinery flow solver on turbomachinery test cases // International conference SYMKOM02: Compressor & turbine stage flow path theory, experiment & user verification, Ciepłone Maszyny Przepływowe. Turbomachinery., Politechnika Łódzka, Łódź, Poland. – 2002, No. 122. – Р. 63–70. 9. Сивердинг К. Современные достижения в исследовании основных особенностей вторичных течений турбинных решеток // Тр. амер. инж. - мех. Энергет. машины и установки. – 1985. – Т. 107, № 2. – С. 1–13. 10. Шульц Х.Д. Трехмерное отрывное течение на торцевой поверхности кольцевой компрессорной решетки при наличии аэродинамического взаимодействия с расположенным выше по потоку ротором. Часть 2. Нестационарные поля скорости и давления / Х.Д. Шульц, Х.И. Галлус, Б. Лакшминараяна // Современное машиностр. Сер. А. – 1991. – № 3. – С. 172–186. 11. Saren V.E. Experimental and Numerical Investigation of Airfoil Clacking and Inter-Blade-row Effects on Axial Compressor Stage Performance / V.E. Saren, N.M. Savin, D.J. Dorney, D.L. Sondak // AIAA 98-3413. – 1998 – 13 p. 12. Ходсон Х.П. Пространственное течение в решетке профилией турбины низкого давления на расчетном режиме / Х.П. Ходсон, Р.Дж. Домини // Тр. амер. инж.-мех. энергет. Машины и установки. – 1988, № 2. – С. 116–126. 13. Ходсон Х.П. Характеристики турбинной решетки при низких давлениях на нерасчетном режиме / Х.П. Ходсон, Р.Дж. Домини // Тр. амер. инж.-мех. Энергет. машины и установки. – 1988. – № 2. – С. 127–137. 14. Русанов А.В. Апробація чисельної моделі в'язкої турбулентної течії газу в широкому діапазоні режимних параметрів // Зб. наук. праць XI ВПС – 2004. – Вип. 2(11). – С. 3–9. 15. Ершов С.В. Аэродинамическое совершенствование проточной части турбины ГТД на основе расчетов трехмерного вязкого течения. Часть 1. Ступени турбин высокого и низкого давления / С.В. Ершов, А.В. Русанов, Б.В. Исаков и др. // Вестн. двигателестроения. – 2004. – Вып. 2. – С. 41–46. 16. Русанов А.В. Аэродинамическое совершенствование проточной части турбины ГТД на основе расчетов трехмерного вязкого течения. Часть 2. Переходный диффузор и ступень силовой турбины / А.В. Русанов, С.В. Ершов, Б.В. Исаков и др. // Авиаци.-косм. техника и технология. – 2004. – Вып. 8(16). – С. 46 – 50.

Поступила в редколлегию 15.05.2008

УДК 316.3

В.М. РИЖИХ, В.О. ШВАДЧЕНКО, О.В. КОРНІСНКО, О.М. ЮРЧЕНКО

УКРАЇНА ПЕРЕД ВИКЛИКАМИ СУЧАСНОСТІ В КОНТЕКСТІ ГЛОБАЛІЗАЦІЇ

Рассмотрено состояние вопросов глобализации как комплекса взаимосвязанных процессов, протекающих в мировом масштабе. Дан сравнительный анализ экономического потенциала ведущих государств Европы, Америки, Азии и Африки.

У світовій теорії і практиці другої половини двадцятого сторіччя склався досить впливовий напрямок суспільної думки, який отримав назву філософії глобальних проблем. Цей філософський напрямок, незважаючи на широке коло проблем, що розглядаються, в центр уваги ставить людину, його майбутнє.

Глобалізація, безумовно, ключовий термін сучасної епохи. Глобалізацією називають історичні процеси взаємодії і взаємопроникнення різних цивілізацій, які склалися у сталених територіальних кордонах на базі визначених етносів.

З іншого боку під глобалізацією розуміють виникнення загальних, або з меншою мірою схожих за змістом проблем для різних регіонів світу (екологічних, демографічних, міграційних, продовольчих тощо), а також постійно зростаючу взаємну соціально-політичну залежність країн і формування зон спільних інтересів.

Глобалізація – це комплекс взаємопов'язаних процесів, які протікають в планетарному масштабі, в кожному з яких мають місце механізми саморегуляції.

Глобалізація охоплює всю земну кулю, перетворює світову цивілізацію, яка складається із різних складових, в єдину систему взаємовідносин, що зачіплюють усі сфери суспільного життя.

Складність процесів глобальної взаємозалежності обумовлена взаємодією двох основоположних тенденцій: з одного боку – уніфікації, поглиблення, універсалізації життя народів, а з іншого – зростанням її фрагментації, протиріч, конфліктів.

Масштабний рух різних цивілізацій, культур, національних суспільств назустріч один одному, обмін матеріальними та духовними цінностями, формування глобальної культури і етики при одночасному посиленні національно-орієнтованих норм значно актуалізувати проблему взаємовідносин глобального і національного.

В рамках діалектики глобальне – національне особливого значення набуває питання про наслідки глобалізації для етнокультурного розвитку

індивіда – народу – держави. Протилежність цих тенденцій надає глобальному розвитку нерівномірний, протиречивий і конфліктний характер.

В недалекому минулому такого роду проблеми були пов'язані з протиріччями двох політичних систем: капіталістичної і соціалістичної. На зміну двополюсному світу прийшов світ багатополосний, що призвело до змін характеру проблем.

По-перше, на місце загрози світової війни, як наслідок зіштовхнення двох протилежних суспільно-політичних систем, прийшла велика кількість локальних конфліктів, які мають свою міру глобальності, оскільки втягують в орбіту конфліктів багато сторін. В сучасних умовах не слід виключати і загрозу всесвітньої воєнної катастрофи.

По-друге, за відсутністю впливу протилежних суспільно-політичних систем стає все більш очевидною проблема встановлення справедливого економічного порядку. Вона пов'язана з нерівномірністю світового суспільно-економічного розвитку і відповідного рівня життя населення.

Глобалізація сучасності це великий проект, який прийшов на зміну моделі глобалізації свідомості – комунізм і лібералізм.

У зв'язку з цим постають питання: як і в чий інтересах реалізується її сценарій в кожній окремій країні і у світі в цілому? Як вона має бути відображена на житті кожної окремої людини, кожної нації? Як співвідноситься хід глобалізації і роль національних еліт? Що буде з культурною самобутністю народів?

Усі глобальні проблеми знаходяться у складному взаємозв'язку та взаємозалежності. Це означає, що вирішення однієї будь-якої проблеми, передбачає врахування впливу на неї комплексу інших проблем.

В останні десятиріччя і роки під впливом ряду криз, які створюють загрозу людству, особлива увага наукового та широкого світового суспільства приділяється найгострішим проблемам, які прийнято називати глобальними.

Під глобальними проблемами людства розуміється комплекс найгостріших протиріч, які торкаються світу в цілому, а разом з цим і окремих регіонів та країн.

Переліки цих проблем досить широкі і в залежності від рівнів класифікації та суб'єктивних поглядів авторів їх складання різняться один від одного. Однак до них майже завжди відносяться такі проблеми:

- збереження миру;
- енергетична;
- сировинна;
- екологічна;
- продовольча;
- демографічна;

- охорона здоров'я;
- криза культури;
- міжнаціональні відношення;
- урбанізація;
- дефіцит демократії;
- відсталість;
- тероризм;
- світовий океан;
- катастрофи і аварії;
- недопущення термоядерної війни;
- обмеження гонки озброєння;
- створення умов для ефективного розвитку економіки;
- подолання голоду.

Глобальні проблеми людства стали важливим об'єктом міждисциплінарних досліджень, в яких приймають участь як суспільні, так і технічні і гуманітарні науки. До окремих таких наук можна віднести філософію, економіку, соціологію, право, географію, біологію, екологію, фізику, хімію, океанологію та інші.

Одним із варіантів класифікації глобальних проблем можна вважати такі групи.

Першу групу складають проблеми, які пов'язані з відношенням між основними соціальними областями людства, тобто між групами країн. Ці проблеми отримали назву інтерсоціальні. До них відносяться проблеми недопущення війни і забезпечення миру, а також встановлення справедливого міжнародного економічного порядку.

Друга група об'єднує проблеми, які пов'язані із взаємодією суспільства і природи. Такими проблемами є забезпечення енергією, паливом, прісною водою, чистим повітрям тощо. До цих проблем відносяться проблеми охорони природи, розумного освоєння світового океану і космічного простору.

Третю групу глобальних проблем складають ті, що пов'язані з системою людина – суспільство. Вони безпосередньо стосуються окремої людини і залежать від спроможності суспільства створити реальні можливості для розвитку особистості.

Ці та інші глобальні проблеми сучасності знаходяться в тісному взаємозв'язку з основними соціальними процесами нашої перехідної епохи. Вони в значному ступені концентрують у собі складності і протиріччя соціального і духовного характеру розвитку нашої цивілізації, гостро ставлять питання про майбутнє. Тому глобальні проблеми стали об'єктом

серед наукових філософських досліджень, гострої ідейної боротьби, зіткненням світогляду.

Концепція глобальних проблем, яка базується на науковому і соціальному підходах до цих проблем в їх єдинстві, все більше впливає на світову “глобалістику” і стає в багатьох випадках теоретичним, концептуальним фундаментом міжнародної стратегії практичних дій у вирішенні глобальних проблем.

Немалу роль при цьому грає і наукова філософія, яка:

- розробляє методологію і формує світоглядські аспекти глобальних проблем, сприяє, насамперед, вірної постановки цієї проблеми;
- досліджує наукові і соціальні шляхи їх вирішення на основі комплексного системного підходу, інтеграції різних наук і практики, стимулювання дискусій і діалогів навколо цієї проблеми;
- концентрує увагу на гуманістичних аспектах глобальних проблем, установлює їх концептуальний зв'язок із загальними тенденціями прогресивного розвитку людської цивілізації як у матеріальній, так і духовній сферах, включаючи науку, культуру, мораль і світогляд.

Все це разом взяте і означається як філософія глобальних проблем, які не мали прямих аналогів у минулому.

Розглядаючи протиріччя процесу глобалізації, для початку розглянемо матерію із якої будується новий “монолітний” глобалізований світ. Матерія – це понад 210 країн з населенням більше шести мільярдів осіб. Різниця у рівні розвитку держав нерідко складає цілі історичні епохи.

Існує три групи країн. Перша – розвинуті держави з постіндустріальною економікою, які виступають в ролі “центра” світової економіки і являють собою так званий “золотий мільярд”.

Друга група з населенням чотири мільярди осіб формує “периферію” глобалізованої економіки. До неї входять країни з індустріальною економікою і ті, що встали на шлях індустріального розвитку.

Третя група держав з населенням близько одного мільярда осіб в силу край низького рівня розвитку економіки ще не вписалася у міжнародний розподіл праці.

Сам факт різноякісного рівня розвитку країн є постійним джерелом загострення протиріч між ними. Так було протягом віків. Нажаль, зараз вони ще більше загострюються. Причина знаходиться в самій основі сучасної моделі глобалізації. За її сценарієм, країни, що складають “периферію”, і країни третьої групи, які в недалекому майбутньому займуть місце в ньому, фактично повинні забезпечувати добробут “золотого мільярда”. Вони мають стати ринками збуту, постачальниками сировини, енергоносіїв, а також

дешевої робочої сили. Територія цих держав стає місцем зосередження, насамперед, “брудних” виробництв.

