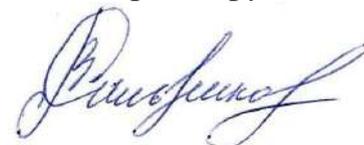


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО  
«ТУЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

*На правах рукописи*



САЛЬНИКОВ ВЛАДИМИР ВЛАДИМИРОВИЧ

**Информационно-измерительная и управляющая система энергетического  
мониторинга с идентификацией источников и причин нарушения режимов  
энергопотребления**

Специальность 2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы

Диссертация  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
кандидат технических наук  
Французова Юлия Вячеславовна

Тула – 2022 г.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА .....	14
1.1 Энергетический аспект оценки влияния ИИУС на обеспечение эффективности промышленных предприятий .....	14
1.2 Анализ существующих информационно-измерительных и управляющих систем энергетического мониторинга.....	19
1.3 Анализ моделей энергопотребления промышленных предприятий ...	26
1.4 Анализ возможностей интегрирования ИИУС ЭМ в информационные системы ПМП .....	30
Выводы по главе 1.....	33
ГЛАВА 2 ФОРМАЛИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ И УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА .....	34
2.1 Обоснование требований к ИИУС ЭМ ПМП.....	34
2.2. Формализация структуры ИИУС ЭМ ПМП.....	39
2.3. Математическая модель энергопотребления ТО ПМП.....	45
2.4 Алгоритм идентификации источников и причин нарушения штатных режимов энергопотребления.....	51
Выводы по главе 2.....	55
ГЛАВА 3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ И УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА СТРУКТУРНЫХ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ПМП .....	56
3.1 Модификация ИИУС ЭМ для структурных подразделений ПМП.....	56
3.2 Информационное обеспечение энергетического мониторинга технологического оборудования ПМП.....	62
3.3 Модуль анализа управляющих программ станков с ЧПУ .....	69

3.4. Имитационное моделирование ИИУС ЭМ ПМП .....	77
Выводы по главе 3 .....	84
<b>ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ И УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА .....</b>	<b>86</b>
4.1 Методика проведения экспериментальных исследований ИИУС ЭМ	86
4.2 Результаты экспериментальных исследований энергопотребления на участке МЦС .....	88
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	92
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	95
ПРИЛОЖЕНИЯ .....	111
Приложение А .....	111
Приложение Б .....	116
Приложение В .....	118
Приложение Г .....	120
Приложение Д .....	127
Приложение Е .....	128

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АИИС КУЭ – автоматизированная информационно-измерительная система коммерческого учета электроэнергии

АСКУЭ – автоматизированная система контроля и учета энергетических ресурсов

АСУП – автоматизированная система управления производством

АСУТП – автоматизированная система управления технологическими процессами

БИНЭ – блок идентификации источников и причин нарушения штатных режимов энергопотребления

БООРЭ – блок оценки отклонений режима энергопотребления

БФВ – блок формирования возмущений

БФВВ – блок формирования входного воздействия

ВВП – валовый внутренний продукт

ВГ – верхняя допустимая граница

ИИУС ЭМ – информационно-измерительная и управляющая система энергетического мониторинга

ИО – исполнительный орган

ИПНЭ – источники и причины нарушения штатного режима энергопотребления

ИС – информационная система

ЛЦОИ – локальный центр обработки информации

МАУП – модуль анализа управляющих программ

ММЭТО – математическая модель энергопотребления технологического оборудования

МРС – металлорежущий станок

МЦС – многоцелевой станок

НГ – нижняя допустимая граница

НРЭ – нарушение штатного режима энергопотребления

ОФК – оптимальный фильтр Калмана

ПИП – первичный измерительный прибор

ПМП – предприятие машиностроительного профиля

РХ – рабочий ход

СМПО - система мониторинга промышленного оборудования

СОЖ – смазочно-охлаждающие жидкости

ТО – технологическое оборудование

ТП – технологический процесс

УП – управляющая программа

УСПД – устройства сбора и подготовки данных

ХХ – холостой ход

ЦОИ – центр обработки информации

ЧПУ – числовое программное управление

ШРЭ – штатный режим энергопотребления

APS – Advanced Planning & Scheduling – система планирования

BI – Business Intelligence – бизнес аналитика

CAD – Computer Aided Design – компьютерная поддержка проектирования

CAE – Computer Aided Engineering – компьютерная поддержка расчетов

CAM – Computer Aided Manufacturing – компьютерная поддержка подготовки

производства

ERP – Enterprise Resource Planning – система планирования ресурсов

MES – Manufacturing Execution System – система управления  
производственными процессами

MRR – Material removal rate – скорость удаления материала

PLC – Programmable Logic Controller – программируемый логический  
контроллер

SCADA – Supervisory Control And Data Acquisition – диспетчерский контроль  
и сбор данных

SCM – Supply Chain Management – управление цепочками поставок

SEC – Specific energy consumption – удельное потребление энергии

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследований.** По данным международного энергетического агентства энергоёмкость ВВП РФ в среднем в два раза выше, чем в развитых странах мира. На промышленных предприятиях расходуется более половины произведённой в РФ энергии. Основными потребителями энергии является технологическое оборудование (ТО). Оно имеет от нескольких единиц до десятков приводов различного функционального назначения. Их количество и технические характеристики определяют его технологические возможности и режим энергопотребления, характеризующий работу по преобразованию исходного сырья в готовую продукцию.

В современных условиях контроль параметров энергопотребления осуществляется с помощью информационно-измерительных и управляющих систем энергетического мониторинга (ИИУС ЭМ). Они предназначены для наблюдения за процессом энергопотребления с целью выявления его соответствия требуемому результату на основании определенной системы индикаторов.

Желаемый или штатный режим энергопотребления (ШРЭ) определяется принятыми значениями характеристик материала заготовок, параметров ТО и режимами его функционирования, задаваемыми технологическими процессами (ТП). Их неоднозначность и разброс создают проблему повышенного, неэффективного энергопотребления. Она усугубляется тем, что существующие ИИУС ЭМ, владея методами и средствами сбора, обработки и анализа соответствующей измерительной информации не позволяют оценить эффективность энергопотребления, поскольку не имеют системы индикаторов для контроля отклонений его параметров от штатных значений в конкретных условиях производства.

В контексте рассмотренной проблемы задача расширения функциональных возможностей ИИУС ЭМ путем формирования системы индикаторов и информации о штатном режиме энергопотребления в текущих условиях производства является актуальной для промышленности. Ее решение позволит

определять источники и причины нарушения штатного режима энергопотребления (ИПНЭ) и оперативно принимать решения по их устранению.

**Объектом исследований** являются информационно-измерительные и управляющие системы энергетического мониторинга предприятий машиностроительного профиля (ПМП).

**Предметом исследований** являются элементы структуры, алгоритмы обработки информации и технические средства, позволяющие расширить функциональные возможности ИИУС ЭМ на основе определения ИПНЭ.

**Степень разработанности темы.** Созданием основ теории информационно-измерительных и управляющих систем и идентификации систем управления занимались М. Краус, Э. Вошни, О.Н. Новоселов, Фомин А.Ф., П. Эйкхофф, Б. Куо, Р. Изерман и др. Исследованию процессов контроля электропотребления с помощью автоматизированных систем учета занимались Исмаатов Х.Б., Довгалюк О.Н., Гаглоева И.Э.; вопросам разработки и внедрения систем контроля и учета электроэнергии посвящены работы: Шарова В.В, Фатыхова Р.И., Добаева А.З., Веселова Г.Е., Кузьменко А.А., Игумнова С.Н..

В работах В.А. Веникова, О.П. Михайлова, Л.И. Волчкевича, В.К. Старкова, В.В. Швеца, Л.Э. Шрарцбурга, Shaohua Hu, Fei Liu, Yan He, Zhong, Q. и др. исследованы вопросы автоматизации и анализа энергетической эффективности технологических процессов и оборудования в машиностроительных производствах.

Анализ известных исследований позволил наметить пути совершенствования ИИУС ЭМ: в частности, связанные с формированием штатного режима энергопотребления в текущих условиях функционирования объекта мониторинга, и оперативной идентификацией ИПНЭ. Это позволило сформулировать цель и задачи исследования.

**Цель работы** заключается в расширении функциональных возможностей информационно-измерительных и управляющих систем энергетического мониторинга за счет идентификации источников и причин нарушения штатных

режимов энергопотребления, обеспечивающих повышение энергетической эффективности предприятий машиностроительного профиля.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе сформулированы и решены следующие **задачи исследования**:

1. Произведены обзор существующих ИИУС ЭМ, систематизация множества возможных ИПНЭ и оценка необходимого объема и вида информации для их идентификации средствами ИИУС.

2. Разработана структура ИИУС ЭМ, использующая модели энергопотребления ТО, описывающие взаимосвязь параметров энергопотребления и условий их функционирования.

3. Разработана математическая модель энергопотребления технологического оборудования (ММЭТО), восстанавливающая параметры его энергопотребления, и формализованы критерии нарушения штатных режимов энергопотребления.

4. Разработан алгоритм идентификации ИПНЭ для ИИУС ЭМ, основанный на анализе отклонений параметров реального энергопотребления ТО от параметров штатных режимов, формируемых его ММЭТО.

5. Выполнено математическое моделирование ИИУС ЭМ ПМП в условиях отклонения от штатных режимов функционирования с целью проверки возможности идентификации источников и причин нарушения режима энергопотребления.

6. Апробированы результаты работы в промышленности и учебном процессе.

**Соответствие паспорту научной специальности.** Область исследования соответствует паспорту специальности 02.02.11 Информационно-измерительные и управляющие системы (по отраслям): 2. Исследование возможностей и путей совершенствования существующих и создания новых элементов структуры и образцов информационно-измерительных и управляющих систем, улучшение их технических, эксплуатационных, экономических и эргономических характеристик, разработка новых принципов построения и технических решений; 4. Расширение

функциональных возможностей информационно- измерительных и управляющих систем на основе применения методов измерений контролируемых параметров объектов для различных предметных областей исследования.

### **Методология и методы диссертационного исследования.**

Теоретические исследования проводились с использованием основных положений теории информационно-измерительных и управляющих систем, теории управления, теорий матриц, а также методов математического моделирования и программирования.

Вычислительные эксперименты осуществлялись на основе современных методов и средств математического и имитационного моделирования, с использованием стандартных пакетов и программ.

Экспериментальные исследования разработанной ИИУС ЭМ проводились на участке многоцелевых станках (МЦС) HAAS серии VF.

### **Научная новизна** работы заключается в следующем:

- предложена структура ИИУС ЭМ, отличающаяся от известных тем, что в ней использованы ММЭТО, формирующие характеристики штатного режима энергопотребления в заданных условиях функционирования ТО, и позволяющая на основании анализа результатов их сравнения с информацией о энергопотреблении, поступающей с первичных измерительных приборов ИИУС, конкретизировать рекомендации по принятию решений о проведении энергосберегающих мероприятий;

- разработаны ММЭТО, отличающиеся тем, что в составе ИИУС ЭМ выполняют функции преобразования информации, регламентирующей заданный режим функционирования реального ТО, в расчетные значения потребляемой мощности, позволяющие формировать характеристики штатных режимов его энергопотребления;

- формализован критерий нарушения режимов энергопотребления, отличающийся тем, что основан на сравнении текущих мгновенных и интегральных характеристик энергопотребления с штатными их значениями,

формируемыми с помощью ММЭТО, позволяющий ИИУС ЭМ идентифицировать источники и причины, вызвавшего нарушение;

- предложен алгоритм идентификации ИПНЭ, отличающийся тем, что основан на генерировании в ИИУС ЭМ векторов параметрических и входных возмущений на ММЭТО, наиболее вероятных для текущих значений отклонений мгновенных и интегральных характеристик энергопотребления от штатного их значения и приводящих моделируемый процесс в соответствии с реальным, позволяющий локализовать источник и возможную причину отклонения режима энергопотребления ТО, создавая условия для принятия адекватных решений о проведении энергосберегающих мероприятий.

**Теоретическая значимость работы** заключается в том, что предлагаемые структуры, модели энергопотребления ТО, критерии и алгоритмы углубляют и конкретизируют систему знаний в области построения ИИУС ЭМ в части расширения их функциональных возможностей за счет идентификации ИПНЭ.

**Практическая значимость** работы состоит в том, что предложенные в диссертации теоретические положения, математические модели и методы служат основой для повышения эффективности ИИУС ЭМ на основе оперативной идентификации ИПНЭ, обеспечивающих снижение затрат энергетических ресурсов на ПМП.

**Положения, выносимые на защиту:**

- структура ИИУС ЭМ, отличающаяся тем, что в ней использованы ММЭТО, формирующие характеристики штатного режима энергопотребления в заданных условиях функционирования ТО, и позволяющая на основании анализа результатов их сравнения с информацией о энергопотреблении, поступающей с первичных измерительных приборов ИИУС, формализовать рекомендации по принятию решений о проведении энергосберегающих мероприятий;

- ММЭТО, отличающиеся тем, что в составе ИИУС ЭМ выполняют функции преобразования информации, регламентирующей заданный режим функционирования реального ТО, в расчетные значения потребляемой мощности,

позволяющие формировать характеристики штатных режимов его энергопотребления;

- критерий нарушения режимов энергопотребления, отличающийся тем, что основан на сравнении текущих мгновенных и интегральных характеристик энергопотребления с штатными их значениями, формируемыми с помощью ММЭТО, позволяющий ИИУС ЭМ идентифицировать источники и причины, вызвавшего нарушение;

- алгоритм идентификации ИПНЭ, отличающийся тем, что основан на генерировании в ИИУС ЭМ векторов параметрических и входных возмущений на ММЭТО, наиболее вероятных для текущих значений отклонений мгновенных и интегральных характеристик энергопотребления от штатного их значения и приводящих моделируемый процесс в соответствии с реальным, позволяющий локализовать источник и возможную причину отклонения режима энергопотребления ТО, создавая условия для принятия адекватных решений о проведении энергосберегающих мероприятий.

### **Реализация работы.**

Разработанные элементы структуры, алгоритмы обработки информации и программные средства ИИУС ЭМ расширяют их функциональные возможности за счет определения ИПНЭ. На разделы программного обеспечения ИИУС ЭМ «Программа моделирования потребления электроэнергии производственными системами с учетом загрузки оборудования» и «Программный модуль для анализа управляющих программ для станков с числовым программным управлением» получены свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Их применение позволило оперативно идентифицировать ИПНЭ и сформировать на их основе рекомендации для принятия соответствующих управленческих решений, учет которых обеспечил повышение энергоэффективности на 7-15% в зависимости от условий производства. Предложенные решения прошли апробацию на предприятиях ОАО «Милена», ООО «Опытно-производственный центр Тульского завода механических систем», ООО «СервисСофт Инжиниринг», ООО НИИ «Наукоемкие технологии» г. Тула.

Основные положения работы используются при подготовке инженерно-технических и научно-педагогических кадров по направлениям «Основы моделирования систем», «Проектирование информационных систем» и «Структуры и алгоритмы обработки данных» в Тульском государственном университете.

**Степень достоверности результатов.** Достоверность полученных результатов обусловлена использованием фундаментальных теоретических положений, адекватностью разработанных математических моделей реальным процессам, экспериментальным подтверждением точности оценок энергопотребления и идентификации ИПНЭ.