Враховуючи, що дві третини населення земної кулі проживає в країнах із слабо розвинутою або зовсім не розвинутою ринковою системою господарювання, що стримує розвиток глобалізації, широкого застосування набуває так званий метод “шокової терапії” – метод форсованого впровадження ринкових відносин. Тобто, за два – три десятиріччя ці країни мають подолати такий шлях, який в свій час пройшли розвинуті країни за два – три століття.

Глобальні суспільні трансформаційні процеси із застосуванням методу “шокової терапії” не тільки не сприяють покращенню якості життя населення цих країн, а навпаки – значно погіршують.

Ядро глобальної системи транснаціонального капіталу складає нині понад 500 найбільш великих із 40 тисяч транснаціональних корпорацій, які впровадилися в економіку понад 150 держав світу і мають понад 200 тисяч своїх філій. Вони контролюють більше половини світового промислового виробництва, близько 63 % зовнішньої торгівлі, до 80 % патентів і ліцензій на нову техніку, технології “ноу-хау”.

П'ять найбільших транснаціональних компаній ревізують понад половини світового виробництва товарів довгострокового використання, а також літаків, електронного обладнання, автомобілів.

Національні інтереси держав все більш стають у протиріччя як з інтересами транснаціональних компаній, так і самою глобалізацією. Феномен сучасної глобалізації складається з того, що вона науково не обгрунтована. В якості програми розвитку суспільства вона не будується на аналізі умов, що склалися, і не є результатом прогнозованих наукових досліджень.

Людська цивілізація зіткнулася з цілим рядом фундаментальних проблем і протиріч в економічній, соціальній, екологічній та інших сферах. Цей стан є кризовим і потребує розробки цілісної програми виходу з нього. На даний час увага народів і держав зосереджена на проблемах однобокої глобалізації, яка не тільки не сприяє виходу цивілізації із кризового стану, але і загострює його.

Світ зіткнувся не тільки з глобалізацією, а і з глобальною гегемонією корпоративного капіталу як єдиної економічної, соціальної, політичної і духовної сили, яка уособлена вузьким колом глобальних гравців. Її сьогоденний сценарій заснований на тотальному пануванні купівлі – продажу відносин і носить яскравий антигуманний характер.

Глобалізація складається із взаємопов'язаних процесів, в кожному з яких мають механізми саморегуляції. До них можна віднести.

Ідеологічну глобалізацію – оскільки глобалізація є процесом, який здійснюється, насамперед, у ринкових відносинах, то стрибок у глобальному розумінні світу вперше здійснила ліберальна теорія, яка наголосила пріоритет цінностей окремої особи над державними. Ліберальні цінності – свободи, рівноправність, власність – ще у вісімнадцятому столітті заявили про себе як всебічні та всевітні і стали основою для глобалізації.

Інституційну глобалізацію – для здійснення глобалізації, щоб у всьому світі дотримувались єдині правила ринкової гри і суспільної поведінки, що мають назву інститути. Тому паралельно з процесами економічної глобалізації іде глобалізація формальних (законів, нормативів) і неформальних (звичаї, традиції) інститутів.

Глобалізацію попиту і збуту - глобалізація формальних і неформальних інститутів, зокрема, призвела до визначеної стандартизації уявлень населення світу про бажані стандарти життя.

Глобалізацію ринків товарів і послуг – глобалізація ідеології, інститутів і споживання створює умови для глобалізації основних товарних ринків.

Фінансову глобалізацію. Глобалізація фінансів – це найбільш яскравий елемент всебічної глобалізації. Можливість миттєвого переміщення фінансових потоків по планетарним електронним системам кардинально змінили умови світогосподарської діяльності. На сьогодні щоденні міжбанківські операції становлять близько 1,5 трлн. дол. США порівняно з 0,6 трлн. дол. у 1987 році. Це означає, що за один тиждень цей обіг стає рівним ВВП Сполучених Штатів Америки, а обіг менший чим за місяць – всьому світовому порядку.

Глобалізацію накопичування та інвестування. Традиційними джерелами накопичень є збереження домашніх господарств, фонди накопичення підприємств і державних резервів. Банківська система, страхові компанії, пенсійні та інвестиційні фонди мобілізують ці джерела і інвестують їх за різними напрямками.

Першими ластівками появи на фоні глобальних перемін нового маловивченого феномену, який можна охарактеризувати як глобалізацію накопичення і виникнення на цій базі самостійного транснаціонального капіталу, були євродолари і євrorинки, які з'явилися ще у 60-і роки минулого століття.

Крім того, до складових елементів глобалізації можна віднести:

- глобалізацію робочої сили;
- глобалізацію наук і інвестицій;
- екологічну глобалізацію;
- глобалізацію виробничих процесів.

Глобалізація є невід'ємним елементом сучасної епохи, яка починає вступати в свої права. Швидкість цього процесу не залежить ні від волі окремих правителів або правлячих груп, ні навіть волі цілих націй і народів. Цей процес є наслідком сучасного етапу розвитку людської цивілізації.

Під впливом цих процесів побут життя окремих народів і цілих країн підлягає глобальним змінам. Принципи існування національних держав, які закладені в основу національних доктрин, вперше за всю світову історію підлягають не одночасним, а поступовим змінам.

Якщо у попередні епохи зміна національної ідеї і витікаючих з неї моделі національного устрою та побуту життя здійснювалася, насамперед, внаслідок катаклізмів, які носили штучний або соціальний характер, то зараз трансформація національних моделей здійснюється без видимого впливу зовнішніх обставин.

Характерно, що даний процес у рівному ступені торкається як розвинутих, так і слаборозвинутих держав. Це підтверджує універсальний і незалежний від волі конкретних осіб характер процесу глобалізації.

Науковий світ до цього часу ще не розробив цілісної науки про політику глобалізації, зовнішню політику і міжнародні відносини. Існують окремі дослідження у напрямі вивчення тих чи інших сегментів світової політики. При цьому, в кожному з цих напрямів використовується власний набір термінів.

Так, геостратегічний підхід використовує терміни “біполярність”, “багатополярність”, “центри сили”, “національна безпека”, “національні інтереси” в основі яких знаходиться сила. Геоекономічний підхід експлуатує терміни “інтеграція”, “глобалізація”, “інтернаціоналізація” тощо. В свою чергу ідеологічний або класовий аналіз пропонує інший набір термінів: демократія, диктатура, авторитаризм. Своім термінологічним апаратом володіє геополітика, цивілізовані, системні та інші підходи. При цьому нерідко одні і ті ж терміни в різних підходах можуть мати і різний зміст. Все це ускладнює здійснення комплексного аналізу сегментів світової політики.

Однак, у межах зазначених підходів спробуємо проаналізувати деякі закономірності, взаємопов'язані явища, що визначають динаміку розвитку міжнародних систем, використовуючи геоекономічний і геостратегічний підходи. Ці підходи є лише різновидністю структурного методу, тобто одним із багатьох методів аналізу міжнародних відносин.

Геоекономічна структура світу визначається економічними здобутками держав, які відображають економічний потенціал, що прийнято оцінювати через індикатор валового національного продукту / валового внутрішнього продукту (ВНП/ВВП).

Порівняльний аналіз цих потенціалів дозволяє виявити економічну могутність держави, яка може оцінюватись в якості полюса. В гео економічному просторі глобальний або регіональний полюс означає визначення суб'єкта, який відрізняється від інших суб'єктів перевагою своєї економічної могутності над економічним потенціалом наступної після неї держави, як мінімум у два рази.

Розрахунки на межі другого і третього тисячоліть свідчать, що у Латинській Америці регіональним полюсом є Бразилія з ВВП в 743 млрд. дол. США, яка випереджає наступну за нею Мексику (429 млрд.дол.) майже у два рази. В Африці полюсом є Південно-Африканська Республіка (133 млрд. дол.), за нею іде Нігерія (38 млрд. дол.). На Близькому і Середньому Сході таким полюсом можна вважати Туреччину (186 млрд. дол.), за нею Іран (111 млрд. дол.). В Східній Азії – це Японія (близько 4 трлн. дол.), за нею КНР (близько 1 трлн. дол.).

У Східній Європі полюсом є Росія (333 млрд. дол.), за нею Польща (153 млрд. дол.). В Західній Європі полюси взагалі відсутні, оскільки Німеччина з ВВП в 2,1 трлн. дол. недостатньо випереджує економічний потенціал Франції, ВВП якої 1,4 трлн. доларів.

Світовим або глобальним полюсом є США з ВВП понад 8,3 трлн. дол., в 2 рази випереджуючи наступну за нею Японію.

Слід зазначити, що пропорції практично не змінюватимуться і при перерахунку ВВП за паритетом купівельної спроможності – ПКС, за винятком Китаю. Крім того, ПКС в основному має відношення до порівняння внутрішньо-економічної ситуації країн, а не до міжнародних відносин.

Що стосується України, то її економічний потенціал (близько 40 млрд. дол.) навіть у рамках СНД не дозволяє формувати “полюс”, що відповідно не дає можливість претендувати не тільки на глобальність, а і на лідерство у рамках Європи і СНД.

Зазначений аналіз свідчить, що майже в кожному регіоні є свій “полюс”, але на глобальному рівні існує тільки один “полюс” і ним є США.

Геостратегічна структура міжнародних відносин визначається не через полюса, а через категорію “центра сили”. Центр сили – це суб'єкт, який має можливість підпорядкувати діяльність інших суб'єктів міжнародних відносин відповідно до власних національних інтересів.

В залежності від сфери розповсюдження такого контролю центр сили може бути локальним, регіональним або глобальним. Гегемонія – це сила, спрямована на підпорядкування всіх суб'єктів міжнародної політики на реалізацію інтересів гегемона.

Різниця між полюсом і центром сили полягає в тому, що перший суб'єкт – полюс не обов'язково діє в системі міжнародних відносин. Тобто, полюс

перетворюється у центр сили за умови проведення активної і агресивної зовнішньої політики, спрямованої на підпорядкування інших суб'єктів своїм внутрішнім і зовнішнім інтересам.

Перетворення суб'єкта – полюса в центр сили передбачає наявність зовнішньополітичного потенціалу (ЗПП), обсяг якого має перевищувати зовнішньополітичний потенціал суб'єкта – конкурента як мінімум у чотири рази. Це співвідношення і визначає закон “центра сили”.

ЗПП формується через сумарний ресурс, що витрачається на зовнішню політику. Цей ресурс складається із фінансових потоків, що передбачається у бюджеті країни, і реалізується через апарат зовнішньої політики. Складові ЗПП центра сили працюють на реалізацію усіх аспектів національних інтересів, але, обсяги ресурсів на кожному із основних напрямів зовнішньої політики визначає тип центра сили: економічний, політичний та воєнно-стратегічний.

Оскільки у сьогоdnішніх історичних умовах прямиий напад між ядерними державами практично виключений, в реальності цей потенціал визначає з одного боку - функцію стримування, а з іншого – здійснює вплив на типи і форми поведінки держави на світовій арені.

Поряд з цим неядерні компоненти воєнного потенціалу можуть використовуватися по відношенню до неядерних держав при захисті національних інтересів.