**Апробация работы.** Основные положения диссертации докладывались на Международных научно-технических конференциях «Автоматизация» (RusAutoCon), Сочи, 2019, 2021; Международной научно-технической конференции «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении» (ICMTMTE-2020), Севастополь, 2020; Международных научно-технических конференциях «Пром-Инжиниринг» (ICIE), Сочи, 2019, 2020; Международной научно-технической конференции «Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производства», Вологда, 2020; Международной научно-технической конференции «Встраиваемые вычисления», Будва, Черногория, 2018; Всероссийских научно-технических конференциях «Интеллектуальные и информационные системы», Тула, 2016, 2017, 2021; Региональные научно-практические конференции «Инновационные наукоемкие информационные технологии», Тула, 2016-2019.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 22 работ, из них 5 статей в изданиях, входящих в «Перечень утвержденных ВАК Российской Федерации изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней», 6 статей на английском языке в изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и цитирования Scopus и Web Of Science.

**Личный вклад соискателя** заключается в совершенствовании информационно-измерительных и управляющих систем ЭМ в части определения ИПНЭ на основе моделирования энергопотребления ТО.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения и 6-и приложений. Полный объем диссертации составляет 142 страницы с 32 рисунками и 9-и таблицами. Список литературы содержит 146 наименований.

**Во введении** изложены актуальность избранной темы, степень ее разработанности, цели и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы диссертационного исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов.

**В первом разделе** представлены результаты обзора и анализа известных информационно-измерительных и управляющих систем энергетического мониторинга и результаты анализа моделей энергопотребления ТО.

**Во втором разделе** формализована ИИУС ЭМ, обеспечивающая оперативное определение ИПНЭ, и построена математическая модель ТО, содержащая приводы различного функционального назначения.

**В третьем разделе** разработана ИИУС ЭМ для участка многоцелевых станков, наиболее характерных для ПМП; систематизированы возможные источники и причины нарушения штатных режимов их энергопотребления.

**Четвертый раздел** посвящен разработке методики экспериментальных исследований и опытно-промышленному апробированию предложенной ИИУС ЭМ.

**В заключении** представлены итоги выполненного исследования, рекомендации, перспективы дальнейших исследований по теме диссертации.

**В приложении** представлены акты внедрения результатов работы, листинги разработанных программ для ИИУС ЭМ.

## ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

### 1.1 Энергетический аспект оценки влияния ИИУС на обеспечение эффективности промышленных предприятий

Энергетическая эффективность является важнейшей составляющей общей эффективности предприятий, определяющей их конкурентную способность на мировом и внутреннем рынке [1]. Анализ энергоёмкости ВВП передовых стран мира показал, что в России этот показатель в 2-2,5 раза выше, чем в среднем в мире (рис. 1.1). Причинами этого, в частности, явились традиционно низкая стоимость энергоресурсов еще в СССР и отсутствии информационно-измерительных и управляющих систем (ИИУС), обеспечивающих контроль, учет и главное оценку эффективности использования энергетических ресурсов в производственных процессах. Указом Президента РФ в 2008 году [2] была определена цель – снизить к 2020 году энергоёмкость ВВП на 40% от уровня 2007 г. Для достижения указанных целей была принята государственная программа «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности» [3], входящая как часть госпрограммы «Энергоэффективность и развитие энергетики» [4].

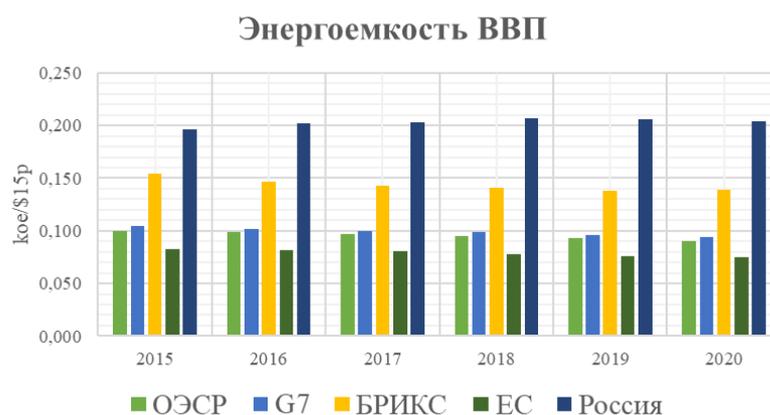


Рисунок 1.1 – Сравнительная оценка энергоёмкости ВВП России, где кое/\$15p-килограмм нефтяного эквивалента на доллар США при постоянном обменном курсе, ценах и паритетах покупательной способности на 2015г

Энергоёмкость ВВП является одним из основных ее целевых показателей. Одной из задач программы является снижение значения этого индикатора на 13,5%

от уровня 2007 за счет реализации предлагаемых в ней мероприятий, что в совокупности с другими факторами позволит обеспечить достижение цели, поставленной Президентом РФ [2].

По состоянию на 2018 год [5] удалось достичь снижения энергоемкости ВВП от уровня 2007 года на 8,3%, при этом по отчетам Министерства энергетики Российской Федерации этот показатель в 2017 г. [6] составлял также 8,3%. Это говорит о медленных темпах и существенных трудностях в реализации программ снижения энергоемкости ВВП. Согласно «Государственному докладу о состоянии энергосбережения и повышении энергетической эффективности в Российской Федерации» [7] (2019 г., Москва) энергоемкость ВВП России по итогам 2018 г. – на 17% – выше уровня Канады (страны, сравнимой по климату) и выше мирового уровня на 46%. Таким образом поставленная цель по снижению на 60% энергоемкости ВВП России при сохранении текущих темпов будет достигнута с отставанием от плана более чем на 20 лет, т.е. в 2043 г. (рис. 1.2).

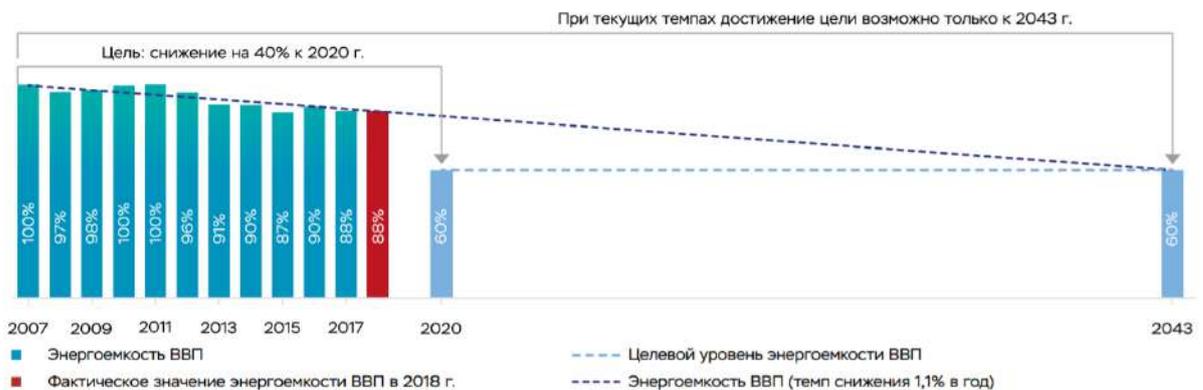


Рисунок 1.2 – Перспективы достижения целевого значения энергоемкости ВВП РФ при текущих темпах развития

В соответствии с прогнозом перспективного снижения энергоемкости ВВП, разработанного Минэкономразвития России, при таких темпах среднемировой уровень энергоемкости ВВП будет достигнут не ранее 2035 г. Это возможно только на основе ускоренной модернизации технологической базы, в том числе внедрения информационно-измерительных и управляющих систем управления производственными и технологическими процессами – то есть за счет воздействия

технологического фактора<sup>1</sup>, а также ИИУС автоматизированного контроля, учета и научно обоснованного нормирования энергопотребления на всех этапах производственных процессов [7]. В этих условиях энергоемкость ВВП должна снизиться на 46% (рис. 1.3)

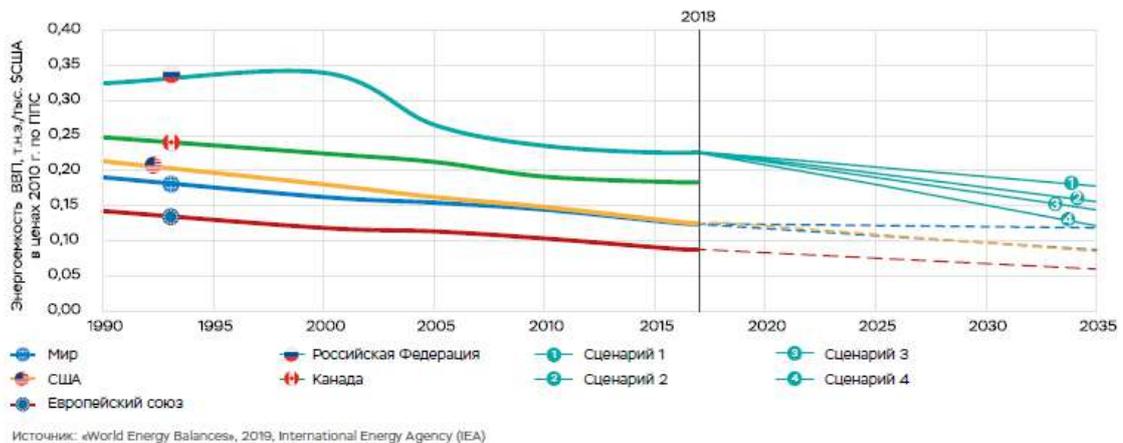


Рисунок 1.3 – Уровень энергоемкости ВВП Российской Федерации по отношению к мировому

Под технологическим фактором понимается изменение энергетической эффективности за счет модернизации технологической базы и внедрения новых технологий [7].

Промышленное производство по данным энергетических балансов является наиболее энергоемким, так как потребляет более половины общего объема энергоресурсов (рис. 1.4) [8]. Удельные затраты энергии в себестоимости продукции, выпускаемой российскими предприятиями, в 1,5-2 раза выше, чем в развитых странах [9]. Тенденция развития современного производства неразрывно связано с постоянным рост его ресурсоемкости и выражается в увеличении его энерговооруженности и информационной насыщенности [10].

Рост спроса на энергетические ресурсы в сочетании с ограниченным предложением на мировых рынках приводит к постоянному росту цен на

<sup>1</sup> Минэкономразвития России разработаны четыре прогнозных сценария изменения энергетической эффективности экономики Российской Федерации в зависимости от степени амбициозности мер государственной политики в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности: Сценарий 1 – «консервация» энергоэффективности (сохраняется на уровне 2016–2018 гг.); Сценарий 2 – экстраполяция влияния технологического фактора; Сценарий 3 – модернизация технологической базы экономики (достижение энергоэффективности за счет наилучших имеющихся в мире технологий к 2050 г.); Сценарий 4 – ускоренная модернизация (достижение энергоэффективности за счет наилучших имеющихся в мире технологий к 2035 г.).

энергоносители. В совокупности с динамикой в ценообразовании они порождают неопределенности для организационных схем рынка, основанных на точно рассчитанных затратах на энергию [11, 12]. Поэтому повышение энергетической эффективности становится движущей силой для предприятий обрабатывающей промышленности в части снижения энергоемкости и стоимости производства и, как следствие, снижение выбросов углекислого газа в атмосферу [13, 14, 15].

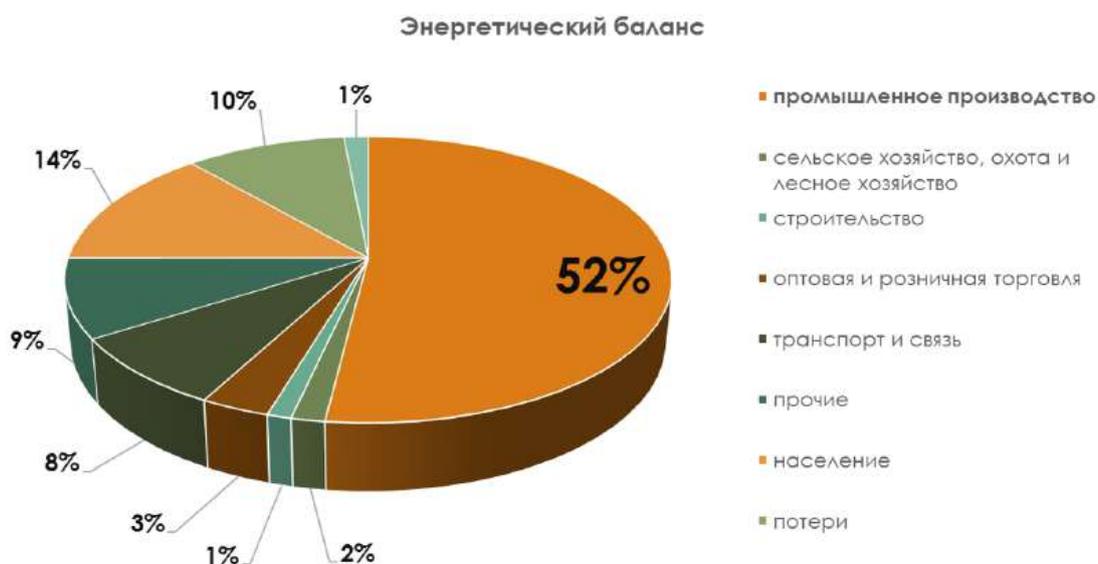


Рисунок 1.4 – Энергетический баланс Российской Федерации

Обобщая вышесказанное, можно сделать вывод, что отечественные производства недостаточно эффективно расходуют энергоресурсы, что значительно снижает конкурентоспособность их товаров на мировом и внутреннем рынках [16, 17, 18]. Это подтверждает важность решения задачи повышения энергетической эффективности промышленных предприятий, определяемой соотношением затрат энергии и выполняемой в них полезной работы.

Наиболее сложными с точки зрения реализуемых технологических процессов (ТП), выполняемой полезной работы, а также учета и нормирования затрат энергии являются предприятия машиностроительного профиля (ПМП) [19, 20].

Согласно концепции электронного описания таких объектов, их модели должны представляться в компьютерной среде в виде иерархии информационных моделей, составляющих единое целое и имеющих соподчиненность. Каждый

последующий уровень детализации содержит дополнительную информацию. Их декомпозиция на подсистемы, позволяет вскрыть иерархию структуры и рассматривать ее на разных уровнях детализации [21]. Известно большое число разновидностей иерархических структур ПМП [22, 23]. Они определяются целями анализа ПМП. Например, в соответствии с положениями технологии машиностроения и организации производства декомпозиция структуры ПМП позволяет выделить следующие иерархические уровни: предприятие, цех, участок, технологическое оборудование (ТО), его исполнительные органы (ИО), технологический процесс (ТП) и воздействие ИО на материальный поток (исходное сырье, заготовка). [10]. В процессе функционирования в них задействованы различные виды ресурсов: материальные, энергетические, информационные, временные, трудовые и т.п. [17, 24].

Полезная работа в ПМП связана с изменением свойств материального потока (исходного сырья, заготовки) и совершается на уровне ТО. На более высоких уровнях происходит возрастание приведенных потерь энергии, а, следовательно, снижение энергоэффективности производства. Полезная работа определяется методом, способом, схемой обработки материального потока и параметрами ТП, реализуемого в ТО, формируя характеристики нагрузки на его ИО, а, следовательно, режим энергопотребления. Он создает основу для оценки эффективности использования энергетических ресурсов в ТО [25, 26, 27, 28].

Управление потреблением энергии – эффективный инструмент адаптации ПМП в условиях изменения режима функционирования. Рациональное использование энергии улучшает показатели предприятия не только с энергетической, но и с экологической и общей экономической точек зрения [29-32].

Стратегия управления энергопотреблением имеет определенные отличия от общей стратегии управления ресурсами [33, 34]. Она находит свое отражение и в построении информационно-измерительных и управляющих систем энергетического мониторинга (ИИУС ЭМ) ПМП, что делает необходимым проведение их критического анализа.

## 1.2 Анализ существующих информационно-измерительных и управляющих систем энергетического мониторинга

Мониторинг предполагает постоянное наблюдение за каким-либо процессом с целью выявления на основании использования одной и той же системы индикаторов его соответствия желаемому результату [35]. В энергетическом мониторинге промышленных предприятий системой индикаторов выступают параметры энергопотребления основных элементов промышленного предприятия (графики потребления активной и реактивной мощностей, коэффициент мощности, фазные токи и напряжения и т.д.).

Основы теории информационно-измерительных и управляющих систем представлены в работе [36], ее развитием явилось создание теории проектирования и расчета таких систем [37, 38], исследования цифровых систем управления представлены в [39]. Исследованиям автоматизации и оптимизации процессов контроля и управления электропотреблением с помощью автоматизированных систем посвящены работы [40, 41]. В ряде исследований даны практические рекомендации по построению, проектированию и внедрению систем контроля и учета электроэнергии [42, 43, 44]. Не смотря на большое количество исследований ИИУС контроля энергопотребления, в них отсутствует информация о том, чему оно должно соответствовать и как ее получить, это ограничивает их возможности в оценке эффективности расходования энергии.

В настоящее время существуют и успешно эксплуатируются различного рода системы энергетического мониторинга промышленных предприятий. К ним относятся автоматизированные системы контроля и учета энергетических ресурсов (АСКУЭ) и системы мониторинга промышленного оборудования (СМПО), в которых реализована функция контроля параметров энергопотребления.

Автоматизация технического учета энергоресурсов на базе программного комплекса «Энфорс АСКУЭ Предприятия» [45] позволяет оценить эффективность внедрения энергосберегающих технологий, сделать прозрачными расчеты за потребленные энергоресурсы, оперативно получать данные об их текущем потреблении, контролировать исправность приборов учета, осуществлять расчет

потребления по группам счетчиков. Ее внедрение на промышленных предприятиях позволяет решить проблемы, связанные с неэффективным использованием энергоресурсов из-за организационных потерь и человеческого фактора. Она является инструментом объективного и оперативного мониторинга и выполняет следующие функции:

1. сбор данных и анализ выработки и потребления электроэнергии, тепловой энергии, холодного и горячего водоснабжения, пара, газа и других видов ресурсов;
2. формирование балансовых групп и возможность контроля их показателей;
3. анализ количества отпущенных энергоресурсов с нарастающим итогом от заданного числа, выборка нескольких точек учета или объектов учета для сравнения, расчет процента рассогласования между ними;
4. создание электронных архивов для долговременного хранения полученной информации;
5. фиксирование в журнале событий отклонений измеряемых параметров от заданных пределов;
6. возможность ограничивать права пользователей при обращении к данным;
7. возможность расширения функционала и адаптация к требованиям заказчика.

Автоматизированная информационно-измерительная система коммерческого учета электроэнергии и мощности (АИИС КУЭ / АСКУЭ) НПО «МИР» [46] предназначена для организации учета энергии с целью осуществления коммерческих расчетов с поставщиком/потребителями, в том числе на ОРЭ в соответствии с требованиями ОАО «АТС».

Данная система реализует следующие функции:

1. измерение количества выданной / потребленной энергии через заданный временной интервал;

2. сбор и передача в базу данных текущих параметров приборов учета и контроллеров;
3. хранение коммерческой информации в базе данных за срок не менее 3,5 лет;
4. формирование по запросу пользователя оперативных сообщений о потребленной энергии и мощности в реальном времени, отчетных документов в виде графиков, вывод на экран монитора и печать журнала событий;
5. синхронизация времени всех компонентов системы с международным координированным временем (UTC) спутниковой системы GPS;
6. контроль потребляемой мощности (оперативный), работоспособности каналов связи, несанкционированного доступа к системе, единство времени в системе, отключения и восстановления питания устройств системы;
7. автоматическая регистрация отказов и сбоев компонентов системы, времени отключения и восстановления связи с каждым абонентом каналов связи и питания устройств системы;
8. обеспечение сохранности информации при авариях;
9. передача коммерческой информации в контролирующие организации и смежным субъектам.

АИИС КУЭ Smart IMS [47]— это информационно-измерительная система на базе комплектующих производства ООО "Матрица", ориентированная на решение широкого круга задач:

1. сбор и обработку данных о потреблении различных видов энергетических ресурсов (электроэнергии, газа, воды, тепла);
2. дистанционное управление потреблением электроэнергии.

Система может использоваться в производственных системах, в частном секторе и на объектах государственного или общественного назначения. Данная система существенно повышает платежную дисциплину, а также определить эффективность потребления энергии. АИИС КУЭ Smart IMS поддерживает экспорт/импорт данных в стандартных форматах. Используемая система

полностью автоматизирована и полностью исключает возможность влияния каких-либо субъективных факторов в процессе учёта.

Она имеет трехуровневую организацию, которая включает в себя:

1. нижний уровень составляют приборы учета электроэнергии и другие абонентские устройства;
2. средний уровень состоит из маршрутизатора и распределенной сети передачи данных;
3. верхний уровень представляет собой Центр, осуществляющий сбор, хранение и обработку данных.

АИС «Диспетчер» является основой для создания на предприятии единого информационного пространства, в котором могут оперативно обмениваться информацией все автоматизированные системы управления предприятием, а также промышленное оборудование.

Основные возможности данной системы: мониторинг оборудования и персонала; контроль производства; управление простоями; управление программами для станков с ЧПУ; контроль эффективности энергопотребления.

АИС «Диспетчер» [48] позволяет в реальном времени точно фиксировать состояния станков, причины их простоя с привязкой к операторам оборудования, контролировать аналоговые параметры (ток, мощность, вибрация и др.), уведомлять ответственных работников о возникновении внештатных и аварийных ситуаций на производстве.

Подсистема аналитики АИС «Диспетчер» наглядно информирует руководителей об основных показателях эффективности (коэффициент загрузки), а также производственные результаты (время производства, простоев оборудования по различным причинам и т. д.) по предприятию в целом, подразделениям, станкам, работникам.

Учет выполнения конкретных технологических операций и состояний станочного оборудования обеспечивают подетальный и пооперационный мониторинг, автоматизированный подсчет продукции, регистрацию и

классификацию брака, измерение фактической производительности оборудования и анализ показателей эффективности на различных иерархических уровнях.

Контроль хранения, обновления и использования управляющих программ (УП) ускоряет обеспечение производства необходимыми УП, помогает повышать качество продукции, предотвращая использование некорректных программ. Средства загрузки УП для разнообразных интерфейсов обмена данными ускоряют запуск УП, а сервис выгрузки отлаженных на станках программ способствует формированию фонда эталонных УП на предприятии. Мониторинг выполнения УП обеспечивает полный хронологический учет их применения на производственных участках.

Опция контроля энергоэффективности позволяет проводить оперативный и объективный сбор данных по затратам электроэнергии станками в различных режимах и состояниях, регистрировать и анализировать качественные показатели системы электропитания. Корреляция уровней потребляемой мощности и изменения рабочих состояний станков дает возможность углубленного исследования технологических операций и режимов обработки с точки зрения их энергетической эффективности [48].

Анализ описанных выше АСКУЭ и СМПО и некоторых других [49-55] показал, что их внедрение на промышленных предприятиях направлено на достижение двух целей [56-61]:

- расчет за энергоресурсы в соответствии с реальным объемом их поставки/потребления;
- минимизация производственных и непроизводственных затрат на энергоресурсы.

Рассмотренные системы выполняют следующие функции [56-61]:

- точное измерение параметров поставки/потребления энергоресурсов с целью обеспечения расчетов за энергоресурсы в соответствии с реальным объемом их поставки/потребления и минимизации непроизводственных затрат на энергоресурсы, в частности, за счет использования более точных измерительных приборов или повышения синхронности сбора первичных данных;

- диагностика полноты данных с целью обеспечения расчетов за энергоресурсы в соответствии с реальным объемом их поставки/потребления за счет повышения достоверности данных, используемых для финансовых расчетов с поставщиками энергоресурсов и субабонентами предприятия и принятия управленческих решений;

- комплексный автоматизированный коммерческий и технический учет энергоресурсов и контроль их параметров по производственной системе;

- контроль энергопотребления по всем энергоносителям, точкам и объектам учета в заданных временных интервалах относительно режимных и технологических ограничений мощности, расхода, давления и температуры с целью минимизации затрат на энергоресурсы и обеспечения безопасности энергоснабжения;

- фиксация отклонений контролируемых параметров энергоресурсов от предыдущих значений, их оценка в абсолютных и относительных единицах для анализа как энергопотребления, так и производственных процессов с целью минимизации затрат на энергоресурсы и восстановление производственных процессов после их нарушения из-за выхода контролируемых параметров энергоресурсов за допустимые пределы;

- сигнализация (цветом, звуком) об отклонениях контролируемых величин от допустимого диапазона значений с целью минимизации производственных затрат на энергоресурсы за счет принятия оперативных решений;

- прогнозирование (кратко-, средне- и долгосрочное) значений величин учета энергии с целью минимизации производственных затрат на энергоресурсы за счет планирования энергопотребления;

- автоматическое управление энергопотреблением на основе заданных критериев и приоритетных схем включения/отключения потребителей - регуляторов с целью минимизации непроизводственных затрат на энергоресурсы за счет экономии ручного труда и обеспечения качества управления;

- поддержание единого системного времени с целью минимизации непроизводительных затрат на энергоресурсы за счет обеспечения синхронных измерений.

Все рассмотренные выше системы энергетического мониторинга [45-55] строятся по общим принципам и включают в себя четыре иерархических уровня (рисунок 1.5):

- первый уровень – первичные измерительные приборы (ПИП) (счетчики, датчики и др.), осуществляющие непрерывно или с заданным интервалом измерения параметров энергопотребления;

- второй уровень – устройства сбора и подготовки данных (УСПД) – специализированные системы со встроенным программным обеспечением, осуществляющие с заданным интервалом сбор данных с территориально распределенных в производственной системе ПИП, их накопление, обработку и передачу в локальные центры обработки информации;

- третий уровень – локальные центры сбора и обработки информации (ЛЦОИ) с специализированным программным обеспечением, осуществляющие сбор информации с УСПД (или группы УСПД), обработку этой информации как по точкам учета, так и по их группам – по подразделениям промышленного предприятия, документирование и отображение данных учета в виде удобном для анализа и принятия решений оперативным персоналом службы главного энергетика;

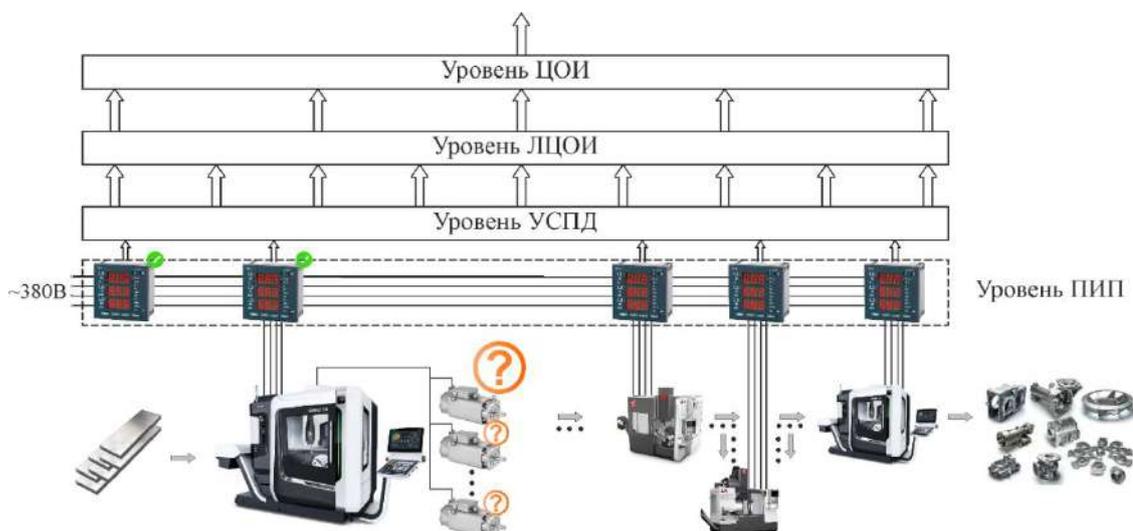


Рисунок 1.5 – Типовая структура системы ИИУС ЭМ ПМП

- четвертый уровень - главный центр сбора и обработки информации со специализированным программным обеспечением, осуществляющий сбор информации с ЛЦОИ, дополнительное аккумулирование и структурирование информации по группам объектов учета, документирование и отображение данных учета в виде, удобном для анализа и принятия решений персоналом службы главного энергетика и руководством предприятия, ведение договоров на поставку энергоресурсов и формирование платежных документов для расчетов за энергоресурсы.

Проведенный анализ показал, что их функции, в основном, ограничиваются сбором данных о потреблении энергии с распределенной сети первичных измерительных приборов, и не обеспечивают анализ собираемой информации на предмет соответствия запланированному технологическому процессу. Такие ИИУС ЭМ не имеют оперативной и адекватной информации о штатном режиме энергопотребления (ШРЭ), соответствующем конкретным условиям производства, не позволяют оценить меру отклонения от него, а, следовательно, и эффективность энергопотребления. Эта информация может быть получена только на основе моделей ТО, связывающих режимы его функционирования с параметрами энергопотребления. Их отсутствие не позволяет вскрыть техническую сущность той или иной проблемы и наметить пути ее решения, в том числе определить источники и причины нарушения штатного режима энергопотребления (ИПНЭ). Это ставит задачу анализа известных моделей энергопотребления технологического оборудования на предмет возможности их использования в ИИУС ЭМ.

### 1.3 Анализ моделей энергопотребления промышленных предприятий

Анализ публикационной активности авторов по тематике энергопотребления промышленных предприятий показал, что большая доля публикаций приходится на зарубежных авторов. Интенсивность этих исследований возросла во втором десятилетии 21-го века – количество статей увеличивалось экспоненциально после 2010 года (рисунок 1.6). Это связано с принятием большого количества

национальных и международных исследовательских инициатив в этой области [62, 63, 64, 65]. Можно предположить, что низкая энергетическая эффективность ПМП в РФ во многом связана с отсутствием исследований ученых в этой области.