В системі міжнародних відносин найбільш активно використовується фінансування за напрямом “міжнародна діяльність”. Саме цей напрямок визначає глибину діяльності тієї чи іншої держави на міжнародній арені. При цьому, якщо економічний потенціал перетворюється у могутність – полюс при перевазі не менш як у два рази, то ЗПП перетворює полюс у глобальний центр сили при перевазі як мінімум у чотири рази.

Список літератури: 1. Всемирная энциклопедия: Философия / Гл. науч. ред и сост. А.А.Грицанов. – М.:АСТ, МН: Харвест, Современный литератор, 2001. – 1312 с. 2. Философия и глобальные проблемы / Российский обозревателный портал DISTANCE.RU. 3. Печчеи Аурелио. Человеческие качества. М.1980. 4. Философия глобальных проблем. К.Лоренц – А.Печчеи – П.Сорокин – Д.Белл М.1992. 5. Лабиринты одиночества. М.1980. 6. П.Сорокин. Моя философия интегрализм // Социс, 1992, № 10. 7. Национальная доктрина России / С.Евтушенко. 8. Стратегія національної безпеки України // Указ Президента України від 12 лютого 2007 року № 105. 9. Матеріали Міжнародного симпозиума “Економічне розвиток і стратегія планування в Східній Європі в контексті глобалізації: можливості і проблеми”, Харківський національний університет ім. Каразіна. 10. Е.Рашковський, В.Хорос. Мировые цивилизации и современность // Мировая экономика и международные отношения, 2001, № 12, с. 33-41.

Поступила в редакцію 15.05.2008

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИОННОГО РЕЗАНИЯ С УЧЕТОМ КИНЕТИКИ МЕХАНОХИМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В УСЛОВИЯХ КОНТАКТНОЙ ЗОНЫ ПРИ ТОЧЕНИИ

The procedure of definition of a latent period of evolution APE is developed at vibrating cutting. Frequencies of forced oscillations of a cutter at which are carried out criteria requirements for display APE is defined.

Применение высокопрочных труднообрабатываемых материалов для изготовления ответственных деталей ГТД и других энергомашин создает необходимость усовершенствования или разработки новых режущих инструментов и технологических процессов резания. Традиционно, исследователи и разработчики процессов резания идут по пути:

а) создания и применения новых, сверх высокопрочных режущих инструментальных материалов (алмазных, керамических и др.), механическая обработка которых еще более сложна;

б) разработки и применения специальных покрытий или методов упрочнения режущих материалов;

в) создания специальных СОТС, методов их активации и подачи в рабочую зону;

г) усовершенствования или создания новых более прогрессивных технологий резания с применением различного рода дополнительных воздействий, таких, например, как вибрационное, электрохимическое, электроискровое, тепловое (и др.).

При этом при выборе метода дополнительного воздействия создатели руководствуются чаще всего "здравым смыслом" и интуицией, а не глубоким изучением.

Наибольшего развития получили работы посвященные разработке и применению новых сверхтвердых режущих материалов. Это и понятно, поскольку считается, что повышение эффективности резания высокопрочных сплавов требует применения режущих материалов со значительно более высокими прочностными свойствами, нежели обрабатываемые материалы.

В работах [1,2] проведен анализ процессов и явлений, протекающих в контактной зоне при лезвийном резании, на основании которого сделан вывод о том, что при прочих равных условиях, уменьшения работы резания можно достигнуть за счет мероприятий, направленных на:

обеспечение в зоне резания условий для физических явлений, способствующих снижению прочностных свойств срезаемого материала;

организацию такой кинематики процесса резания, при которой максимально снижается вероятность возникновения сухого трения на передней и задней поверхностях режущего клина.

Одними из наиболее важных физических явлений, способствующих решению поставленной задачи, следует считать адсорбционно-пластифицирующий (АПЭ) [3], электронно-пластический (ЭПЭ) [4,5] и магнито-пластический эффекты (МПЭ) [6].

Механизм адсорбционного влияния поверхностно-активных веществ (ПАВ) технологической среды на физико-механические свойства деформируемого металла рассмотрен в работах [7,8]. Процесс развития АПЭ можно представить в виде цепочки следующих последовательно протекающих этапов [2]:

Первый этап сопровождается адсорбцией ПАВ среды на поверхности твердого тела, которое подвергается деформированию.

Второй этап - гетерогенная микропластификация, которая приводит к локальному увеличению плотности дислокаций в приповерхностной зоне и вызывает упрочнение приповерхностного слоя, что является уже *третьим этапом*, который условно заканчивается при достижении критической плотности искажений (прежде всего дислокаций). Дальнейшее деформирование металла в условиях адсорбционной среды приводит уже к зарождению микротрещин, развитие которых вызывает его квазихрупкое разрушение – *четвертый этап*. Причем, чем больше начальная "пластификация" материала, тем сильнее его последующее "охрупчивание".

В условиях процесса резания металлов скорость образования новой поверхности может быть соизмерима или превышать скорость адсорбционных процессов взаимодействия этих поверхностей с окружающей средой, поэтому степень проявления АПЭ во многом будет зависеть от соотношения скоростей механохимических реакций контактной зоны и образования ювенильной поверхности.

При традиционных методах лезвийного резания металлов (точение, фрезерование, сверление, протягивание, строгание) доступ среды непосредственно в контактную зону весьма затруднен, поэтому режущая поверхность инструмента постоянно взаимодействует с ювенильными участками вскрываемой поверхности обрабатываемого материала. Это приводит к адгезионному износу режущей поверхности инструмента и как следствие - ухудшению эффективности резания. Кроме того, могут не обеспечиваться условия для проявления АПЭ, поскольку скорость образования новой поверхности может превышать скорость адсорбционных процессов взаимодействия этих поверхностей с охлаждающей средой. Следовательно, степень проявления АПЭ во многом будет зависеть от соотношения скоростей механохимических реакций и образования ювенильной поверхности в контактной зоне.

Для повышения эффективности воздействия смазывающе-охлаждающей технологической среды (СОТС) на энергоемкость процесса стружкообразования при резании металлов за счет АПЭ необходимо обеспечить определенные кинематические условия для его проявления, как это было сделано в работе [9] для процессов шлифования, где были предложены два критерия:

1. Промежуток времени (Δt_p) между последовательным съемом стружки с одного и того же участка обрабатываемой поверхности не должен быть меньшим, чем латентный период Δt_x времени развития АПЭ, т.е.

$$Sr = Dt_p / Dt_x \geq 1. \quad (1)$$

2. Количество атомов (молекул) Ω_k среды, которая подводится в контактную зону к ювенильным участкам поверхности, должно быть достаточным для того, чтобы осуществилась полномасштабная адсорбция, и образовался адсорбционный слой с показателем $\theta = 1$. Аналитически этот критерий можно представить в виде

$$W_k / W_{ad} \geq P, \quad (2)$$

где Ω_{ad} – количество атомов (молекул) в адсорбционном слое, $P \gg 1$.

Суть этих критериев заключается в стремлении, во-первых, обеспечить условия для протекания полномасштабной адсорбции и проявления АПЭ, а во-вторых, максимально снизить вероятность трения режущей поверхности инструмента (в данном случае абразивных зерен) с ювенильными участками обрабатываемой поверхности. При лезвийном резании доступ СОТС в зону непосредственного контакта инструмента и детали весьма затруднен, поэтому полномасштабное проявление АПЭ при точении без применения специальных мероприятий, практически невозможно. Одним из таких мероприятий может быть организация кинематики в виде управляемо-прерывистого процесса. К таковым процессам относится вибрационное резание. Понятно, что частота вибраций при этом должна зависеть от латентного периода Δt_x развития АПЭ в условиях зоны лезвийного резания. Ранее было установлено что латентный период развития АПЭ при шлифовании лежит в пределах $\Delta t_x \sim 10^{-3} \dots 10^{-2}$ с. Можно ожидать, что при лезвийном резании эти значения будут такими же или близкими к ним, тогда частота вибраций должна находиться в пределах $f = 1/\Delta t_x \leq 10^3 \dots 10^2$ Гц.

Однако это предположение требует проверки, для проведения которой необходимо разработать методику определения значение Δt_x при лезвийном резании.

1. Разработка методики определения кинетики механохимических явлений в условиях контактной зоны при точении

Для описания механохимических реакций, протекающих в контактной зоне при точении, воспользуемся кинетической схемой Бутягина [10] и введем следующие допущения [8]:

1) стружкообразование обрабатываемого металла сопровождается

возникновением ювенильных участков поверхности, которая состоит из площади $S_{ю}$ поверхности раздела обрабатываемый металл - среда и площади $S_{я}$ поверхности полости ядер дислокаций, генерируемых при развитии пластических деформаций;

2) зарождение дислокации начинается с поверхности раздела – "твердое тело – среда" и сопровождается образованием элементарной ступеньки новой поверхности и цилиндрической поверхности полости ядра дислокации с радиусом r_0 , определяемым, например, по формуле

$$r_0 = \frac{\mu b^2}{8\pi^2 \gamma (1-\nu)} + \frac{Q_a^2}{2\pi^2 \gamma \cdot \epsilon_0 \cdot a^2}, \quad (3)$$

где μ – модуль сдвига, Па; b – вектор Бюргерса, м; γ – удельная поверхностная энергия твердого тела, Дж/м²; ν – коэффициент Пуассона; Q_a – суммарный заряд дислокации, Кл; $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ – электрическая постоянная, ф/м; a – период кристаллической решетки, м;

3) активные центры адсорбции локализованы на ювенильных участках поверхности;

4) скорость образования центров пропорциональна скорости образования площади $\mathcal{S}_{ю}$ ювенильной поверхности раздела обрабатываемый металл - среда и скорости образования площади $\mathcal{S}_{я}$ поверхности полых ядер дислокаций, при этом число центров на единице новой поверхности постоянно для данного твердого тела;

5) все центры энергетически равноценны, и процессы с их участием можно описать в рамках модели однородной поверхности;

6) элементарный акт адсорбции происходит при соударении молекулы газообразной среды с ювенильной поверхностью обрабатываемого металла, а число молекул, адсорбирующихся за единицу времени на единице поверхности, пропорционально числу соударений молекул среды с плоской поверхностью, которое согласно [11]:

$$n_{ад} = p / \sqrt{2\pi MkT}, \quad (4)$$

где p – давление газообразной среды, Па; M – масса молекулы, кг; T – температура, °С; $k = 1,38045 \cdot 10^{-23}$ – Постоянная Больцмана, Дж/К;

7) атомы, адсорбирующиеся на цилиндрической поверхности полых ядер генерируемых дислокаций, увлекаются с поверхности раздела твердое тело - среда в момент генерации (в основном винтовых) дислокаций, поэтому площадь потока адсорбции равна площади $S_{ю}$ ювенильной поверхности раздела обрабатываемый металл - среда;

8) процесс самопроизвольной гибели центров, характеризующийся временем их жизни τ_0 , отождествляется с релаксацией избыточной энергии вскрываемой ювенильной поверхности;

9) активные короткоживущие центры в вакууме гибнут самопроизвольно, а

в химически активных средах их гибель сопровождается взаимодействием с адсорбирующимися молекулами или атомами.

Для составления уравнения изменения количества центров адсорбции при стружкообразовании металлов используем теорию диссоциативной адсорбции, согласно которой плотность потока J молекул имеет вид

$$J = \alpha_x p / \sqrt{2\pi MkT} - \xi \theta^2 \cdot \exp(-Q/kT), \quad (5)$$

где α_x - вероятность химической реакции при соударении; χ - коэффициент пропорциональности; q - истинное (или текущее) значение степени покрытия поверхности адсорбирующимся веществом; Q - энергия активации процесса десорбции, Кал/моль.

Количество молекул среды $N_{ад}^{\&}(t)$, поступающее в единицу времени к ювенильным участкам поверхности, образуемым при стружкообразовании обрабатываемого металла в единицу времени, будет

$$N_{ад}^{\&}(\tau) = n_{ан} \cdot S_{ю} = \left[\alpha_x p / \sqrt{2\pi MkT} - \xi \theta^2 \cdot \exp(-Q/kT) \right] \cdot S_{ю} \quad (6)$$

Скорость образования центров адсорбции $N^{\&}(\tau)$ при тчении обрабатываемого металла с периодом кристаллической решетки, равным a , определим из соотношения

$$N^{\&}(\tau) = a^{-2} \left(\mathcal{S}_{ю} + \mathcal{S}_{я} \right) \quad (7)$$

Скорость самопроизвольной гибели центров адсорбции $N_{ан}^{\&}(t)$ можно выразить в виде

$$N_{ан}^{\&}(\tau) = \tau_0^{-1} (1 - \theta) \quad (8)$$

Будем считать, что процесс резания металла стационарный, т.е. величина скорости образования центров адсорбции постоянная. С учетом условий проявления АПЭ при тчении, интерес представляет интервал времени Dt_x , необходимый для образования адсорбционного монослоя на ювенильной поверхности, которая равна площади поверхности трения режущего клина с деталью. Этот интервал Dt_x определится из соотношения

$$\Delta \tau_x = \frac{N^{\&}(\tau) - N_{ан}^{\&}(\tau)}{N_{ад}^{\&}(\tau)} = \frac{a^{-2} \cdot \left(\mathcal{S}_{ю} + \mathcal{S}_{я} \right) - \tau_0^{-1} (1 - \theta)}{\left[\alpha_x p / \sqrt{2\pi MkT} - \xi \theta^2 \cdot \exp(-Q/kT) \right] \cdot \mathcal{S}_{ю}} \quad (9)$$

С учетом зависимостей (6) - (8) и после соответствующих преобразований, уравнение (9) может быть представлено в следующем виде

$$\Delta \tau_x = \frac{\tau_0 \left(1 + \mathcal{S}_{я} / \mathcal{S}_{ю} \right) - a^2 / \mathcal{S}_{ю} \cdot (1 - \theta)}{\left[\alpha_x p / \sqrt{2\pi MkT} - \xi \theta^2 \cdot \exp(-Q/kT) \right] \cdot a^2 \tau_0} \quad (10)$$

Для того чтобы можно было воспользоваться уравнением (10), необходимо выразить скорости образования поверхностей $\mathcal{S}_{ю}$ и $\mathcal{S}_{я}$ через значения режимных параметров.

В случае тчения часть передней и задней поверхности режущего клина инструмента находится в постоянном контакте с ювенильными участками вскрываемой при стружкообразовании обрабатываемой поверхности детали. Именно в эту зону непосредственного контакта среды очень затруднен, а точнее практически невозможен. Вследствие чего материал инструмента подвергается адгезионному износу. Чтобы снизить или даже исключить вероятность адгезионного износа и обеспечить условия для проявления АПЭ процесс резания должен быть прерывистым, т.е. на режущий инструмент (или деталь) необходимо наложить колебательное движение с некоторой амплитудой A_0 и частотой $f \sim 1/Dt_x$. Здесь Dt_x - промежуток времени необходимый для образования адсорбционного слоя (и проявления АПЭ) в зоне непосредственного контакта режущего клина с обрабатываемой поверхностью.

Для того чтобы выразить скорости образования поверхностей $\mathcal{S}_{ю}$ и $\mathcal{S}_{я}$ в формуле (10) через значения режимных параметров, воспользуемся расчетной схемой, изображенной на рис. 1. Кроме того, введем ряд допущений и ограничений.

1. Будем считать, что режущий инструмент совершает поступательное перемещение со скоростью поперечной подачи S в плоскости XY вдоль оси X вращения обрабатываемой детали и колебательное движение вдоль оси Z по закону

$$z = A_0 \sin wt, \quad (11)$$

где A_0 - амплитуда колебаний, м; $w = 2\pi \nu$ - круговая частота колебаний, ν - частота колебаний, Гц.

2. При снятии стружки передняя поверхность режущего клина непосредственно контактирует с ювенильной поверхностью снимаемой стружки на площади

$$S_n = K_1 L_n b, \quad (12)$$

где L_n и b - длина и ширина зоны контакта. Кроме того, задняя поверхность режущего клина также контактирует с ювенильной поверхностью, вскрываемой на обрабатываемой детали на участке площадью

$$S_3 = K_2 L_3 b, \quad (13)$$

где L_3 - длина зоны контакта, K_1 и K_2 - коэффициенты, зависящие от геометрических параметров режущего клина, свойств обрабатываемого материала и режимов обработки.

3. В соответствии с [12] скорость резания V_d должна удовлетворять

условию

$$V_d \leq 2\pi \cdot A_0 \cdot f / 3 \quad (14)$$

С учетом этого промежутка времени Dt_n в течение, которого нет контакта между деталью и инструментом с учетом (11) - (14) определится из соотношения

$$\Delta\tau_n = 3/2\pi \cdot f \cdot \text{Sin}(2\pi f \cdot \Delta\tau_n + \pi/2) \quad (15)$$

4. Будем считать, что в течение промежутка времени Dt_n в "контактную" зону поступает технологическая среда, и происходят адсорбционные явления, которые приводят к образованию на обрабатываемой поверхности хемосорбционного слоя со степенью покрытия Q , значение которого (при прочих равных условиях) зависит от Dt_n и не превышает 1. Будем также считать, что на этапе резания образовавшийся хемосорбционный слой способствует проявлению АПЭ по уже описанному механизму.

Исходя из вышеизложенного промежутка времени Dt_p , в течение которого происходит элементарный акт стружкообразования, определится из соотношения

$$\Delta\tau_p = 1/f - \Delta\tau_n. \quad (16)$$

Площадь $S_{ю}$ ювенильной поверхности, вскрываемой при стружкообразовании, может быть определена из соотношения

$$S_{ю} = 2(b+a) \cdot V_p \cdot \Delta\tau_p, \quad (17)$$

где V_p – скорость резания, м/с; b и a – ширина и толщина стружки соответственно, м.

Ширину и толщину стружки (или среза) можно определить из соотношений

$$b = t / \text{Sin}\varphi, \quad (18)$$

$$a = S \cdot \text{Cos}\varphi, \quad (19)$$

где t – глубина резания, м; S – продольная подача, м/с; φ – передний угол; φ_1 – задний угол резания.

Тогда, с учетом (18) и (19) зависимость (17) примет следующий вид

$$S_{ю} = 2(t + S \cdot \text{tg}j) \cdot V_p \cdot \Delta\tau_p / \text{Sin}j. \quad (20)$$

В связи с тем, что процесс виброрезания носит прерывистый характер, то процесс образования ювенильной поверхности будем рассматривать в течение промежутка времени Dt_p – время элементарного акта стружкообразования.

Для определения поверхности $S_{я}$ полости ядер дислокаций, которые зарождаются при резании в контактной зоне, введем следующие упрощающие допущения.

1. В снимаемой стружке формируется равномерно распределенная по объему дислокационная структура с предельной плотностью дислокаций Γ_m , шт.·м⁻²;

2. При снятии стружки в поверхностной зоне обрабатываемого материала формируется дислокационная структура с плотностью дислокаций, распределенной на глубину поверхностного слоя h по некоторому закону $\Gamma(r)$ от максимального значения Γ_m при $r=R$ до исходного Γ_0 при $r=R-h$.

3. Средняя длина \bar{l} дислокаций обратно пропорциональна корню квадратному из плотности дислокаций, т.е.

$$\bar{l} = 1 / \sqrt{\rho(r)}. \quad (21)$$

С учетом этих предположений площадь поверхности полости ядер дислокаций $S_{я}$, генерируемых при стружкообразовании, может быть определена как сумма площади $(S_{я})_{стр}$ поверхности в дислокациях, генерируемых в снимаемой стружке и площади $(S_{я})_д$ поверхности в дислокациях, генерируемых в поверхностном слое, формирующемся под обрабатываемой поверхностью детали. Площадь поверхности полости ядер дислокаций $(S_{я})_{стр}$, генерируемых в снимаемой стружке за промежуток времени Dt_p может быть определена из соотношения

$$(S_{я})_{стр} = 2\pi \cdot r_0 \cdot S \cdot \text{tg}j \cdot \left(t - \frac{S}{2 \cdot (1 + \text{tg}j \cdot \text{tg}j_1)} \right) V_p \cdot (\rho_m - \rho_0) \cdot \Delta\tau_p. \quad (22)$$

Площадь поверхности полости ядер дислокаций, генерируемых в формирующемся на детали поверхностном слое, определяется из выражения

$$(S_{я})_д = 2\pi \cdot r_0 \cdot \Delta\psi \int_{R-h}^R \rho(x) x \cdot dx = 2\pi \cdot r_0 \cdot \left(\frac{2\pi \cdot A_0}{R} f + \omega_d \right) \cdot \Delta\tau_p \cdot \int_{R-h}^R \rho(x) dx \quad (23)$$

где $\Delta\psi = ((2\pi \cdot A_0 / R) f + \omega_d) \cdot \Delta\tau_p$ – угол поворота детали за время $\Delta\tau_p$ элементарного акта резания, R – радиус обрабатываемой поверхности, м.

В соответствии с [13] изменение плотности генерируемых при резании дислокаций по глубине поверхностного слоя обрабатываемого изделия может быть описано уравнением

$$\rho(r) = (\rho_m - \rho_0) \cdot \left(1 - \frac{x}{h} \right)^\chi + \rho_0. \quad (24)$$

После подстановки уравнения в уравнение (23), интегрирования и соответствующих преобразований получим

$$(S_{\text{я}})_{\text{д}} = 2\pi r_0 \cdot h \cdot \left(\frac{2\pi \cdot A_0}{R} f + \omega_{\text{д}} \right) \cdot \Delta\tau_p \cdot (\rho_m - \rho_0) \left[\frac{1}{\psi(\rho)} + \left(\frac{1}{\chi + 1} \right) \right] \quad (25)$$

где $\psi(\rho) = \Delta\rho/\rho_0 = (\rho_m - \rho_0)/\rho_0$ - степень изменения плотности дислокаций

Общая площадь поверхности полости ядер $S_{\text{я}}$, генерируемых в стружке и в поверхностном слое обрабатываемой детали, с учетом (20) и (23) и соответствующих преобразований, будет

$$S_{\text{я}} = 2\pi r_0 \cdot (\rho_m - \rho_0) \cdot \Delta\tau_p \left[S \cdot V_p \cdot tgj \cdot \left(t - \frac{S}{2(1+tgj \cdot tgj_1)} \right) + \left(\frac{2\pi \cdot A_0}{R} f + \omega_{\text{д}} \right) \right] \quad (26)$$

Теперь, с учетом (20) - (26), уравнение (10) преобразуется к виду:

$$\Delta\tau_x = \frac{\tau_0 \left(1 + \frac{2\pi r_0 \cdot (\rho_m - \rho_0) \cdot \left[S \cdot V_p \cdot tgj \cdot \left(t - \frac{S}{2(1+tgj \cdot tgj_1)} \right) + (2\pi f \cdot A_0 / R + \omega_{\text{д}}) \cdot \left[\psi^{-1}(\rho) + (\chi + 1)^{-1} \right] \cdot h \right]}{2(1+S \cdot tgj) / \text{Sin}j \cdot V_p} \right) \cdot \frac{a^2(1-\theta)}{2(1+S \cdot tgj) / \text{Sin}j \cdot V_p}}{\left[\frac{a \cdot p}{\sqrt{2\pi MKT}} - \xi \theta^2 \cdot \exp\left(-\frac{Q}{KT}\right) \right] \cdot a^2 \tau_0} \quad (27)$$

Воспользовавшись уравнением (27) оценим возможные значения $\Delta\tau_x$ при круглом врезном шлифовании изделия из стали диаметром $d=0,06$ м при следующих (рекомендуемых [84, 85]) режимах шлифования. Скорость шлифования $V_k=35$ м/с; линейная скорость кругового вращения детали $V_d=0,65$ м/с; радиальная подача на врезание $S_n=2 \cdot 10^{-5}$ м/с; абразивный круг ПП 600x40x305 24A40НСМ15К1.