Анализ моделей энергопотребления [66-80] приведен в таблице 1.1. В моделях использованы следующие сокращения: SEC (Specific energy consumption) – удельное энергопотребление; MRR (Material removal rate) – скорость удаления материала.



Рисунок 1.6 – Распределение статей по тематике энергетической эффективности

Приведенные модели энергопотребления не учитывают или учитывают очень приближенно потери энергии в переходных процессах, зависимость КПД от скоростных и силовых характеристик и статические и динамические параметры технологического оборудования. Они практически не связаны с конкретными параметрами оборудования и технологических процессов, что не позволяет формализовать критерий их эффективности. Они предназначены для планирования, прогнозирования, оптимизации режимов и последовательностей обработки. Это не позволяет выявить НРЭ, причины которого могут возникать на всех иерархических уровнях ПМП, которые следует рассматривать как источники нарушения. Конкретной причиной является изменение параметров и условий функционирования элементов иерархического уровня. Решение этой задачи предполагает путем идентификации ИПНЭ в рамках информационной системы

Таблица 1.1 – Известные модели энергопотребления технологического оборудования

№	Авторы	Год	Модель	Динамика	КПД ИО	Параметры оборудования
1	Gutowski и др. [66]	2006	$P = P_0 + k\dot{v},$ $k$ – коэффициент модели (кДж/см <sup>3</sup> )	-	-	+
2	Петрицкий С.А. [67]	2010	$w_{on} = k_1 k_2 \left( k_{zn} \frac{P_{ном}}{\eta_{ном}} T_{mn} + k_{zxx} \frac{P_{ном}}{\eta_{ном}} (T_u - T_{mn}) \right)$	-	+	-
3	Li and Kara [68]	2011	$SEC = C_0 + \frac{C_1}{MRR},$ $C_0, C_1$ - коэффициенты модели	-	-	-
4	Guo и др. [69]	2012	$SEC = C_0 v_c^\alpha f^b \alpha_p^\gamma D^\phi + \frac{C_1}{v_c f a_p}$ $C_0, C_1, \alpha, \beta, \gamma$ - коэффициенты модели, полученные методом наименьших квадратов	-	-	-
5	Shaohua Hu. И др. [70]	2012	$\eta = \frac{P_c(t)}{P_{in}(t) + P_{rfo}(t)} \quad U = \frac{\int_0^t P_c(t) dt}{\int_0^t P_{in}(t) dt + \int_0^t P_{rfo}(t) dt}$	+	+	-
4	Li и др. [71]	2013	$SEC = k_0 + k_1 \frac{n}{MRR} + k_2 \frac{1}{MRR}$ $k_0, k_1, k_2$ - коэффициенты модели	-	-	+
5	Li и Yuan [72]	2013	$SEC = C_0 \cdot P_{sp} + C_1 \frac{1}{MRR} + C_2 \frac{n}{MRR} + C_3,$ $C_0, C_1, C_2, C_3$ - константы; $n$ – скорость шпинделя	-	-	-
6	Киреева Н.В. [73]	2014	$erg^{ed} = \frac{cap}{t^q}$	-	-	+
7	Velchev и др. [74]	2014	$SEC = \frac{P_u}{MRR} + B_0 MRR^{B_1}$	-	-	+

№	Авторы	Год	Модель	Динамика	КПД ИО	Параметры оборудования
			$B_0, B_1$ – коэффициенты станка, зависящие от комбинации заготовки и режущего инструмента			
8	N. Liu и др [75]	2015	$SEC = \frac{C_0}{MRR} + C_1 \frac{P_{cutting}}{MRR}$	-	-	-
9	Zhao и др. [76]	2016	$SEC = k_0 + k_1 \frac{n}{MRR} + k_2 \frac{n}{MRR},$ $P = aMRR^2 + bMRR + c$ $SEC = \frac{P}{MRR} = aMRR + b + \frac{c}{MRR}$ <p><math>k_0, k_1, k_2</math> - коэффициенты модели; <math>n</math> – скорость шпинделя  <math>a, b, c</math> – константы для конкретного станка и режущего инструмента</p>	-	-	+
10	Zhong и др [77, 78]	2016	$SEC = \frac{P_{fixed}}{MRR} + \frac{kn + b}{MRR} + \frac{\lambda v_c^\alpha f^\beta \alpha_p^\gamma}{MRR}$ <p><math>\gamma, \beta, \alpha, \lambda</math> - удельные коэффициенты, относящиеся к станку, материалу, режущему инструменту и др.</p>	-	-	+
11	Zhou и др. [79]	2017	$SEC = C_1 n^{C_2} + C_3 \frac{n}{MRR} + \frac{C_4}{MRR}$ <p><math>C_0, C_1, C_2, C_3</math>- константы; <math>n</math> – скорость шпинделя</p>	-	+	-
12	Малькова Л.Д. [80]	2019	$E_{сум} = E_{чep} + E_{чист} = P_{z_{чep}} \cdot v_{чep} \cdot t_{o_{чep}} + P_{z_{чист}} \cdot v_{чист} \cdot t_{o_{чист}}$	-	-	+

## 1.4 Анализ возможностей интегрирования ИИУС ЭМ в информационные системы ПМП

Информационная система современных ПМП развивается по пути информационной поддержки процессов жизненного цикла изделий [81, 82, 83].

В частности, электронный образ предмета производства формируется входящими в ИС ПМП системами CAE (Computer Aided Engineering), CAD (Computer Aided Design) и др. на стадии его проектирования. С их помощью получают: комплект конструкторской документации и 3-D модель, содержащие информацию о форме, размерах, качестве поверхностей, предельных отклонениях, материале каждой детали, входящей в изделие.

CAM (Computer Aided Manufacturing), входящие в ИС ПМП, увеличивают объем информационного сопровождения предмета производства описанием ТП, 3-D модели заготовки и управляющими программами для станков с ЧПУ. В ТП отражены: набор обрабатываемых поверхностей, маршруты, комплект инструментов и режимы их обработки для преобразования заготовки в готовое изделие и параметры оборудования, на котором предлагается ее обрабатывать [84, 85].

Для обеспечения процесса производства необходимыми ресурсами в ИС ПМП встроены системы управления цепочками поставок – Supply Chain Management (SCM) [84, 85].

На этапе реализации производства используются десятки компонент и подсистем информационной системы ПМП, отвечающих за различные задачи, начиная от сбора данных с распределенной сети датчиков с помощью систем SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition), мониторинга и управления производственными и технологическими процессами систем (АСУП и АСУТП), а также систем сбора параметров потребления энергетических ресурсов с помощью систем АСКУЭ и, заканчивая, оценкой эффективности всего предприятия. На рисунке 1.7 приведен пример построения информационной системы ПМП.



Рисунок 1.7 – Системы информационной поддержки процесса производства: классы систем SCADA – Supervisory Control And Data Acquisition; PLC – Programmable Logic Controller; MES – Manufacturing Execution System; APS – Advanced Planning & Scheduling; ERP – Enterprise Resource Planning; BI – Business Intelligence

Современная степень информатизации производства (рис.1.8), а также постоянная тенденция ее роста показывают, что все параметры ТП, необходимые для его реализации, доступны всем подсистемам информационной системы ПМП, в том числе и ИИУС ЭМ, как на стадии подготовки производства, так и на стадии оперативного контроля [84, 85].

АСКУЭ, используемые в структуре информационной системы ПМП, обладают всеми отмеченными выше п.1.2, 1.3 недостатками, то есть не позволяют оценить эффективность энергопотребления как степень его соответствия спроектированному ТП и определить ИПНЭ с целью принятия оперативных адекватных решений по выбору энергосберегающих мероприятий.

Таким образом, разработка ИИУС ЭМ с функцией идентификации ИПНЭ является актуальной задачей. Для ее решения необходимо систематизировать факторы, оказывающих влияние на энергопотребление промышленных предприятиях.

За основу систематизации нарушений режима энергопотребления ПМП принято, что его источником является иерархический уровень ПМП (см.п.1.1), в

котором произошли отклонения в условиях функционирования, а причиной – изменение параметров его элементов или циклов (алгоритмов) их работы.

Элементами ПМП, совершающими полезную работу, как отмечено в п.1.1, и потребляющими основной объем энергетических ресурсов, является ТО. Конкретизация возмущений, являющихся причиной нарушения штатного режима энергопотребления (НРЭ), базируется на анализе их компоновки, кинематической схемы, параметров ИО, ТП, характеристик реализуемого воздействия, обрабатываемого материала и условий функционирования (конкретных настроек, производимых операторами ТО; режимов энергоснабжения).

Возмущения по компоновке, кинематической схеме, параметрам ИО и ТП в большей части возникают при переносе ТП на другое ТО, отличающееся типоразмером, кинематической схемой, скоростями перемещений, мощностями, типом ИО и т.п.

Все возмущения с точки зрения энергопотребления выражаются в изменении либо полезной работы, либо потерь энергии в соответствующих элементах ТО.

Полезная работа, производимая ТО над материальным потоком (исходным сырьем, заготовкой) с целью изменения его свойств определяется силовыми, скоростными и временными характеристиками воздействия на него.

Потери энергии возникают в механических и электрических компонентах ИО ТО и зависят от силовых и скоростных параметров реализуемого воздействия на материальный поток.

Проведенный анализ производственного опыта и технической литературы показал, что на уровне ТП причинами являются отклонения в: характеристиках обрабатываемых материалов, режимах обработки, маршрутных ТП и УП; на уровне ТО – типоразмере, циклограмме работы, инструменте, его настройках; на уровне приводов – настройках и их параметров.

Таким образом для расширения возможностей ИИУС ЭМ функцией идентификации ИПНЭ необходимо дополнить их элементами формирования и анализа ШРЭ для текущих условий производства.

## Выводы по главе 1

Обобщая вышесказанное, можно сделать следующие выводы:

- отечественные промышленные предприятия недостаточно эффективно расходуют энергоресурсы, что значительно снижает конкурентоспособность их товаров на мировом и внутреннем рынках;
- отличительные особенности энергетических ресурсов накладывают отпечаток на построение информационных систем энергетического мониторинга предприятий машиностроительного профиля;
- анализ существующих информационно-измерительных систем энергетического мониторинга показал, что их функции, в основном, ограничиваются сбором данных о потреблении энергии с распределенной сети первичных измерительных приборов, и не обеспечивают анализ собираемой информации на предмет соответствия запланированному технологическому процессу;
- факторы, обусловленные конкретной технологией, оказывают наиболее существенное влияние на энергопотребление;
- существующие модели энергопотребления не связаны с конкретным технологическим оборудованием и технологическим процессом, что не позволяет формализовать критерий их эффективности;
- современная степень информатизации производства позволяет контролировать большинство факторов, оказывающих влияние на потребление энергии, как на стадии подготовки производства, так и на стадии непосредственно производства.

В связи с этим сформулирована цель и задачи работы.

## ГЛАВА 2 ФОРМАЛИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ И УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

### 2.1 Обоснование требований к ИИУС ЭМ ПМП

Как отмечено выше ПМП является сложной динамической системой, в рамках которой взаимодействуют: оборудование, средства контроля и управления, вспомогательные и транспортные устройства, обрабатывающий инструмент или среды, находящиеся в постоянном движении и изменении, объекты производства, люди, осуществляющие процесс и управляющие им [86]. Объектами управления в них, как правило, являются конкретные ТП [87, 88] и ТО, реализующее их. Энергетическая эффективность ПМП в значительной части определяется качеством реализации ТП.

Любой ТП [89, 90, 91] ПМП может быть представлен в виде последовательности операций, заданных временными рамками  $t \in (t_H, t_K)$ , изменения конечного числа геометрических и/или физико-механических свойств материального потока (исходного сырья, заготовок), где  $t_H, t_K$  - время начала и окончания операции ТП.

С целью формализации подхода к ПМП как объекту энергетического мониторинга его иерархическая структура представлена в виде множества уровней [86, 92]:

$$L = \{L^1, L^2, \dots, L^j, \dots, L^m\}, \quad (2.1)$$

где  $m$  – количество уровней иерархии промышленного предприятия.

Каждый  $j$ -ый уровень представлен в виде множества элементов:

$$L^j = \{v_1^j, v_2^j, \dots, v_i^j, \dots, v_n^j\}, \quad (2.2)$$

где  $n$  – количество элементов на  $j$ -ом уровне ПМП.

Каждый  $v_i^j$  элемент ПМП описан множествами параметров и переменных:

$$v_i^j = \langle U_i^j, X_i^j, Z_i^j, H_i^j \rangle, \quad (2.3)$$

где  $U_i^j$ ,  $X_i^j$ ,  $Z_i^j$  - множество входных, выходных и возмущающих переменных элемента, соответственно;  $H_i^j$  - множество параметров, не изменяющихся в процессе его работы (типоразмер ТО, его установленная мощность и др.).

Вход  $U_i^j$  элемента определяет характер его воздействия на материальный поток (исходное сырье, заготовку) [92]. Выход  $X_i^j$  элемента определяет режим его работы в конкретный момент времени. В частности, некоторые из выходов элемента  $x_{mi}^j \subset X_i^j$  характеризуют процесс изменения свойств материального потока  $v_{fi}^j = f(x_{mi}^j)$ . С точки зрения энергетического мониторинга, значения выходных переменных элемента определяют параметры его энергопотребления  $N_i^j$  при реализации операций ТП. Как было отмечено в п. 1.3 каждый  $j$ -ый уровень характеризуется определенной долей потерь энергии  $\Delta N_i^j$ .

Динамика изменения свойств материального потока определяется характером выполняемой технологической операции ТП. На рисунке 2.1 приведены примеры возможных вариантов динамики изменения свойств: *а* – изменение не происходит (операции хранения и транспортирования); *б* – ступенчатое изменение (операции штамповки); *в* – монотонное изменение (операции формообразования, связанные с удалением части материала заготовки: резание и др.).

На ПМП подавляющее большинство основных операций связано с изменением свойств, характеризующих геометрию обрабатываемых поверхностей: размеров, формы и микрорельефа. Используемое для этого ТО реализует определенную схему воздействия инструмента на заготовку, которая конкретизирует виды их движений друг относительно друга. В общем случае они определяют процесс формообразования и делятся на движения: подачи и главное [22]. Современное ТО ПМП имеет от нескольких единиц до десятков приводов различного функционального назначения. Их количество и технические характеристики определяют его технологические возможности и режим

энергопотребления, характеризующий работу по преобразованию исходного сырья в готовую продукцию.