Поскольку с точки зрения шлифования нас больше всего интересует минимальное значение Dt_x , то пренебрежем десорбцией и рассмотрим вариант, когда $q>0$, а $a=1$. Будем считать, что в контактной зоне осуществляется охлаждение парами воды $M(\text{H}_2\text{O})=2,99 \cdot 10^{-26}$ кг при давлении $p=101325$ Па. Средняя температура контактной зоны $T>400\text{K}$. Для расчета примем следующие значения параметров: радиус округления режущего выступа абразивного зерна $r=2 \cdot 10^{-5}$ м; средняя начальная плотность дислокаций $\Gamma_0=2,71 \cdot 10^{15}$ шт./м², а максимальная - $\Gamma_m=7,9 \cdot 10^{18}$ шт./м²; $c=1,45$; $a=1,0$; $t_0=10^{-3}$ с [111]. Длину дуги контакта определяем по формуле (1.10) $L_k>1,24 \cdot 10^{-3}$ м. Плотность режущих зерен на рабочей поверхности абразивного круга можно определить по формуле (1.6) $n_p>52847,1$ шт./м². Среднее расстояние между режущими абразивными зёрнами $l_p>n_p^{-2} = 4,35 \cdot 10^{-3}$ м. Энергия активации десорбции хемосорбированных молекул среды [99] $Q=570$ кДж/моль. Постоянная Больцмана $k=1,38045 \cdot 10^{-23}$ Дж/К. Радиус цилиндрической полости ядра дислокации выбираем равным (см. таблицу 2.1) $r_0>25 \cdot 10^{-10}$ м.

Проведенные по формуле (27) оценки показали, что $\Delta\tau_x \cong (0,9...2,1) \cdot 10^{-3}$ с. Таким образом, для обеспечения условий для проявления АПЭ при точении труднообрабатываемых материалов необходимо чтобы процесс был

прерывчатым с обеспечением условия $\Delta\tau_p \geq (0,9...2,1) \cdot 10^{-3}$ с. С учетом зависимостей (14) - (16) частоту вибраций f можем определить решив уравнение

$$f = \frac{2\pi - 3}{2\pi \cdot \Delta\tau_p} \cdot \text{Cos}(2\pi f \cdot \Delta\tau_p) \quad (28)$$

Оценки, проведенные по формуле (28) показали, что при изменении $\Delta\tau_p$ в вышеуказанном диапазоне ($0,9 \cdot 10^{-3}$ до $2,1 \cdot 10^{-3}$ с) частота накладываемых на резец колебаний, при которых выполняются критериальные условия для проявления АПЭ, должна лежать в диапазоне от 100 Гц до 2 кГц.

Выводы:

1. Получена формула для определения латентного периода Dt_x развития АПЭ в условиях вибрационного точения металлов с учетом режимных параметров резания и свойств обрабатываемого материала (распределение плотности дислокаций по глубине формируемого при резании поверхностного слоя).

2. Установлено, что диапазон частот принудительных колебаний, которые должны накладываться на резец при вибрационном резании и обеспечивать выполнение критериальных условий для проявления АПЭ лежит в диапазоне от 100 Гц до 2 кГц.

Список литературы: 1. Сурду Н.В. Физические основы повышения эффективности процессов лезвийной обработки труднообрабатываемых металлов и сплавов// Резание и инструмент в технологических системах: Международный научно-технический сборник. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. – Вып.73. – С.296-305. 2. Сурду Н. В., Тарелин А. А., Романов В. В., Фистик А. Г. Пути повышения эффективности процессов резания труднообрабатываемых материалов//Восточно-европейский журнал передовых технологий.- Вып.№6/1 (30).-2007.- с. 9-17. 3. Ребиндер П. А. Поверхностные явления в дисперсионных системах: Избр. тр. //Физико-химическая механика. – М.: Наука, 1979. – 381 с. 4. Спицин В.И., Троицкий О.А. Электропластическая деформация металлов.– М.: Наука.- 1985.- 160 с. 5. Зуев Л.Б. Электрические поля и пластичность кристаллов.// Соросовский образовательный журнал. – №9, 1998. – С. 92-95. 6. Головин Ю.М.. Магнитопластичность твердых тел (Обзор)// ФТТ.- 2004.- Т. 46.- Вып. 5.- С.769-803. 7. Сурду Н.В. Микромеханизм влияния сред на пластическое деформирование и разрушение металлов. Часть 1. О наличии полости вдоль оси дислокации//Вопросы проектирования и производства летательных аппаратов. – Харьков: НАКУ "ХАИ", 2000. – Вып. 23 (6).– С.116-123. 8. Сурду Н. В. Микромеханизм влияния сред на пластическое деформирование и разрушение металлов. Часть 2. Модель микромеханизма // Вопросы проектирования и производства летательных аппаратов. – Харьков: НАКУ "ХАИ", 2001. –Вып. 24 (1) . – С.139-147. 9. Сурду Н.В. Адсорбционное влияние сред при шлифовании металлов // Пробл. Машиностроения. – 1999. – Т2. – №1-2. – с.106-113. 10. Бутягин П.Ю. Разупрочнение структуры и механохимические реакции в твердых телах АН СССР // Усп. химии. – 1984. – ЛШ, вып. 11. – С.1769-1790. 11. Чеботин В.Н. Физическая химия твердого тела. – М.: Химия, 1982. – 320 с., ил. 12. Кумабэ Д. Вибрационное резание. Перевод с яп. С.Л. Масленникова /Под ред. И.И. Порт нова, В.В. Белова. – Машиностроение, 1985. – 424 с. 13. Якубов Ф.Я. Энергетические соотношения процесса механической обработки материалов. – Ташкент: "Фан", 1985. – 104 с.

Поступила в редколлегию 15.05.2008

В.Б. ТАРЕЛЬНИК, Г.А. БАКАЙ, В.С. МАРЦИНКОВСКИЙ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕХОДНОГО СЛОЯ ИЗ МЕДИ НА ПРОЧНОСТЬ СОЕДИНЕНИЯ СТАЛЬНОЙ ПОДЛОЖКИ И ОЛОВА

In article the technique and results of theoretical researches of influence of a transitive layer from copper on durability of its connection with a steel substrate from tin is resulted.

Большинство ответственных деталей и узлов центробежных компрессоров, насосов, турбин и других машин работают при высоких скоростях, нагрузках и температурах, а также в условиях коррозионного, абразивного и других видов воздействия рабочих сред.

Решение проблемы, связанной с увеличением сроков службы машин, напрямую зависит от повышения износостойкости и надежности узлов трения. При большом разнообразии условий работы деталей наиболее нагруженным у них является поверхностный слой. Поэтому реальный ресурс работы машины напрямую зависит от несущей способности поверхностей деталей, которая определяется качеством их поверхностного слоя.

Таким образом, создание поверхностных слоев с особыми свойствами для узлов трения скольжения, в данном случае подшипников скольжения (ПС), является актуальной задачей.

В значительной мере надежность ПС, при прочих равных условиях, зависит от качества его изготовления, а также проведения монтажных и ремонтных работ, выполнения всех требований конструкторской и технологической документации.

Как правило, перед заливкой баббитов поверхность стального вкладыша подшипника (ВП) подвергается лужению. При этом на площадках фактического контакта поверхностей действуют силы молекулярного притяжения, которые проявляются на расстояниях в десятки раз превышающих межатомные в кристаллических решетках, и увеличиваются с повышением температуры. Переходной слой, обуславливающий прочную металлическую связь, при этом отсутствует, что отрицательно влияет на качество заливки баббита, теплопроводность и работоспособность подшипника в целом.

На основании анализа технологии изготовления ВП, изучения условий их работы и причин выхода из строя нами предлагается на стальную подложку перед лужением оловом наносить промежуточный слой из меди. Это обеспечит более прочное сцепление стальной подложки с баббитом, а также более интенсивный отвод тепла из зоны трения.

Существует большое количество различных методов нанесения покрытий из мягких металлов на стальные изделия (гальванический способ, металлизация напылением и др.). Сравнение их достоинств и недостатков позволило обоснованно выделить как наиболее перспективный метод электроэрозионного легирования (ЭЭЛ), обеспечивающий прочное сцепление нанесенного металла с подложкой, что является определяющим в выборе данной технологии. Кроме того, такой недостаток ЭЭЛ, как повышение шероховатости поверхности, применительно к данной технологии будет выступать как достоинство.

Энергия связи атомов металла обусловлена сдвигом энергетических уровней валентных электронов кристалла в сторону уменьшения энергии по сравнению с энергией валентных электронов свободных атомов [1].

Если принять энергию электрона на поверхности кристалла $E_s = 0$, то можно представить схему энергии связи в металле посредством указания энергетических уровней электронов (рис. 1), где E_s – нулевая энергия электрона; $E_{свб. атом.}$ – энергия основного состояния валентного электрона в свободном атоме (энергия ионизации атома); E_m – средняя трансляционная энергия электрона в металле; E_f – уровень Ферми; E_a – наименьшее состояние валентного электрона при $\vec{k} = 0$, где \vec{k} – волновой вектор, абсолютная

величина $k = \frac{2pp}{h}$, где p – импульс частицы, h – постоянная Планка.

Учитывая данные обозначения на рис. 1 можно записать выражение для энергии связи на один атом [2].

$$E_{\frac{связи}{атом}} = E_{свб. атом.} - E_a + E_m \quad (1)$$

Состояние электронов обозначается энергией E свб. атом., когда атомы находятся на больших расстояниях (парообразное состояние) и взаимодействие между электронами атомов металла равно нулю.

При образовании кристаллов металла атомы сближаются, и электроны вследствие взаимодействия образуют энергетические полосы шириной $E_f - E_a$. Образование энергетических полос обусловлено принципом Паули, который запрещает двум электронам (точнее частицам), подчиняющимся статистике Ферми-Дирака, находиться на одном энергетическом уровне.

Таким образом, энергия связи в кристаллическом металле есть энергия, которую нужно затратить, чтобы перевести все электроны с полосы энергии $E_f - E_a$ на энергетические уровни, которые они занимали до образования кристаллов металла, т. е. на $E_{свб. атом.}$.

Чтобы проанализировать энергию связи атомов в переходе металл-металл, возникающую в соединениях Fe - Sn и Fe - Cu - Sn, полученных

сплавлением, ЭЭЛ и другими способами, необходимо для удобства получить схемы энергетических уровней данных металлов.

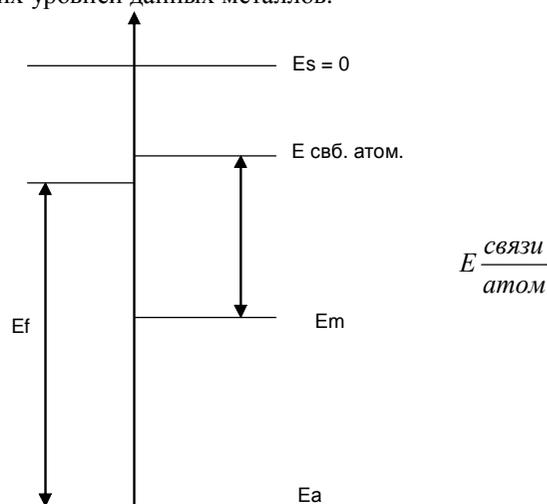


Рис. 1 – Расположение энергетических уровней электронов в металле

Энергия атома металла в свободном состоянии определяется энергией ионизации атома [3], т. е. $E_{свб. атом.} = E_i$.

Ионизационные потенциалы определены для всех химических элементов и приводятся в электрон-вольтах (эВ). Так для Fe, Cu и Sn находим из [4]:

$$E_i(\text{Fe}) = 7,83 \text{ эВ};$$

$$E_i(\text{Cu}) = 7,72 \text{ эВ};$$

$$E_i(\text{Sn}) = 7,30 \text{ эВ}.$$

Чтобы проанализировать изменение энергии связи между атомами в переходах металл-металл, образованных металлами Fe - Sn и Fe - Cu - Sn, располагая энергией ионизации атомов, необходимо также вычислить среднюю трансляционную энергию E_m , которую можно определить вычислив энергию Ферми E_f .

Для химических элементов энергию Ферми вычисляем из соотношения [3]:

$$E_f = \frac{\hbar^2}{2m_e} \sqrt[3]{(3\hbar^2)^2} \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{N}{V}\right)^2}, \quad (2)$$

где \hbar - постоянная Планка, m_e - масса покоя электрона, $\frac{N}{V}$ - концентрация свободных электронов в кристаллическом металле.

Концентрация электронов $\frac{N}{V}$ определяется произведением валентности металла на число атомов в 1 см^3 [3,5].

Концентрация электронов для Fe, Cu, Sn приведена в [3] и равна:

$$\frac{N}{V}(\text{Fe}) = 17,0 \cdot 10^{22} \text{ 1/см}^3;$$

$$\frac{N}{V}(\text{Cu}) = 8,45 \cdot 10^{22} \text{ 1/см}^3;$$

$$\frac{N}{V}(\text{Sn}) = 14,48 \cdot 10^{22} \text{ 1/см}^3.$$

Энергия Ферми для химических элементов Fe, Cu, Sn приведена в [3, 5] и равна:

$$E_f(\text{Fe}) = 11,16733 \text{ эВ};$$

$$E_f(\text{Cu}) = 7,00 \text{ эВ};$$

$$E_f(\text{Sn}) = 10,03 \text{ эВ}.$$

В изолированном состоянии (при отсутствии контакта металлов) электронный газ металлов характеризуется работой выхода W , которая для Fe, Cu, Sn, соответственно равна [5]:

$$W(\text{Fe}) = 4,31 \text{ эВ};$$

$$W(\text{Cu}) = 4,4 \text{ эВ};$$

$$W(\text{Sn}) = 4,38 \text{ эВ}.$$

Работа выхода - это энергия, необходимая для удаления электрона с уровня Ферми, расположенного в потенциальной яме металла в точку, расположенную снаружи металла вблизи его поверхности, т. е.

$$W = -E_f. \quad (3)$$

При соединении металлов: Fe с работой выхода $W(\text{Fe})$ и Sn с работой выхода $W(\text{Sn})$ таким образом, что электроны могут переходить от одного из них к другому, после установления равновесия электронный газ должен иметь общий химический потенциал. В металлах зависимость между энергией Ферми и химическим потенциалом выражается соотношением [5]:

$$\mu = \left[1 - \frac{1}{3} \left(\frac{\pi K_B T}{2E_f} \right)^2 \right], \quad (4)$$

где μ - химический потенциал; T - абсолютная температура; K_B - постоянная Больцмана. При комнатных температурах можно принимать $\mu = E_f$.

Выравнивание энергетических уровней Ферми происходит следующим образом. Электрон, находясь на более высоком энергетическом уровне Fe,

переходя на более низкий уровень Sn, переносит отрицательный заряд. Следовательно, Sn приобретает электрон, заряжается отрицательно, а Fe, теряя электрон, заряжается положительно. При переходе следующего электрона с Fe на Sn на электрон действует отталкивающая сила, так как металл Sn заряжен отрицательно. Преодолевая отталкивающую силу, электрон переходит из металла Fe на свободный уровень в металле Sn, увеличивая потенциальную энергию в Sn на eV эВ, где e – заряд электрона; V – разность потенциалов на расстоянии d , где образовалось электрическое поле \vec{E} , вызванное нескомпенсированным зарядом.

Если обозначить расстояние d , на котором падает напряжение V , то при прохождении этого расстояния электроном, приобретенная кинетическая энергия, превращаясь в потенциальную энергию, увеличивает потенциальную энергию в металле Sn на eV , что можно увидеть из приведенного вычисления:

$$A = e \int_0^d \vec{E} d\vec{r} = e \int_0^d \frac{V}{d} dr = \frac{eV}{d} r \Big|_0^d = \frac{eV}{d} d = eV, \quad (5)$$

где A – работа по перемещению электрона.

Таким образом, все энергетические уровни металла Sn поднимаются на eV эВ. Аналогично, электроны, проходя расстояние d , где действует положительный заряд, в металле Fe ускоряются, уменьшая потенциальную энергию.

Когда уровни Ферми железа, опускаясь вниз, а уровни Ферми олова, поднимаясь вверх, оказываются на одном энергетическом уровне, то в переходе металл Fe – Sn устанавливается равновесие.

При этом контактная разность потенциалов равна [2]:

$$V_K = \frac{1}{e} [W(Sn) - W(Fe)] = V_1 - V_2, \quad (6)$$

где V_K – разность потенциалов; V_1 и V_2 – потенциалы, соответственно Sn и Fe.

Выравнивание энергетических уровней Ферми выражается соотношением:

$$E_f(Fe) = E_f(Sn), \quad (7)$$

а, из соотношения (2) следует, что энергия Ферми зависит от плотности электронов в металлах. Поэтому плотность электронов в железе уменьшается после перехода их в олово, а в олове их плотность увеличивается.

Величина уменьшения энергии Ферми в железе, как и величина увеличения энергии Ферми в олове определяется соотношением:

$$\frac{W(Sn) - W(Fe)}{2} = \frac{eV_K}{2}. \quad (8)$$

Следовательно, уменьшенная энергия Ферми после установления термодинамического равновесия для железа определяется соотношением:

$$E_f'(Fe) = E_f(Fe) - \frac{W(Sn) - W(Fe)}{2}. \quad (9)$$

Увеличенная энергия Ферми для олова имеет вид:

$$E_f'(Sn) = E_f(Sn) + \frac{W(Sn) - W(Fe)}{2}. \quad (10)$$

Так как энергия Ферми зависит от плотности электронов (2), то вычислив по формуле (9) $E_f'(Fe)$, находим плотность электронов, переписав соотношение (2) в следующем виде:

$$\left(\frac{N}{V}\right) = 4,542291 \cdot 10^{21} \cdot \sqrt{[E_f'(Fe)]^2}, \quad (11)$$

где $\left(\frac{N}{V}\right)$ – плотность электронов в Fe после соединения.

Подставляя численное значение $E_f'(Fe)$ в (11) получим плотность электронов в железе после соединения:

$$\left(\frac{N}{V}\right)(Fe) = 1,687151 \cdot 10^{23} \text{ 1/см}^3.$$

Количество электронов, перешедшее из Fe в Sn, найдем, вычисляя разность между значениями плотности в Fe до соединения и значением плотности в Fe после соединения с Sn:

$$\Delta n = \frac{N}{V}(Fe) - \left(\frac{N}{V}\right)'(Fe) = 1,7 \times 10^{23} - 1,687151 \times 10^{23} = 7,996 \times 10^{20} \text{ 1/см}^3.$$

Уменьшение плотности электронов в Fe после соединения с Sn составляет около 0,5%.

Увеличение плотности в Sn после соединения с Fe равно

$$\left(\frac{N}{V}\right)'(Sn) = 14,48 \times 10^{22} + 7,996 \times 10^{20} = 1,455996 \times 10^{23} \text{ 1/см}^3.$$

Энергия Ферми, вычисленная по формулам (9) и (10) после установления термодинамического равновесия равна для металлов Fe и Sn соответственно:

$$E_f'(Fe) = E_f(Fe) - \frac{W(Sn) - W(Fe)}{2} = 11,16733 - \frac{4,38 - 4,31}{2} = 11,13233 \text{ эВ};$$

$$E_f'(Sn) = E_f(Sn) + \frac{W(Sn) - W(Fe)}{2} = 10,03 + \frac{4,38 - 4,31}{2} = 10,065 \text{ эВ}.$$

Располагая данными $E_f'(Fe)$ и $E_f'(Sn)$, вычислим среднее значение кинетической трансляционной энергии для железа и олова, которое согласно [2] определяется по соотношению:

$$E_{f,m} = \frac{3}{5} E_f \quad (12)$$

Тогда:

$$E_{f,m}(Fe) = \frac{3}{5} E_f(Fe) = 6,679398 \text{ эВ};$$

$$E_{f,m}(Sn) = \frac{3}{5} E_f(Sn) = 6,039 \text{ эВ}.$$

Используя соотношение (12), вычисляем трансляционную кинетическую энергию электронов в Fe и Sn до соединения, которая соответственно равна:

$$E_{f,m}(Fe) = 0,6 \times 11,16733 = 6,700398 \text{ эВ}.$$

$$E_{f,m}(Sn) = 0,6 \times 10,03 = 6,018 \text{ эВ}.$$

Чтобы проанализировать уменьшение энергии связи Sn при соединении с Fe, необходимо подставить в уравнение (1) значения $E_{f,m}(Sn)$ и $E_{\text{связи}}^{\text{атом}}$, после чего получим уравнение для энергии связи в Sn до соединения с Fe.

Значения энергии связи для химических элементов Fe, Cu, Sn, согласно [3], соответственно равны:

$$E_{\text{связи}}^{\text{атом}}(Fe) = 4,29 \text{ эВ};$$

$$E_{\text{связи}}^{\text{атом}}(Cu) = 3,50 \text{ эВ};$$

$$E_{\text{связи}}^{\text{атом}}(Sn) = 3,12 \text{ эВ}.$$

Уравнение связи (1) для Sn до соединения имеет вид:

$$3,12 = E_{\text{свб. атом.}} - E_a + 6,018. \quad (13)$$

Подставляя данные в уравнение (1) после соединения Sn с Fe, необходимо учесть, что после перетока электронов с Fe в Sn в олове появляется нескомпенсированный заряд (отрицательный), который равномерно поднимает все энергетические уровни вместе с уровнем Ферми на величину $\frac{W(Sn) - W(Fe)}{2} = 0,35 \text{ эВ}$.