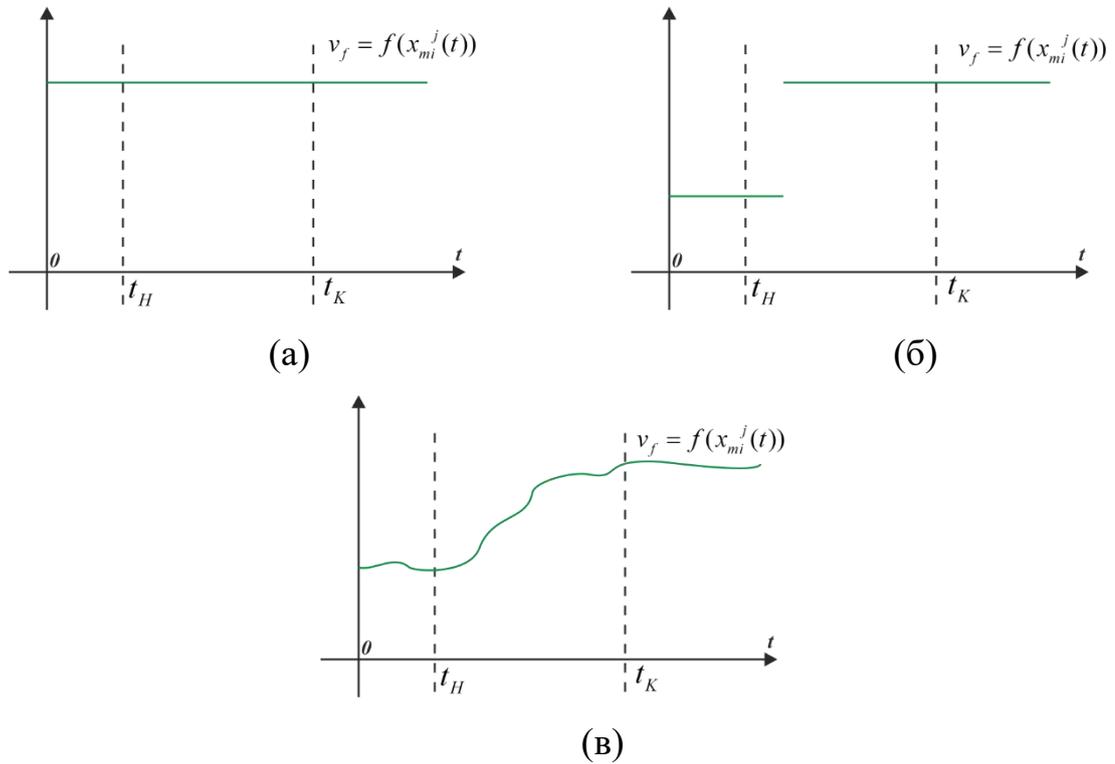


Рисунок 2.1 – Динамика изменения свойств материального потока

Таким образом, процесс формообразования (изменение свойств материального потока) определяется параметрами элемента и режимом его работы:

$$X_i^j = A_i^j \cap R_i^j, A_i^j \subset H_i^j, \quad (2.4)$$

Режим  $R_i^j$  задается набором компонент

$$R_i^j = \langle V_{fi}^j, G_i^j, T_i^j, M_i^j \rangle, R_i^j \subset U_i^j \quad (2.5)$$

где  $V_{fi}^j$  - заданные скорости формообразования;  $G_i^j$  - геометрические параметры формообразования;  $T_i^j$  - параметры воздействия, свойственные  $j$ -му уровню иерархии ПМП;  $M_i^j$  - параметры, обеспечивающие реализацию воздействия на материальный поток.

Тогда, энергопотребление есть функция

$$\bar{N}_i^j = f(X_i^j) \quad (2.6)$$

Введенные обозначения иллюстрируются графически на рисунке 2.2.

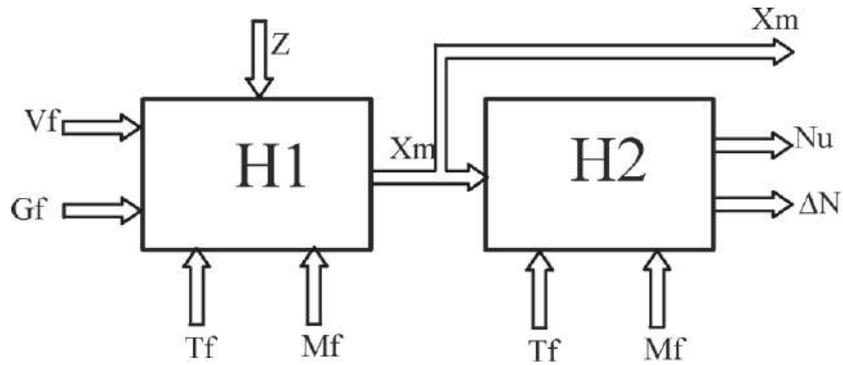


Рисунок 2.2 – Элемент ПМП

Известно большое число эмпирических, полу эмпирических и теоретических зависимостей силовых характеристик (мощности) воздействия на заготовку с целью изменения ее свойств [66, 68, 72, 93-100]. Они являются функцией режимов обработки, параметров инструмента и обрабатываемой заготовки.

Полезные мощности, затрачиваемые  $i$ -ым элементом на  $j$ -ом уровне, выражены следующей зависимостью:

$$\bar{N}_i^j = e_i^j \cdot v_{fi}^j(x_{mi}^j), \quad (2.7)$$

где  $e_i^j, v_{fi}^j(x_{mi}^j)$  - удельное значение энергии, затрачиваемой на единичное изменение свойства, и скорость формообразования на  $i$ -ом элементе  $j$ -го уровня иерархии ПМП.

Тип и характеристики элемента ПМП конкретизируют процесс изменения свойств материального потока. В частности, в нем могут быть использованы несколько исполнительных органов, тогда затрачиваемая мощность определяется их совокупным действием.

$$\bar{N}_i^j = \sum_k e_{ik}^j \cdot v_{fik}^j(x_{mik}^j), x_{mik}^j \subset x_{mi}^j, \quad (2.8)$$

где  $v_{fik}^j$  - проекция вектора скорости изменения свойства на направление действия  $k$ -го исполнительного механизма.

Учитывая зависимость КПД исполнительных органов от нагрузки, полная мощность [101, 102, 103, 104], потребляемая  $i$ -ым элементом на  $j$ -ом уровне

$$\Delta \bar{N}_i^j = \sum_k \frac{e_{ik}^j \cdot v_{fik}^j(x_{mik}^j)}{\eta_{ik}^j(x_{mik}^j)}, x_{mik}^j \subset x_{mi}^j, \quad (2.11)$$

где  $\eta_{ik}^j(x_{mik}^j)$  - зависимость КПД ИО от режима его работы

Таким образом на потребляемую мощность оказывают влияние не только параметры ТП, но и характеристики используемого оборудования.

Нарушение режима энергопотребления ПМП в большинстве случаев связано с флуктуацией параметров его элементов или возмущений по входу, поэтому контроль энергопотребления позволяет судить о качестве реализуемого ТП, а, следовательно, о качестве выпускаемой продукции.

Энергетический мониторинг ПМП предполагает контроль соответствия режима энергопотребления заданному ТП. Он позволяет получать оценку способности достигать требуемого результата при идеальном способе использования ресурсов и в отсутствии воздействия внешней среды, т.е. оценку потенциальной эффективности функционирования системы [105]. Таким образом для оценки эффективности расходования энергетических ресурсов на ПМП необходимо контролировать не только режим энергопотребления и текущие параметры ТП, но и формализовать критерии их соответствия [106, 107, 108].

При таком подходе помимо задач получения информации о текущем режиме энергопотребления, получаемой с помощью известных ИИУС ЭМ, и требуемых параметрах ТП, получаемой с SCADA, необходимо решить задачу определения степени соответствия этих двух видов информации. Очевидно для этого ИИУС на основании технологической информации должна генерировать требуемый желаемый или штатный режим энергопотребления, то есть моделировать его в реальном времени.

Кроме этого ИИУС ЭМ должна иметь критерии НРЭ, с помощью которых определять момент времени, когда изменения параметров оборудования и ТП привели к выходу энергопотребления за допустимые пределы. Причем для принятия решения о внесении каких-либо изменений необходимо получить информацию о наиболее вероятных ИПНЭ. Одним из способов ее получения является моделирование их влияния на энергопотребление.

## 2.2. Формализация структуры ИИУС ЭМ ПМП

На основании анализа известных ИИУС ЭМ, проведенного в п. 1.2, предложена структура (рис. 2.3). Она содержит традиционные средства контроля и учета как энергетических  $\{\tilde{x}_k(t)\}$ , так и технологических параметров  $\{\tilde{x}_m(t)\}$  функционирования элементов ПМП, каналы связи и программное обеспечение, позволяющее осуществлять сбор, учет и хранение данных, входящих в блок SCADA/АСКУЭ. В нее интегрированы следующие блоки: математических моделей энергопотребления ТО (ММЭТО), формирования входного воздействия (БФВВ), оценки отклонений режима энергопотребления (БООРЭ), формирования возмущений (БФВ) и идентификации ИПНЭ (БИНЭ).

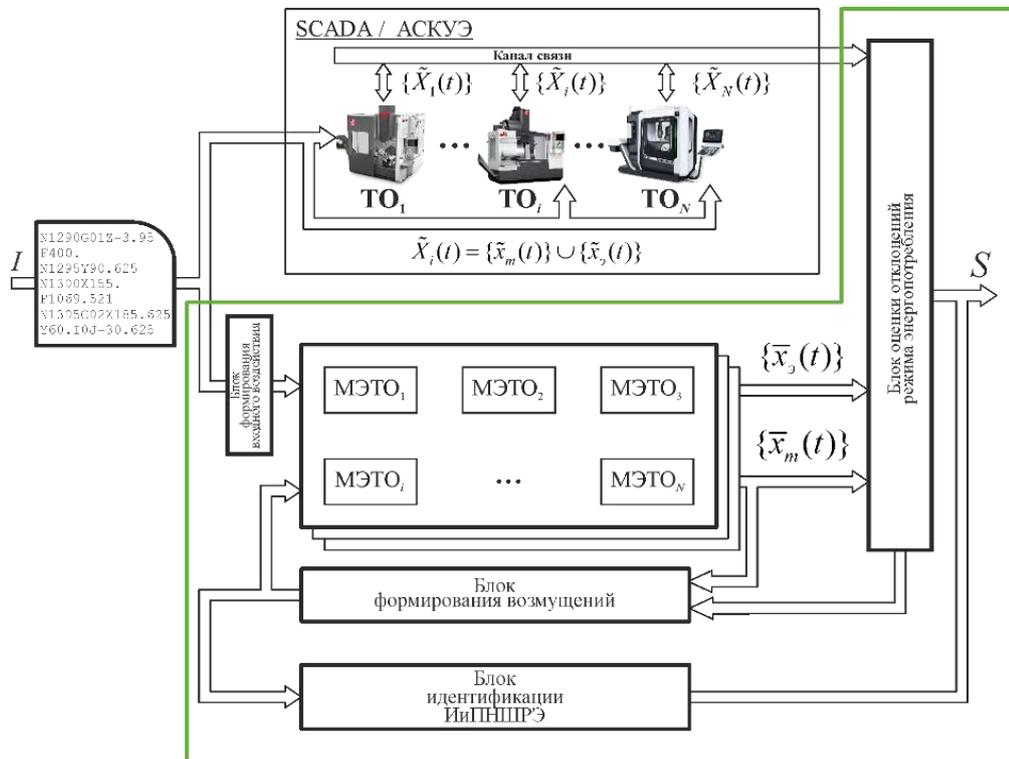


Рисунок 2.3 – Модифицированная структура ИИУС ЭМ

1. Ядром разрабатываемой ИИУС ЭМ является блок моделей энергопотребления ТО. Он содержит модели основных преобразователей энергии конкретного ТО и обеспечивает формирование информации о ШРЭ, представляющего собой диаграммы полезной и полной мощностей и энергию, потребляемую его приводами.

Проведенный выше анализ ПМП как объекта ЭМ и поставленная цель оценки эффективности энергопотребления позволяет сформулировать следующие требования к ММЭТО. Она должна:

- описывать все потребители энергии [70, 109];
- учитывать все элементы циклограммы работы ИО: включение, готовность (покой), холостой ход (ХХ), рабочий ход (РХ) [70, 110];
- быть динамической, т.к. в переходных процессах происходит значительное потребление энергии [109];
- быть минимальной сложности (минимального порядка), чтобы решать многовариантные задачи идентификации ИПНЭ [111].
- генерировать вектор выходных параметров, идентичных измеряемым на ТО и восстанавливающий штатные значения энергопотребления (см. рис.2.3);
- учитывать возмущения по входу, вызванные вариацией нагрузки на элементы ТО, и параметрические, связанные с изменениями условий функционирования;
- воспринимать вектор входных воздействий, идентичный реальному ТО, и восстанавливаемый на основании доступной информации с его системы ЧПУ.

Структура предлагаемой ММЭТО приведена на рис.2.4.

2. Блок формирования входного воздействия обеспечивает преобразование информации, регламентирующей режим работы реального ТО, во входное воздействие на ММЭТО.

Одним из способов представления (описания) этой информации в современном ТО с ЧПУ является управляющая программа. Она содержит технологическую и геометрическую компоненты. Первая задает инструмент, последовательность и скорости формообразующих движений, вспомогательные действия и т.п. Вторая задает вид и координаты обрабатываемой поверхности, определяя через приращения координат траектории движения инструмента относительно нее.

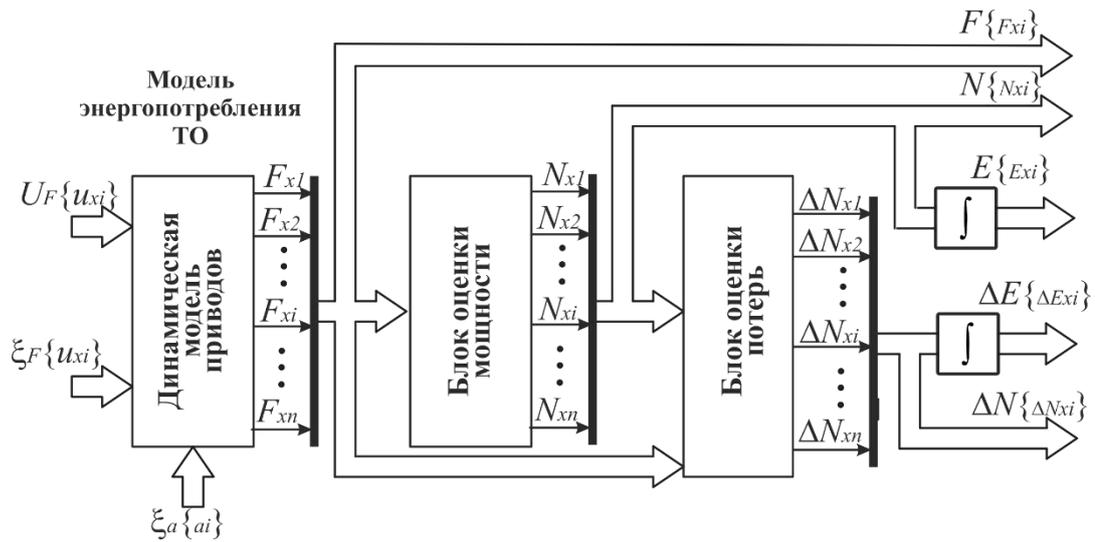


Рисунок 2.4. – Структура модели энергопотребления ТО

В процессе выполнения технологической операции перемещение инструмента осуществляется по сложной траектории с заданной контурной подачей  $F$ . В пределах кадра УП вид участка траектории и величина подачи остаются неизменными, а направление определяется координатами начальной и конечной точек его траектории. Техническая реализация перемещения инструмента по заданной траектории осуществляется путем разложения движения (интерполяции) по управляемым координатам [112, 113, 114].

$$\vec{F}(t) = \sum_{i=1}^n \vec{F}_{xi}(t), |\vec{F}(t)| = \sqrt{\sum_{i=1}^n |\vec{F}_{xi}(t)|^2} = const, t \in (t_H, t_K), \quad (2.12)$$

где  $n$  – число одновременно управляемых координат;  $xi = X, Y, Z, U, V, W, A, B, C \dots n$  – декартовы системы координат основная и вспомогательная, координаты поворота вокруг осей основной системы соответственно;  $\vec{F}_{xi}(t)$  - проекции контурной подачи  $\vec{F}(t)$  на соответствующие управляемые координаты.