Кроме того, вследствие увеличения плотности электронов увеличивается средняя кинетическая трансляционная энергия на величину

$$E_{f,m}(Sn) - E_{f,m}(Sn) = 6,039 - 6,018 = 0,021 \text{ эВ}.$$

Поэтому уравнение (1) после соединения Fe и Sn принимает вид:

$$E_{\text{связи}}^{\text{атом}} = E_{\text{свб. атом.}} - E_a + 0,021 + 6,018 + 0,035. \quad (14)$$

Переписывая уравнение (14) получим:

$$E_{\text{атом}}^{\text{связи}} = 3,12 - 0,056 = E_{\text{свб. атом.}} - E_a + 6,018. \quad (15)$$

Таким образом, энергия связи уменьшится и равна $E_{\text{атом}}^{\text{связи}} = 3,064 \text{ эВ}$.

Аналогично анализируем увеличение энергии связи для Fe после соединения с Sn, учитывая, что все энергетические уровни электронов, в том числе и уровень Ферми E_f , за счет уменьшения потенциальной энергии на $\frac{W(Sn) - W(Fe)}{2} = 0,35 \text{ эВ}$ и уменьшения кинетической трансляционной энергии на $6,700398 - 6,679398 = 0,021 \text{ эВ}$.

Анализируя, подобно анализу уравнений (14) и (15) заключаем, что энергия связи в переходе металл-металл в Fe увеличивается на 0,056 эВ и станет равной:

$$E_{\text{атом}}^{\text{связи}} = 4,29 + 0,056 = 4,346 \text{ эВ}.$$

Таким образом, энергия связи в слое Sn равна:

$$E_{\text{атом}}^{\text{связи}} = 3,12 + 0,016 = 3,136 \text{ эВ}.$$

Энергия связи в переходном слое Cu уменьшается на 0,016 эВ и равна:

$$E_{\text{атом}}^{\text{связи}} = 3,50 - 0,016 = 3,484 \text{ эВ}.$$

При соединении Fe – Cu за счет перетока электронов из Fe в Cu энергетический уровень Ферми поднимется за счет увеличения потенциальной энергии и равен, согласно (10):

$$E_f(Cu) = E_f(Cu) + \frac{W(Cu) - W(Fe)}{2} = 7,00 + \frac{4,4 - 4,31}{2} = 7,045 \text{ эВ}.$$

Средняя кинетическая трансляционная энергия в переходном слое Cu до и после соединения, согласно (12), равна:

$$E_{f,m}(Cu) = 0,6 \times 7,00 = 4,200 \text{ эВ};$$

$$E_{f,m}(Cu) = 0,6 \times 7,045 = 4,227 \text{ эВ}.$$

Следовательно, за счет увеличения кинетической трансляционной энергии происходит уменьшение энергии связи в Cu на $4,227 - 4,200 = 0,027 \text{ эВ}$.

Таким образом, энергия связи в Cu уменьшается на $0,027 + 0,045 = 0,072 \text{ эВ}$ и оказывается равной:

$$E_{\text{атом}}^{\text{связи}}(Cu) = 3,50 - 0,072 = 3,428 \text{ эВ},$$

а энергия связи в переходном слое железа увеличится на 0,072 эВ.

Тогда: $E \frac{\text{связи}}{\text{атом}}(Fe) = 4,29 + 0,072 = 4,362 \text{ эВ}$.

Если сравнить энергии связи на атом в химических элементах Fe, Cu и Sn, которые согласно [3] равны:

$$E \frac{\text{связи}}{\text{атом}}(Fe) = 4,29 \text{ эВ};$$

$$E \frac{\text{связи}}{\text{атом}}(Cu) = 3,50 \text{ эВ};$$

$$E \frac{\text{связи}}{\text{атом}}(Sn) = 3,12 \text{ эВ},$$

то наименьшая энергия связи на атом приходится на химический элемент Sn.

При соединении элементов Fe и Sn энергия связи в слое Sn уменьшится на 0,056 эВ и становится равной $E \frac{\text{связи}}{\text{атом}}(Sn) = 3,064 \text{ эВ}$.

При соединении элементов по схеме Fe - Cu - Sn энергия связи в элементе переходного слоя Sn увеличивается на 0,016 эВ и становится равной

$$E \frac{\text{связи}}{\text{атом}}(Sn) = 3,136 \text{ эВ}.$$

Следует отметить, что при этом уменьшится энергия связи в Cu на 0,016 эВ и станет равной $E \frac{\text{связи}}{\text{атом}}(Cu) = 3,484 \text{ эВ}$, но и после этого уменьшения энергия связи на атом в Cu заметно больше чем энергия связи в Sn.

Следовательно, если соединить элементы по схеме Fe - Cu - Sn, то энергия связи в Sn не уменьшается, а немного увеличивается, а если соединить по схеме Fe - Sn, то энергия связи в Sn уменьшается.

Таким образом, самое слабое звено системы соединения (Sn) при соединении металлов по схеме Fe - Sn приводит к снижению прочности Sn и упрочнению Fe, а при соединении по схеме Fe - Cu - Sn самое слабое звено Sn упрочняется.

Выводы

Теоретическими исследованиями установлено, что самое слабое звено системы соединения (Sn) при соединении металлов по схеме Fe - Sn приводит к снижению прочности Sn и упрочнению Fe, а при соединении по схеме Fe - Cu - Sn самое слабое звено Sn упрочняется.

Список литературы: 1. Гуляев А.П. Металловедение.- М.: Металлургия, 1986.- 544с. 2. Уэрт Ч., Томсон Р. Физика твердого тела. - М.: Мир, 1968.- 558 с. 3. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела.- М.: Наука, 1978.-790 с. 4. Борн М. Атомная физика. - М.: Мир, 1970.- 488 с. 5. Ашкрофт Н., Мермин Н. Физика твердого тела.- М.: Мир, 1979.- 399 с.

Поступила в редколлегию 15.05.2008

УДК621.757.001.57

А.Г. ЯСЕВ, К.Г. МЕЖЕННАЯ

ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ШЛИФОВАНИЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ВАЛОВ ГИДРОМАШИН НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

Two cases of grinding of billows of hydraulic machines are analyzed in the article; basic reliability indexes of this method are expected. The rational parameters of tuning of the technological system are certain.

В условиях реальных производственных процессов возникает необходимость рассмотреть в качестве объекта теории надежности метод механической обработки [1]. Повышение надежности процесса механической обработки с целью стабильного обеспечения заданной точности обрабатываемых деталей является актуальным вопросом, поскольку надежность определяет эффективность использования станков и автоматических линий и обуславливает показатели производительности и экономичности технологических процессов.

Целью данной статьи является применение аппарата показателей теории надежности при исследовании процесса шлифования валов гидромашин в условиях реальной технологической системы на предприятии-изготовителе, а также определение рациональных параметров настройки технологической системы для обеспечения заданного уровня точности обработки.

Исследование проведено для вала двигателя ДС0.02 (вал I) и вала насоса ДЦН80 (вал II).

Для вала I были собраны статистические данные операции шлифования поверхности $\varnothing 8f9 \left(\begin{smallmatrix} -0.013 \\ -0.049 \end{smallmatrix} \right)$, R_a 1,25 мкм, и установлено, что поле рассеивания выходит за пределы поля допуска (возможно возникновение брака на операции).

Таблица 1 – Параметры распределений полученных размеров при шлифовании валов

№ п/п	Закон распределения	Математическое ожидание a , мм	Среднеквадратическое отклонение σ , мкм	Ассиметрия α
Вал I	Нормальный	7,961	8,9698	-0,414
Вал II	t-распределение	17,90	1,9326	0,33

При исследовании шлифования поверхности $\varnothing 18g7 \left(\begin{smallmatrix} -0.006 \\ -0.018 \end{smallmatrix} \right)$, R_a 0,32 мкм вала II было установлено, что поле рассеивания находится в пределах поля допуска.

Для двух случаев определено, что закон рассеивания размеров близок к нормальному при уровне значимости 5% с параметрами представленными в таблице 1.

Предварительно был проведен анализ показателей надежности с применением в качестве объекта исследования метода механической обработки [1]. В результате установлен состав показателей, которые могут быть применены для оценки надежности метода обработки (в данном случае шлифования).

Основным показателем надежности является вероятность безотказной работы $P(t)$ за период наработки t . На практике для оценки можно воспользоваться показателем вероятности получения брака на данной операции q [2]:

$$P(t)=1-q, \quad (1)$$

$$q = 1 + F_z \left[-\frac{3(1+E)}{K} \right] - F_z \left[\frac{3(1-E)}{K} \right], \quad (2)$$

где $F_z \left[-\frac{3(1+E)}{K} \right]$, $F_z \left[\frac{3(1-E)}{K} \right]$ - значения интегралов, определяющих площади, ограниченные функцией плотности распределения $f(x)$ и абсциссами $D_0 \pm d$. Значения функции F_z табулированы в зависимости от величины аргумента [3];

K - коэффициент относительного рассеяния [2]:

$$K = \frac{6\sigma_x}{6\sigma}, \quad (3)$$

где σ_x - среднеквадратическое отклонение поля допуска;

σ - среднеквадратическое отклонение поля рассеивания размеров;

E - коэффициент настроенности процесса [2]:

$$E = \frac{m_x - \Delta_0}{3\sigma_x}, \quad (4)$$

где Δ_0 - положение середины поля допуска на выполняемый размер, для вала I $\Delta_0=7,969$ мм; для вала II $D_0=17,88$ мм.

Кроме вероятности безотказной работы рассчитаем также и другие показатели надежности.

Статистическую оценку средней наработки на отказ \hat{T} вычисляют по формуле [4]:

$$\hat{T} = \frac{t}{r(t)}, \quad (5)$$

где $r(t)$ - число отказов, фактически происшедших за суммарную наработку t . За суммарную наработку принимаем длительность межналадочного периода, которая для вала I составляет $t=6$ мин, для вала II $t=35$ мин. Количество отказов в первом случае $r(t)=6$, во втором случае существует резерв точности, поэтому $r(t)=-2$.

Статистическая оценка для интенсивности отказов $\hat{\lambda}(t)$ имеет вид [4]:

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{r(t + \Delta t) - r(t)}{N \cdot \Delta t}, \quad (6)$$

где Δt - время обработки одной детали. Для вала I $\Delta t=0,12$ мин, для вала II $\Delta t=0,7$ мин;

N - количество обработанных деталей за суммарную наработку, $N=50$ шт.

Статистическую оценку для параметра потока отказов $\hat{\mu}(t)$ определяют по формуле [4]:

$$\hat{\mu}(t) = \frac{r(t_1) - r(t_2)}{t_2 - t_1} \quad (7)$$

Поскольку наибольшая вероятность получения брака в начале и конце межналадочного периода, принимаем для вала I $t_1=0,36$ мин $t_2=6$ мин; для вала II $t_1=0,7$ мин $t_2=35$ мин.

Кроме единичных показателей рассчитаем также комплексные показатели надежности.

Коэффициент готовности рассчитывается по формуле [4]:

$$K_T = \frac{t}{t + t_{под}}, \quad (8)$$

где $t_{под}$ - время на подналадку станка, $t_{под}=2,5$ мин.