В общем случае подачи по отдельным координатам определяются через соответствующие их приращения на каждом шаге интерполяции  $\Delta x$  :

$$F_{xi} = \frac{|\vec{F}(t)| \cdot \Delta x_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n |\Delta x_i|^2}}, \quad (2.13)$$

где  $\Delta x_i$  приращение  $i$ -ой координаты на шаге интерполяции.

Для передачи информации о величине подачи на приводы по каждой управляемой координате она масштабируется в соответствии с техническими характеристиками ТО. В этом случае команды управления приводами

$$U_{xi} = K_{MU} \cdot F_{xi}, \quad (2.14)$$

где  $K_{MU}$  - масштаб преобразования технологической информации о скорости в сигнал управления приводом.

3. Блок оценки отклонений от штатного режима энергопотребления, определяемого ММЭТО, основан на его представлении графиками потребления активной мощности  $i$ -ым элементом на  $j$ -ом иерархическом уровне ПМП  $N_i^j(t)$ , и их интегральными характеристиками, затраченной энергией  $E_i^j(t) = \int_0^t N_i^j(t) dt$   $i = \overline{1, n}$ ,  $j = \overline{1, m}$ . Они характеризуют качество функционирования системы.

Если обозначить  $\bar{N}_i^j(t)$ ,  $\bar{E}_i^j(t)$  штатные (желаемые) значения. Тогда допустимые их значения

$$(1 - \delta_{Ni}^j) \bar{N}_i^j(t) \leq \hat{N}_i^j(t) \leq (1 + \delta_{Ni}^j) \bar{N}_i^j(t); \quad (1 - \delta_{Ei}^j) \bar{E}_i^j(t) \leq \hat{E}_i^j(t) \leq (1 + \delta_{Ei}^j) \bar{E}_i^j(t), \quad (2.15)$$

где  $\delta_{Ni}^j$ ,  $\delta_{Ei}^j$  - радиусы области адекватности (допустимого отклонения энергопотребления от штатного режима),  $\hat{N}_i^j$ ,  $\hat{E}_i^j$  - допустимые значения потребляемой мощности и затраченной энергии соответственно.

В этом случае, полагая что  $\delta_{Ni}^j = \delta_{Ei}^j = \delta_i^j$ , критерий оценки отклонений от ШРЭ конкретным элементом системы можно записать следующим образом:

$$\delta_i^j \geq |\tilde{N}_i^j(t) - 1|, \quad \delta_i^j \geq |\tilde{E}_i^j(t) - 1|, \quad (2.16)$$

где  $\tilde{N}_i^j(t) = \frac{\hat{N}_i^j(t)}{\bar{N}_i^j(t)}$ ;  $\tilde{E}_i^j(t) = \frac{\hat{E}_i^j(t)}{\bar{E}_i^j(t)}$  относительные значения соответствующих показателей.

Введем следующие обозначения  $y_{(2i-1)}^j = |\tilde{N}_i^j(t) - 1|$ ,  $y_{(2i)}^j = |\tilde{E}_i^j(t) - 1|$ . Тогда вектор  $y_i^j$ ,  $i = \overline{1, 2n}$ ,  $j = \overline{1, m}$  будет отображать определенное существенное свойство системы и являться частным показателем качества энергопотребления.

Показатель  $y_i^j$ ,  $i = \overline{1, 2n}$ ,  $j = \overline{1, m}$  может принимать значение из множества допустимых значений  $\langle \hat{y}_i^j \rangle$ . Обобщенным показателем качества энергопотребления  $j$  – м иерархическим уровнем системы будет вектор  $Y^j = \langle y_1^j, y_2^j, y_3^j, \dots, y_{2n}^j \rangle$ , компонентами которого являются показатели его отдельных свойств.

Тогда критерий оценки отклонения от ШРЭ на  $j$ -ом иерархическом уровне системы можно представить в более общем виде

$$K^{oo} : (\forall_i) (y_i^j \in \delta | \delta_i \rightarrow \hat{y}_i^j, i = \overline{1, 2n}), \quad (2.17)$$

а системы в целом

$$K^{oo} : (\forall v_i^j) (y_i^j \in \delta | \delta_i \rightarrow \hat{y}_i^j, i = \overline{1, 2n}, j = \overline{1, m}) \quad (2.18)$$

Эти критерии характеризуют правило, согласно которому система считается пригодной по отклонению от идеального энергопотребления, если значения всех  $i$ -ых частных показателей этой системы принадлежат области адекватности  $\delta$ , а радиус этой области соответствует допустимым значениям всех частных показателей.

4. БФВ генерирует векторы параметрических и входных возмущений на ММЭТО, приводя моделируемый процесс в соответствие с реальным.

Возмущения определяются через изменения параметров ТО, приводов (инерционности и демпфирования), реализуемых на нем ТП и условий функционирования.

Параметрические возмущения задаются множеством возможных отклонений параметров его модели  $\Delta a_{ij} \in \Omega^a$

Входные возмущения вызваны флуктуацией условий функционирования и задаются множеством возможных отклонений упруго-диссипативных сил, действующих на приводы  $f_i \in \Omega^f$

При обнаружении НРЭ по (2.18) конкретизируются:

- момент времени;
- характер нарушения (выход за допустимые пределы  $\langle \hat{y}_i^j \rangle$ : верхний и нижний);

- режимы функционирования ТО до момента НРЭ (по диаграмме скоростей ИО ТО).

Анализ характера НРЭ и режимов функционирования позволяет уменьшить область возможных значений возмущений за счет исключения не свойственных им значений.

Векторы возмущений формируются на основании критерия

$$J = \lim_{\substack{f_i \in \Omega^f \cap \\ \Delta a_i \in \Omega^a}} Y_i^j(t) \rightarrow \delta \quad (2.19)$$

Поиск конкретных значений осуществляется одним из известных методов [115, 116, 117]. В результате определяются области наиболее вероятных возмущений, приведших к обнаруженному НРЭ,  $\Delta a_i \in \Omega^a$ ,  $\Delta f_i \in \Omega^f$

5. Блок идентификации ИПНЭ на основании проведенной систематизации их связи с моделируемыми режимами функционирования и возмущениями конкретизирует возможные их варианты.

Учитывая (2.6) подмножество  $X_{idi}^j = \{x \in X_i^j : N(X_{idi}^j) \leq \widehat{N}_i^j\}$  соответствует штатному режиму энергопотребления, а  $X_{negi}^j = \{x \in X_i^j : N(X_{negi}^j) > \widehat{N}_i^j\}$  отвечает условиям НРЭ и может быть проиллюстрировано рис. 2.5.

Режимы, соответствующие НРЭ:

$$\widehat{P}_i^j = \langle \widehat{V}_{fi}^j, \widehat{G}_i^j, \widehat{T}_i^j, \widehat{M}_i^j \rangle, \widehat{P}_i^j \subset P_i^j \quad (2.20)$$

Поэлементное сравнение множеств  $X_{idi}^j$  и  $X_{negi}^j$  позволяет определить конкретные возмущения и причины, приведшие к НРЭ. Очевидно, что

$$X_{Negi}^j = X_{idi}^j \cap \Omega^x = X_{idi}^j \cap (\Omega^a \cup \Omega^f), \quad (2.21)$$

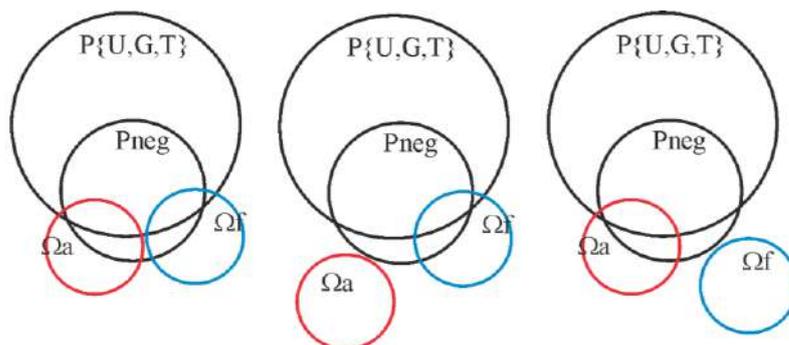


Рисунок 2.5 – Иллюстрация нарушения ШРЭ

Задача идентификации может не иметь, иметь одно или несколько решений. Первый и последний случаи характерны, когда области  $f_i \in \Omega^f$  и  $\Delta a_{ij} \in \Omega^a$ , определенные для конкретных условий производства, или ММЭТО заданы недостаточно корректно. Наличие нескольких решений свойственно и задачам, когда вариантов условий функционирования системы, заданных УП, недостаточно для идентификации некоторых конкретных возмущений. Например, если в УП используется один инструмент, то невозможно ответить на вопрос, что явилось причиной НРЭ износ инструмента или отклонения прочностных характеристик обрабатываемого материала.

### 2.3. Математическая модель энергопотребления ТО ПМП

Типовым представителем ТО ПМП являются металлорежущие станки (МРС), ведущее место среди них занимают многоцелевые станки (МЦС) как наиболее функционально совершенные и энерговооруженные. Типовая компоновка таких станков фрезерно-расточной группы приведена на рис. 2.6 [118, 119].

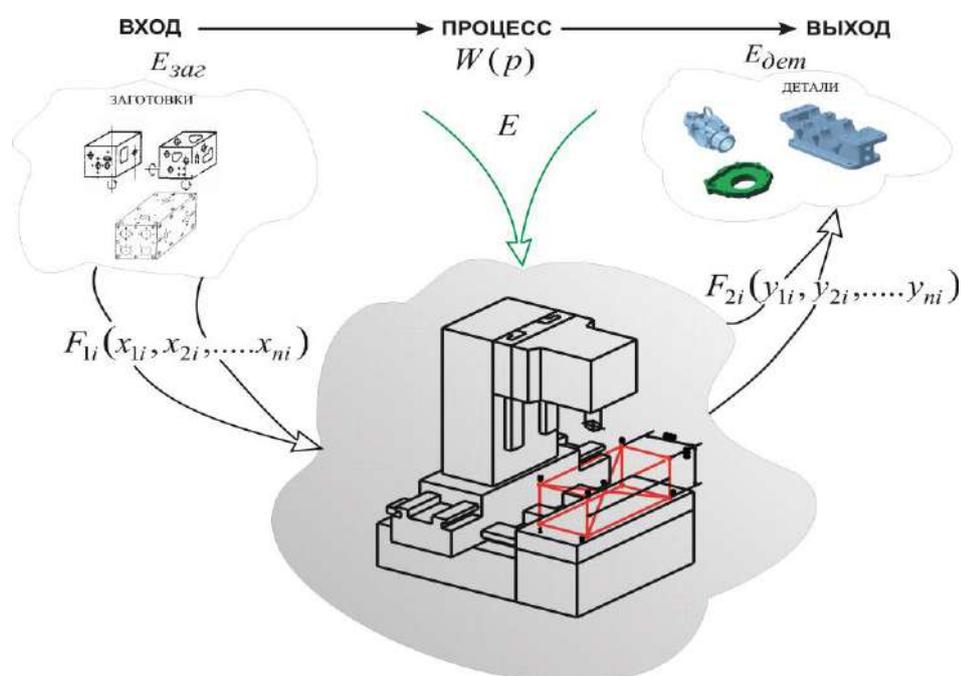


Рисунок 2.6 – Типовая компоновочная схема ТО ПМП

Кроме двигателей формообразующего движения в них используется большое число вспомогательных механизмов и устройств, также являющихся

потребителями энергии: механизм индексации магазина инструментов, автооператор смены инструмента, насос подачи СОЖ, устройства фиксации инструмента в шпинделе, конвейер удаления стружки, освещение, вентиляция, блок питания ЧПУ и т.п. [70, 109].

Нарушение режима энергопотребления ТО в большинстве случаев связано с флуктуацией его параметров или возмущений по входу и может быть выражено реакцией на них линейного нестационарного динамического объекта. Учитывая, что ТО оснащено десятками и более приводов различного функционального назначения, модель его энергопотребления описана системой линейных неоднородных дифференциальных уравнений с использованием блочных матриц:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{X}}(t) &= [\mathbf{A} + \boldsymbol{\alpha}(t)]\mathbf{X}(t) + [\mathbf{B} + \boldsymbol{\beta}(t)]\mathbf{U}(t) + \mathbf{G}\mathbf{W}(t); \\ \mathbf{Y}(t) &= \mathbf{C}\mathbf{X}(t); \end{aligned} \quad (2.22)$$

$$\mathbf{X} = (\mathbf{X}_j)_{j=1}^{n,1}; \mathbf{U} = (\mathbf{U}_j)_{j=1}^{n,1}; \mathbf{A} = (\mathbf{A}_{ji})_{j=1,i=1}^{n,n}; \mathbf{B} = \text{diag}(\mathbf{B}_{ji})_{j=1,i=1}^{n,n};$$

$$\mathbf{C} = \text{diag}(\mathbf{C}_{ji})_{j=1,i=1}^{n_c,n}; \mathbf{G} = \text{diag}(\mathbf{G}_{ji})_{j=1,i=1}^{n_g,n}$$

$$x_i(t_0) \in X_0, x_i \in \Omega^x, u_i \in \Omega^u,$$

где  $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{G}$  - блочные матрицы параметров состояния, управления, наблюдения и влияния входных возмущений, соответственно;  $\mathbf{Y}(t), \mathbf{X}(t), \mathbf{U}(t), \mathbf{W}(t)$  - векторы выходов, состояния, управления, наблюдения и входных возмущений, соответственно;  $n$  - общее число приводов в ТО;  $\boldsymbol{\alpha}(t), \boldsymbol{\beta}(t) \in \Omega^\alpha$  - блочные матрицы параметрических возмущений, имеющие размерности  $n \times n$ ;  $\Omega^\alpha$  - замкнутое ограниченное множество, содержит отклонения параметров, подверженных неконтролируемым возмущениям;  $X_0$  - координаты состояния системы в начальный момент времени  $t_0$ ;  $\Omega^x, \Omega^u$  - множества возможных состояний и управляющих воздействий соответственно;  $\mathbf{Y}_j, \mathbf{X}_j, \mathbf{U}_j, \mathbf{W}_j, \mathbf{B}_{jj}, \mathbf{G}_{jj}, \mathbf{C}_{jj}$ , - векторы выходов, состояний, управляющих воздействий и возмущений, матрицы управлений, возмущений и наблюдения  $j$ -го привода, соответственно;  $\mathbf{A}_{ij}$  - матрица состояний  $j$ -го привода, при  $i = j$  матрица параметров  $j$ -го привода, при  $i \neq j$  матрица коэффициентов взаимного влияния приводов друг на друга через нагрузку.