Коэффициент технического использования [4]:

$$K_{Т.И.} = \frac{\Delta t}{T_{ум}}, \quad (9)$$

где $T_{ум}$ - штучное время на операцию, для вала I $T_{ум}=3$ мин, для вала II $T_{ум}=3,5$ мин.

Расчет показателей надежности для двух случаев обработки приведен в таблице 2.

Таблица 2 – Расчет показателей надежности при шлифовании валов

№ п/п	Наименование показателя	Вал I	Вал II
1	Коэффициент относительного рассеяния K	0,669	1,035
2	Коэффициент настроенности процесса E	-0,44	0,33
3	Вероятность безотказной работы $P(t)$, %	95,54	102,57
4	Средняя наработка на отказ \hat{T} , мин	1	-17,5
5	Интенсивность отказов $\hat{\lambda}(t)$	0,1667	0,0286
6	Параметр потока отказов $\hat{\mu}(t)$	-0,5319	0,029
7	Коэффициент готовности K_T	0,7	0,93
8	Коэффициент технического использования $K_{Т.И.}$	0,04	0,2

Рассмотренные случаи иллюстрируют два типичных варианта выполнения операции. В первом случае существует вероятность

возникновения брака, во втором имеется резерв точности на обработку, который составляет 2,57%. Но в обоих случаях необходимо определить рациональные параметры настройки технологической системы, которые бы обеспечили стабильное получение заданного уровня точности обработки при сохранении высокого уровня производительности.

Для обработки важно установить два параметра – это настроечный размер и длительность межналадочного периода.

Определим значения этих параметров для случая обработки вала I. В рассматриваемом случае смещение уровня настройки описывается уравнением, адекватность которого была предварительно проверена:

$$m_x(t) = -0.4095 + 5.154 \cdot t \quad (10)$$

Было установлено, что в данном случае имеет место изменение уровня настройки при постоянном мгновенном рассеивании размеров $s_x(t) = s_0 = 2,3$ мкм.

Определим значение m_0^* , соответствующее рациональному начальному положению уровня настройки, при котором величина T будет наибольшей. По определению [2]:

$$m_{01} \leq m_0 \leq m_{02}, \quad (11)$$

где

$$\begin{aligned} m_{01} &= \Delta_0 - \delta + 3\sigma_0; \\ m_{02} &= \Delta_0 + \delta - 3\sigma_0. \end{aligned} \quad (12)$$

Непрерывная функция принимает наибольшее значение или в точках экстремума, или на концах интервала. Функция $T(m_0)$ может иметь экстремум только в точке $m_0 = m_{02}$ и равняется в этой точке нулю. Значит она принимает наибольшее значение на другом конце промежутка, в точке $m_0 = m_{01}$.

$$m_0 = 7,969 - 0,018 + 0,007 = 7,957 \text{ мм}$$

Изменение размеров обрабатываемых деталей с допуском $2d$ при заданном настроечном размере m_0 и мгновенном рассеивании размеров s_0 представлено на рис. 1, когда смещение уровня настройки во времени имеет линейную зависимость (10).

Ожидаемая размерная стойкость [5]:

$$T_{\max} = 2\delta \cdot ctg\alpha; \quad T_{\min} = (2\delta - m_0 - 3\sigma_0) \cdot ctg\alpha, \quad (13)$$

откуда среднее время работы станка между поднастройками

$$T_{cp} = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} = \left(2\delta - \frac{m_0}{2} - \frac{3\sigma_0}{2} \right) ctg\alpha \quad (14)$$

$$T_{cp} = (36 - 3,5 - 3,45) \cdot 0,194 = 5,63 \text{ мин} - \text{что составляет 46 деталей.}$$

Аналогично определим параметры настройки на операции шлифования при обработке вала II. Смещение уровня настройки описывается уравнением:

$$m_x(t) = 3.8 + 0.192 \cdot t \quad (15)$$

Изменение уровня настройки при постоянном мгновенном рассеивании размеров $s_x(t) = s_0 = 1$ мкм.

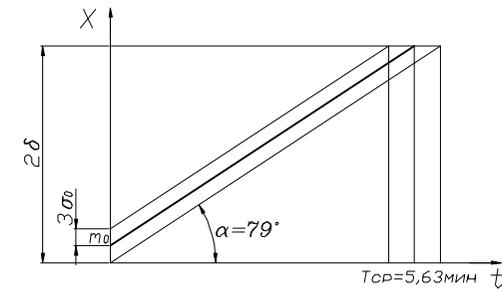


Рис. 1 – График для определения периодичности подналадок на операции шлифования вала I

Положение рационального начального уровня настройки

$$m_0 = 17,988 - 0,006 + 0,003 = 17,985$$

Среднее время работы станка между поднастройками

$$T_{cp} = (12 - 1,5 - 1,5) \cdot 5.2083 = 46,88 - \text{что составляет 66 деталей.}$$

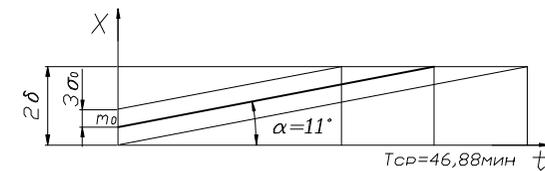


Рис. 2 – График для определения периодичности подналадок на операции шлифования вала II

Выводы.

1. В результате анализа показателей надежности установлено, что на практике имеются случаи нестабильного получения заданной точности обработки (обработка вала I), а на некоторых операциях обработка ведется с чрезмерно жесточенными параметрами (шлифование вала II).
2. С целью обеспечения стабильного получения заданного уровня точности обработки при сохранении высокого уровня производительности определены рациональные параметры настройки технологической системы.

Список литературы: 1. Ясев А.Г., Меженная К.Г. Методологические аспекты надежности методов механической обработки // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных трудов. – Выпуск 5 (52). – Днепропетровск, 2007. – С. 72-78. 2. Справочник технолога машиностроителя под ред. А.М. Дальского – М: Машиностроение, 2001. т.1 – 912с. 3. Маталин А.А. Технология машиностроения. – Л.: Машиностроение, 1985 – 496с. 4. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1989. 5. Ишуткин В.И. Технологическая надежность системы СПИД. – М., Машиностроение, 1973 – 128с.

СОДЕРЖАНИЕ

СПИЦЫН В.Е., БОЦУЛА А.Л., СОЛОМОНЮК Д.Н., ЧОБЕНКО В.Н. ВЫСОКОЭФФЕКТИВНАЯ ГАЗОТУРБИННАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ГПА.....	3
АННОПОЛЬСКАЯ И.Е., КОВАЛЬ В.А., РОМАНОВ В.В., ТАРЕЛИН А.А. МЕТОДОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОДНОВАЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ ГТЭ-45(60А)	7
ГОНЧАРОВ Г.А. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФИНАНСОВЫХ РАСЧЕТОВ В ВИРТУАЛЬНОЙ СРЕДЕ.....	19
СТРУТИНСКИЙ В.Б., ТИХЕНКО В.Н. ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ РАСТАЧИВАНИЯ ОТВЕРСТИЙ НА ОТДЕЛОЧНО-РАСТОЧНЫХ СТАНКАХ	27
КОВАЛЬ В.А., КОВАЛЕВА Е.А., РОМАНОВ В.В., СКВОРЦОВ А.В. УЧЕТ НЕОСЕСИММЕТРИЧНОСТИ ТЕЧЕНИЯ В ОСЕВЫХ ТУРБОМАШИНАХ	34
МОВШОВИЧ А.Я., МАНАЕНКОВ И.В., БУДЕННЫЙ М.М. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЙ ПНЕВМОУДАРНОЙ ШТАМПОВКОЙ.....	40
КОНОПЛЯНЧЕНКО Є.В., РАДЧУК О.В., ЯРЕМЕНКО В.П., КОЛОДНЕНКО В.М. НЕОБХІДНІСТЬ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОЇ РОБОТИ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ РОЗБИРАННЯ ВИРОБІВ ОПТИМІЗАЦІЄЮ ЧАСОВИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЛАНЦЮГІВ.....	44
МИХЕЕВ В.И. КОНСТРУКТИВНО - ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ СНИЖЕНИЕ МАССУ РКТ.....	50
КОТОВ А.С. АНАЛИЗ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАКТОРОВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ПЕРЕНАЛАЖИВАЕМОСТЬ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ЛИНИЙ, МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ В СЕРИЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ.....	54
ЛИТВИНЕНКО М.В. УЛУЧШЕНИЕ ОРГАНИЗАЦИОННЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ПЛАСТМАССОВЫХ СЦИНТИЛЛЯТОРОВ.....	59

МАРТЫНЕНКО Г.Ю.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ
ЖЕСТКОГО РОТОРА ТУРБОКОМПРЕССОРА В АКТИВНЫХ
МАГНИТНЫХ ПОДШИПНИКАХ

65

ПОСВЯТЕНКО Н.І.

ФОРМУВАННЯ ВЗАЄМОВПЛИВУ СКЛАДОВИХ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ
СИСТЕМИ В ОБРОБЦІ МАТЕРІАЛІВ РІЗАННЯМ
У XVIII–XXI СТОРІЧЧІ.....

75

РУСАНОВ А.В.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИПМаш НАН УКРАИНЫ
В ОБЛАСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
НЕСТАЦИОНАРНЫХ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В
ПРОТОЧНЫХ ЧАСТЯХ ТУРБОМАШИН.....

89

РИЖИХ В.М., ШВАДЧЕНКО В.О., КОРНІЄНКО О.В., ЮРЧЕНКО О.М.

УКРАЇНА ПЕРЕД ВИКЛИКАМИ СУЧАСНОСТІ
В КОНТЕКСТІ ГЛОБАЛІЗАЦІЇ

98

СУРДУ Н.В.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ
ВИБРАЦИОННОГО РЕЗАНИЯ С УЧЕТОМ КИНЕТИКИ
МЕХАНОХИМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В УСЛОВИЯХ
КОНТАКТНОЙ ЗОНЫ ПРИ ТОЧЕНИИ.....

107

ТАРЕЛЬНИК В.Б., БАКАЙ Г.А., МАРЦИНКОВСКИЙ В.С.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕХОДНОГО
СЛОЯ ИЗ МЕДИ НА ПРОЧНОСТЬ СОЕДИНЕНИЯ СТАЛЬНОЙ
ПОДЛОЖКИ И ОЛОВА

117

ЯСЕВ А.Г., МЕЖЕННАЯ К.Г.

ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ШЛИФОВАНИЯ
ПРЕЦИЗИОННЫХ ВАЛОВ ГИДРОМАШИН НА ОСНОВЕ
АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

126

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХП»

Збірник наукових праць

Тематичний випуск

Технології в машинобудуванні

Випуск № 34

Науковий редактор д-р техн. наук Тимофієв Ю.В.

Технічний редактор канд. техн. наук Фролов В.В.

Відповідальний за випуск канд. техн. наук Луньова В.М.

Обл. вид. № 142-08

Підп. до друку 12.08.2008 р. Формат 60×84 1/16 .

Папір Сору Рарег. Друк - ризографія. Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 9,0.

Облік. вид. арк 10,0. Наклад 300 прим. 1-й завод 1-100. Зам. №

Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ "ХПІ".

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 116 від 10.07.2000

61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21