В ММЭТО приводы описаны дифференциальным уравнением 2-го порядка. Тогда для  $p$ -го привода, полагая  $j = 2p - 1$ , диагональные блоки приведенных выше матриц и блоки векторов примут вид

$$\dot{\mathbf{X}}_j = \mathbf{A}_{jj} \mathbf{X}_j + \mathbf{B}_{jj} \mathbf{U}_j; \quad (2.23)$$

$$\dot{\mathbf{X}}_j = \begin{Bmatrix} \dot{x}_j \\ \dot{x}_{(j+1)} \end{Bmatrix}; \quad \mathbf{X}_j = \begin{Bmatrix} x_j \\ x_{(j+1)} \end{Bmatrix}; \quad \mathbf{U}_j = \begin{Bmatrix} u_j \\ u_{(j+1)} \end{Bmatrix}; \quad (2.24)$$

$$\mathbf{A}_{jj} = \begin{Bmatrix} a_{jj} & a_{j(j+1)} \\ a_{(j+1)j} & a_{(j+1)(j+1)} \end{Bmatrix}; \quad \mathbf{B}_{jj} = \begin{Bmatrix} b_{jj} & 0 \\ 0 & b_{(j+1)(j+1)} \end{Bmatrix}, \quad (2.25)$$

где  $x_j$  - скорость выходного звена  $p$ -го привода;  $x_{(j+1)}$  - усилие развиваемое  $p$ -ым приводом.

Значения элементов приведенных матриц определяются характеристиками приводов и зависят от их функционального назначения.

Основную нагрузку в процессе обработки заготовок испытывают приводы формообразующих движений [113, 114]. Они делятся на приводы подачи и главного движения и являются главными потребителями энергии. Тип и модель ТО определяют их общее число, и число приводов, одновременно участвующих в процессе формоизменения заготовок. Типовые структурные схемы управления этими приводами приведены на рис. 2.7 [101, 109].

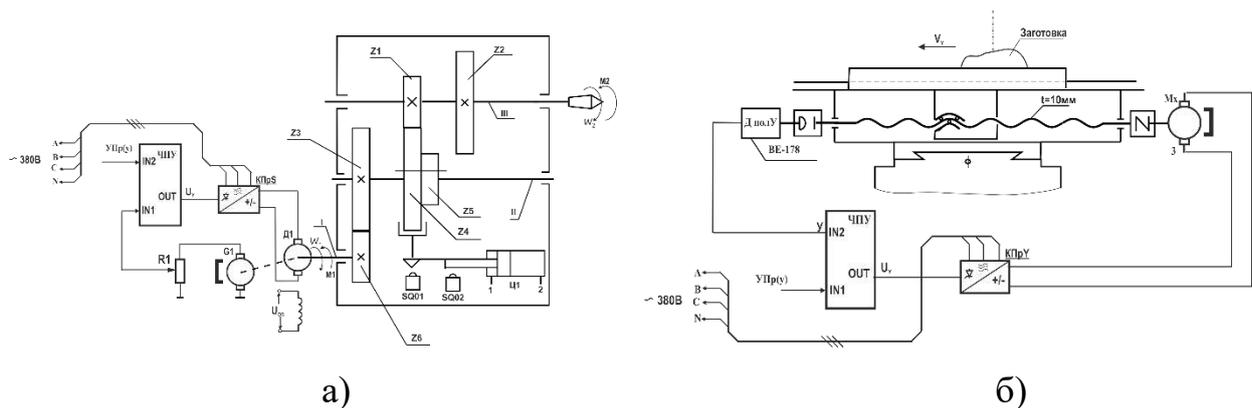


Рисунок 2.7 – Типовые структурные схемы управления приводами ТО: а) – главного движения; б) – подачи

Поскольку формирование свойств обрабатываемой поверхности на значительной части траекторий движения ИО определяется именно скоростью их движения, то приводы будем рассматривать как регуляторы скорости. Для их

описания используем известные системы линейных дифференциальными уравнениями [101]:

а) для привода вращения

$$\begin{aligned}\dot{\omega} &= -\frac{h_d + a_{cutS}}{J_{np}} \omega + \frac{1}{J_{np}} M + -\frac{1}{J_{np}} (M_0 + M_{mp}) ; \\ \dot{M} &= -\frac{C_E C_M}{L_d} \omega - \frac{R_d}{L_d} M + \frac{C_M}{L_d} K_n U_3 ,\end{aligned}\quad (2.26)$$

б) для линейного привода

$$\begin{aligned}\dot{V} &= -\frac{h_d + a_{cutV}}{m_{np}} V + \frac{1}{m_{np}} F + -\frac{1}{m_{np}} (F_0 + F_{mp}) \pm g) \\ \dot{F} &= -\left(\frac{2\pi}{h}\right)^2 \frac{C_E C_M}{L_d} V - \frac{R_d}{L_d} F + \frac{2\pi C_M}{h L_d} K_n U_3 ; \\ F_H &= F_0 + a_{cutV} \cdot V ; \quad M_H = M_0 + a_{cutS} \cdot \omega ,\end{aligned}\quad (2.27)$$

где  $\omega, M, V, F$  – круговая частота, момент, линейная скорость и усилие на выходном звене привода;  $F_H, M_H$  – линеаризованные функции нагрузки (усилия и момента соответственно), возникающих в процессе взаимодействия инструмента с заготовкой;  $K_n$  – коэффициент преобразования усилителя мощности привода;  $U_3$  – задающее напряжение, определяющее скорость выходного звена привода;  $R_d$  – полное активное сопротивление цепи якоря, Ом;  $L_d$  – индуктивность якоря, Гн;  $J_{np}$  – момент инерции подвижных элементов приведенный к валу двигателя, кг м<sup>2</sup>;  $C_E, C_M$  – электрическая и механическая постоянные двигателя;  $h_d$  – демпфирование, Нс/м;  $h$  – шаг ходового винта линейного привода, м;  $m_{np}$  – приведенная масса подвижных элементов, кг;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $F_{mp}, M_{mp}$  – сила и момент трения в направляющих подвижных элементов;  $a_{cutS_p}, M_{0_p}, a_{cutV_p}, F_{0_p}$  – динамические и статические составляющие сил взаимодействия инструмента и заготовки при вращательном и линейном перемещениях соответственно.

Тогда параметры матриц и векторов (2.23) ... (2.25) определяются коэффициентами, приведенными в таблице 2.1.

Полезная мощность, выделенная на выходном звене  $p$ -го привода, в соответствии с (2.7) и (2.8)

$$\bar{N}_{u_p}(t) = x_j(t) \cdot x_{(j+1)}(t) = f(\{\bar{x}_m(t)\}) . \quad (2.28)$$

Тогда полная мощность, потребляемая  $p$ -ым приводом

$$\bar{N}_{f_p}(t) = \frac{\bar{N}_{u_p}(t)}{\eta_p(x_j, x_{(j+1)})} , \quad (2.29)$$

где  $\eta(x_j, x_{(j+1)})$  – зависимость КПД от скорости и нагрузки на привод.

Относительные значения потерь мощности в приводе

$$\Delta \hat{N}_p(t) = 1 + \frac{1}{\eta_p(x_j, x_{(j+1)})} , \quad (2.30)$$

где  $\eta_p(x_j, x_{(j+1)})$  – КПД  $p$ -го привода.

Таблица 2.1 – Параметры матриц модели привода

Матрица	Линейный привод	Привод поворота
$\mathbf{A}_{jj}$	$a_{jj} = \frac{-(a_{cutF_p} + h_{d_p})}{m_{np_p}}; a_{j(j+1)} = \frac{1}{m_{np_p}}$ $a_{(j+1)j} = -\frac{C_{E_p} C_{M_p}}{L_{d_p}} \left(\frac{2\pi}{h_p}\right)^2; a_{(j+1)(j+1)} = -\frac{R_{d_p}}{L_{d_p}}$	$a_{jj} = \frac{-(a_{cutS_p} + h_{d_p})}{J_{np_p}}; a_{j(j+1)} = \frac{1}{J_{np_p}}$ $a_{(j+1)j} = -\frac{C_{E_p} C_{M_p}}{L_{d_p}}; a_{(j+1)(j+1)} = -\frac{R_{d_p}}{L_{d_p}}$
$\mathbf{B}_{jj}$	$b_{jj} = -\frac{1}{m_{np_p}}; b_{(j+1)(j+1)} = \frac{K_{n_p} C_{M_p} 2\pi}{h_p \cdot L_{d_p}}$	$b_{jj} = -\frac{1}{J_{np_p}}; b_{(j+1)(j+1)} = \frac{K_{n_p} C_{M_p}}{L_{d_p}}$
$\mathbf{U}_j$	$u_j = F_{np_p} + F_{0_p} \pm m_{np_p} g; u_{(j+1)} = u_{b_p}$	$u_j = M_{np_p} + M_{0_p}; u_{(j+1)} = u_{b_p}$

Анализ режимов работы ТО показал, что технологически востребованными являются холостые хода (ХХ) (относительно быстрые перемещения с  $\hat{x}_j > 0.6...1.0$  и незначительной нагрузкой  $\hat{x}_{(j+1)} < 0.08..0.12$ ) и рабочие хода (РХ) (медленные перемещения  $\hat{x}_j < 0.05...0.2$  или их отсутствие  $\hat{x}_j = 0$  с воздействием относительно больших нагрузок  $x_{(j+1)} > 0.1..0.8$ ). Известные зависимости  $\eta_p(\hat{x}_j, \hat{x}_{(j+1)})$  [103, 120], к сожалению, не позволяют оценить потери мощности в двигателях в режимах удержания ИО в заданой позиции  $\hat{x}_j = 0$  при широком диапазоне изменения нагрузок. Для учета этих часто используемых режимов предложено ввести в них псевдо частоту ( $\hat{x}_{j0}$ ), позволившую моделировать эти условия работы приводов. Тогда известные зависимости  $\eta_p(\hat{x}_j, \hat{x}_{(j+1)})$  [103, 120] примут следующий вид:

- для двигателя поточного тока с независимым возбуждением, асинхронного двигателя с частотным регулированием (с законом управления  $\Phi = \text{const}$ ) и синхронного двигателя с постоянными магнитами при скалярном частотном управлении

$$\Delta \hat{N}_j = \frac{(a(\hat{x}_j + \hat{x}_{j0})^2 + \hat{x}_{(j+1)}^2)(1 - \eta_{nj})}{\eta_{nj}(a+1)(\hat{x}_j + \hat{x}_{j0}) \cdot \hat{x}_{(j+1)}}, \quad (2.31)$$

- для синхронного двигателя с независимым возбуждением при скалярном частотном управлении

$$\Delta \hat{N}_p = \left( \frac{\Delta \hat{P}_b + \Delta \hat{P}_{cm}(\hat{x}_j + \hat{x}_{j0})^{1.5} + \Delta \hat{P}_{mx}(\hat{x}_j + \hat{x}_{j0})^2}{(\hat{x}_j + \hat{x}_{j0}) \cdot \hat{x}_{(j+1)}} + \frac{\Delta \hat{P}_{\approx}}{(\hat{x}_j + \hat{x}_{j0}) \cdot \hat{x}_{(j+1)}} \left( \frac{\sin^2(\hat{x}_{(j+1)} \theta_{el_n})}{X_{1q}^{*2}} + \frac{[k_1 - \cos(\hat{x}_{(j+1)} \theta_{el_n})]^2}{X_{1d}^{*2}} \right) \right), \quad (2.32)$$

$$X_{1q}^* = \frac{I_{1n} \cdot X_{1qn}}{U_{1n}}; \quad X_{1d}^* = \frac{I_{1n} \cdot X_{1dn}}{U_{1n}}; \quad k_1 = \frac{E_{1n}}{U_{1n}}; \quad a = \frac{\Delta P_{=n}}{\Delta P_{\approx n}},$$

где  $\eta_{nj}$  – номинальное значение КПД;  $a$  – соотношение номинальных значений постоянных и переменных потерь;  $\Delta \hat{P}_b, \Delta \hat{P}_{cm}, \Delta \hat{P}_{mx}, \Delta \hat{P}_{\approx}$  – относительные номинальные значения потерь мощности на возбуждение, в стали, механических и переменных соответственно;  $X_{1q}^*, X_{1d}^*$  – относительные индуктивные сопротивления двигателя по осям  $q$  и  $d$  соответственно;  $\theta_{el_n}, k_1$  – номинальное значение электрического угла нагрузки и относительное номинальное действующее значение фазной ЭДС взаимоиндукции двигателя;  $U_{1n}, I_{1n}, E_{1n}$  – действующие номинальные значения фазного напряжения статора, тока и фазной ЭДС взаимоиндукции;  $X_{1q}, X_{1d}$  – индуктивные сопротивления двигателя по осям  $d$ – $q$ .

Анализ приведенных зависимостей показывает, что не зависимо от типа привода и способа управления, относительные потери мощности на ХХ и в заторможенном режиме существенно превышают номинальные их значения.

Известно, что время работы каждого привода формообразующих движений МЦС в цикле обработки конкретных деталей оценивается единицами процентов

[119], причем, чем выше сложность деталей, тем этот процент ниже. При этом возрастает время работы вспомогательных механизмов, а, следовательно, и их энергопотребление.

Полная мощность, потребляемая ТО, в целом

$$\bar{N}_{f_{TO}}(t) = \sum_{p=1}^n \bar{N}_{f_p}(t) + \sum_{l=1}^{n_{bc}} \bar{N}_{bc_l}(t), \quad (2.32)$$

где  $\bar{N}_{bc_l}$  – мощность, потребляемая  $l$ -ым вспомогательным механизмом.

#### 2.4 Алгоритм идентификации источников и причин нарушения штатных режимов энергопотребления

Процесс идентификации ИПНЭ предполагает предварительную систематизацию их связи со структурой ТО, режимами функционирования и возможными возмущениями (2.21). В соответствии с предложенной в п. 2.2 структурой ИИУС ЭМ алгоритм идентификации ИПНЭ реализует пошаговый процесс поиска времени, источника и причины, вызвавших НРЭ. Алгоритм приведен на блок-схеме (см. рис 2.8-2.10).

Шаг 1. На основании анализа измерительной информации о потребляемой мощности  $\tilde{N}_{f_{TO}}(t)$  БООРЭ с помощью критерия (2.17) регистрирует момент времени  $t = t_\delta$  выхода интегральных его значений за допустимые границы  $(1 \pm \delta) \cdot \bar{E}_{f_{TO}}(t_\delta)$  на уровне ТО и формирует массив измерительной информации из диаграмм энергопотребления приводов ТО и режимов их функционирования (диаграмм скоростей приводов)  $\{\tilde{N}_{xi}, \tilde{F}_{xi}\}, t \in 0, t_\delta$  для ретроспективного анализа;

Шаг 2. В результате ретроспективного анализа массива измерительной информации  $\{\tilde{N}_{xi}, \tilde{F}_{xi}\}, t \in 0, t_\delta$  БООРЭ регистрирует моменты времени  $t_{\delta_p} \leq t_\delta$  выхода интегральных значений реального энергопотребления каждого привода ТО за допустимые границы  $(1 \pm \delta_p) \cdot \bar{E}_{f_p}(t)$  и характер нарушения (выход за верхнюю или нижнюю границы);

Шаг 3. В результате анализа массива  $\{\tilde{N}_{xi}, \tilde{F}_{xi}\}, t \in 0, t_\delta$  БООРЭ регистрирует моменты времени  $t_{\Delta_p} \leq t_{\delta_p}$  выхода мгновенного значения  $\tilde{N}_{f_p}(t)$  реального энергопотребления каждого из приводов ТО за допустимые границы  $(1 \pm \Delta_p) \cdot \bar{N}_{f_p}(t)$  и значения этих отклонений;

Шаг 4. На основании критерия (2.17) и анализа связи ИПНЭ со структурой ТО, режимами функционирования и возможными возмущениями БФВ генерирует векторы параметрических и входных возмущений на ММЭТО, приводя моделируемый процесс энергопотребления в соответствие с реальным. Таким образом определяются области наиболее вероятных входных и параметрических возмущений, приведших к обнаруженному НРЭ,  $\Delta f_i \in \Omega^f, \Delta a_i \in \Omega^a$

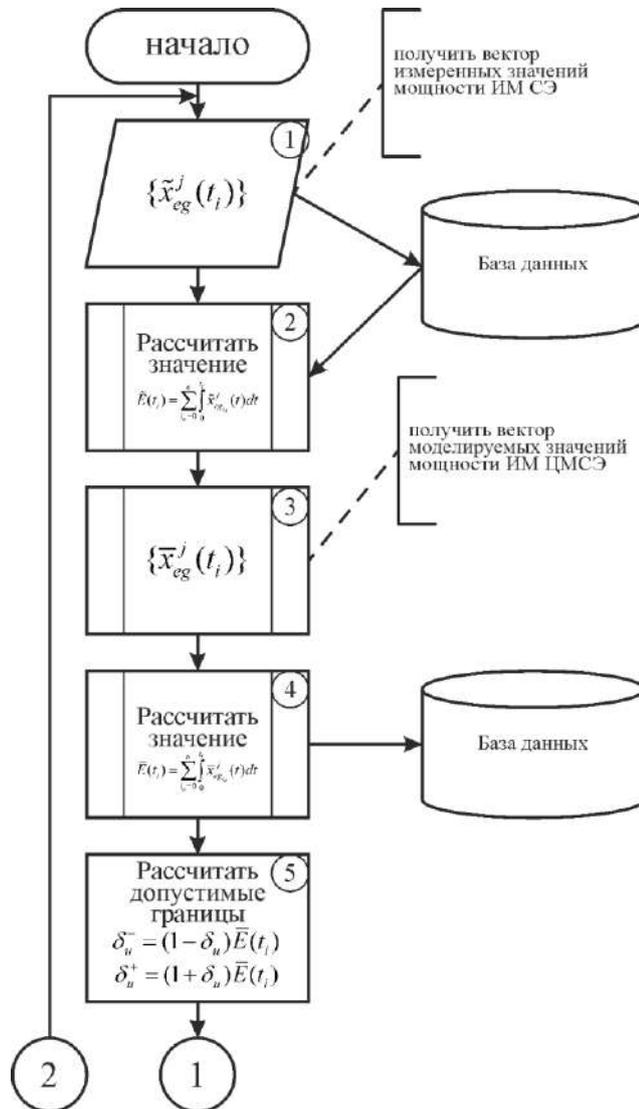


Рисунок 2.8 – Алгоритм идентификации источников и причин нарушения штатных режимов энергопотребления

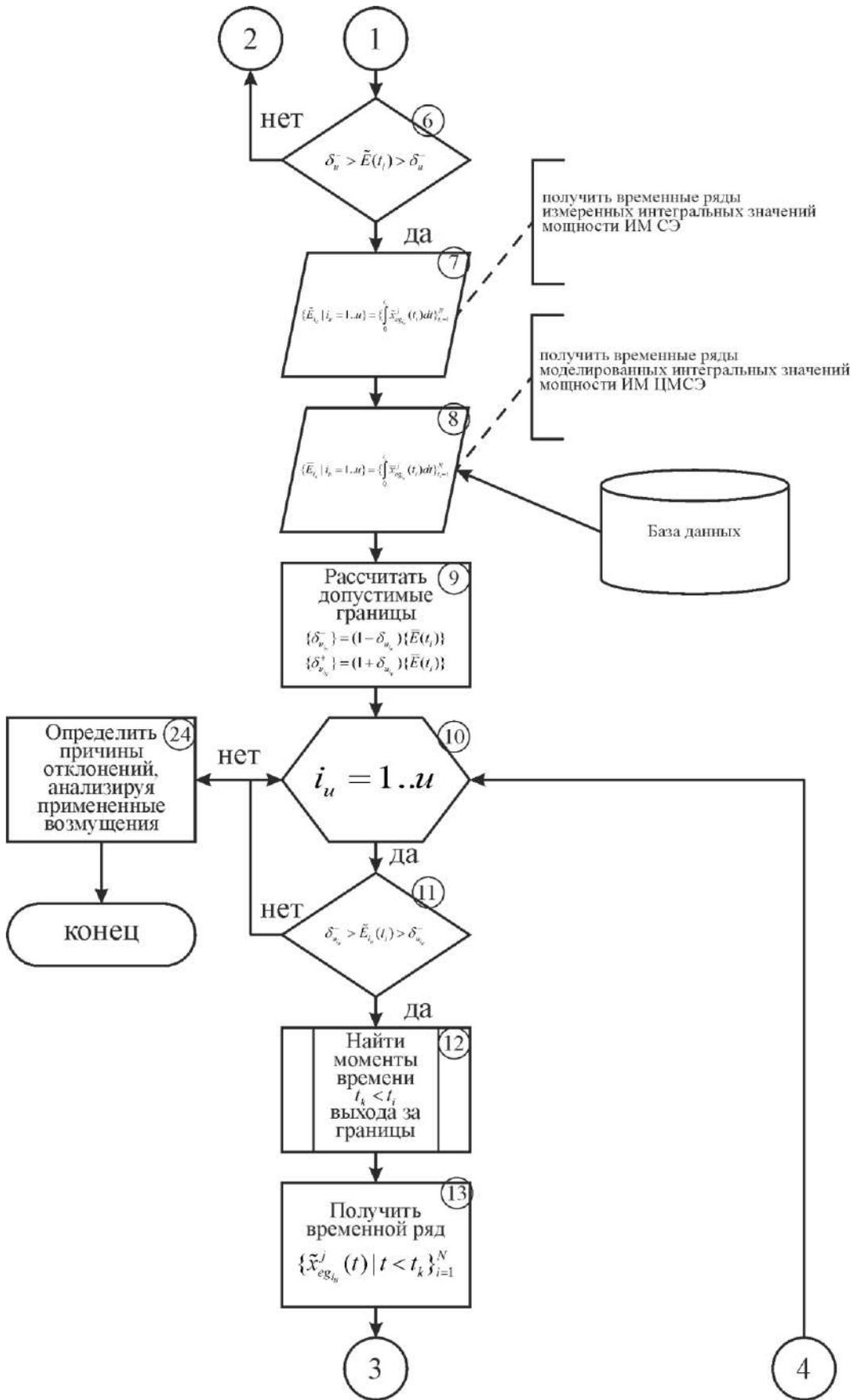


Рисунок 2.9 – Алгоритм идентификации источников и причин нарушения штатных режимов энергопотребления (продолжение)

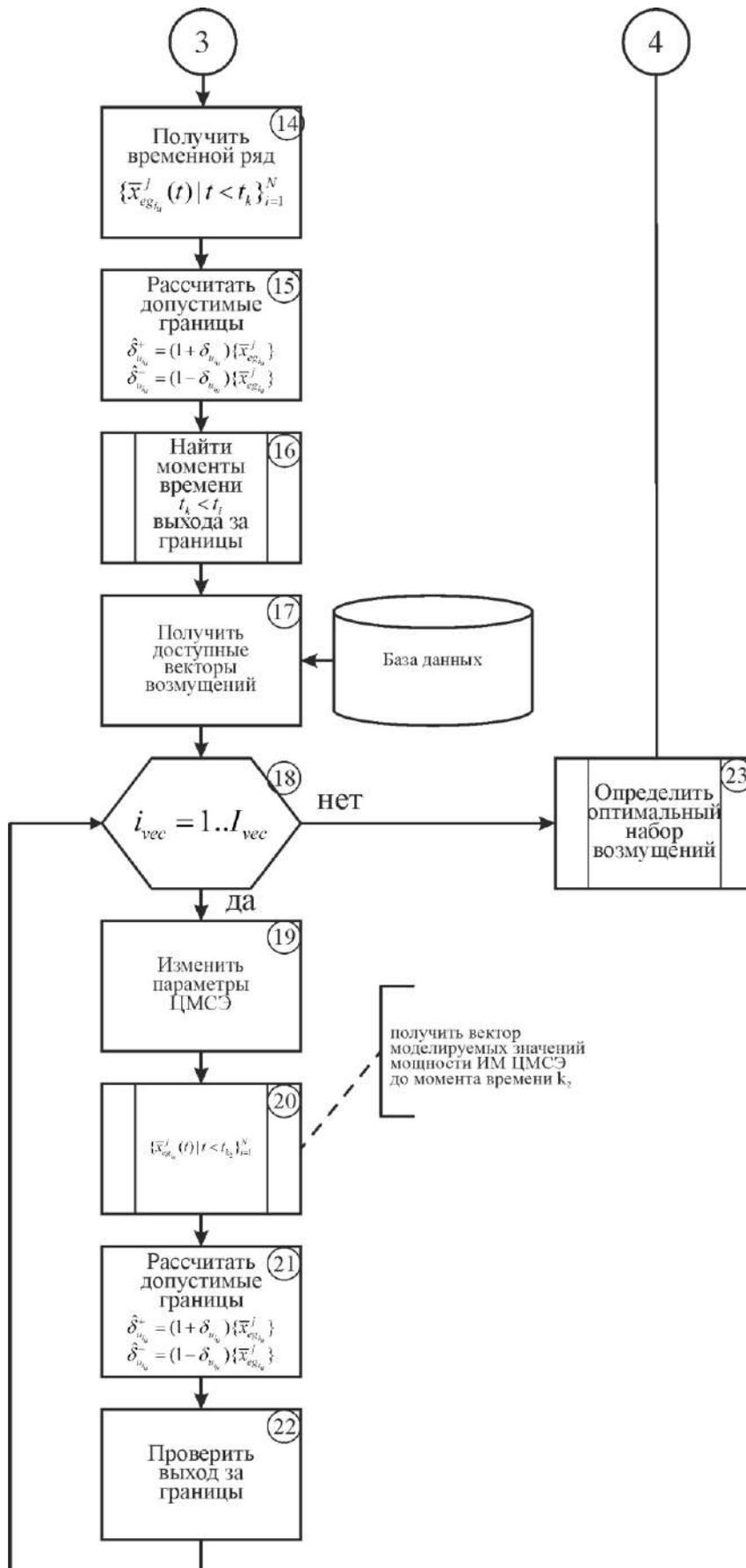


Рисунок 2.10 – Алгоритм идентификации источников и причин нарушения штатных режимов энергопотребления (продолжение)

Шаг 5. В результате поэлементного сравнения множеств параметров  $X_{idi}^j$ , определяющих ШРЭ, и параметров  $X_{Negi}^j$ , позволивших идентифицировать обнаруженное НРЭ, БИНЭ конкретизирует источники и причины, приведшие к НРЭ. ( $X_{Negi}^j = X_{idi}^j \cap \Omega^x = X_{idi}^j \cap (\Omega^{\tilde{a}} \cup \Omega^{\tilde{f}})$ )

### Выводы по главе 2

- предложена структура ИИУС ЭМ, отличающаяся от известных тем, что в ней использованы ММЭТО, формирующие характеристики штатного режима энергопотребления в заданных условиях функционирования ТО, и позволяющая на основании анализа результатов их сравнения с информацией о энергопотреблении, поступающей с первичных измерительных приборов ИИУС, конкретизировать рекомендации по принятию решений о проведении энергосберегающих мероприятий;
- разработаны ММЭТО, отличающиеся тем, что в составе ИИУС ЭМ выполняют функции преобразования информации, регламентирующей заданный режим функционирования реального ТО, в расчетные значения потребляемой мощности, позволяющие формировать характеристики штатных режимов его энергопотребления;
- формализован критерий НРЭ, отличающийся тем, что основан на сравнении текущих мгновенных и интегральных характеристик энергопотребления с штатными их значениями, позволяющий ИИУС ЭМ идентифицировать источники и причины, вызвавшего нарушение;
- предложен алгоритм идентификации ИПНЭ, отличающийся тем, что основан на генерировании в ИИУС ЭМ векторов параметрических и входных возмущений на ММЭТО, приводящих моделируемый процесс в соответствии с реальным, позволяющий локализовать источник и возможную причину отклонения режима энергопотребления ТО, создавая условия для принятия адекватных решений о проведении энергосберегающих мероприятий.

### ГЛАВА 3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ И УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА СТРУКТУРНЫХ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ПМП

#### 3.1 Модификация ИИУС ЭМ для структурных подразделений ПМП

Основными структурными подразделениями современных ПМП являются участки и цеха механической обработки. Объектами энергетического мониторинга в соответствии с п.1.2 и п. 2.2 в них являются технологическое и вспомогательное оборудование (средства и системы транспортирования и хранения), системы обеспечения функционирования заданных ТП (теплоснабжение, вентиляция, освещение и т.п.).

В соответствии с п. 1.1, 1.3, 2.1 с точки зрения оценки эффективности потребления энергии технологического назначения интерес представляют следующие иерархические уровни ПМП: воздействие на материальный поток в соответствии ТП - определяет полезную работу ( $j=1$ ); приводы, несущие режущий инструмент, воздействующий на заготовку ( $j=2$ ); ТО, объединяющие их методом и способом обработки и реализующее ТП или его часть ( $j=3$ ); структурное подразделение (участок, цех), в котором осуществляется законченный технологический процесс изготовления конкретной номенклатуры деталей заданного количества ( $j=4$ ). В процессе функционирования структурного подразделения каждый ее уровень характеризуется определенными потерями энергии.

Как было отмечено в п.2.3 типовым представителем ТО современных ПМП являются МЦС. Они отличаются друг от друга способом формообразования, инструментом, видом формообразующих движений, их количеством и числом одновременно управляемых координат (3-5 и более) и делятся на станки фрезерной, токарной и др. групп. Отмеченные факторы определяют не только их технологические возможности, но и энерговооружённость (установленную мощность), а, следовательно, интенсивность энергопотребления. Для энергетического мониторинга наиболее важными среди них являются количество

приводов, их мощности и алгоритм выполнения полезной работы (пространственно-временное соотношение контурной подачи, скорости резания и толщины снимаемого материала- припуска) [112, 113, 114].

В парке станков ПМП ведущее место по количеству занимают МЦС фрезерно-расточной группы (42-50%) [118, 119], причем наибольшее число из них составляют 3-хкоординатные станки. Типовая схема управления формообразующими движениями МЦС фрезерно-расточной группы вертикальной компоновки приведена на рис.3.1.

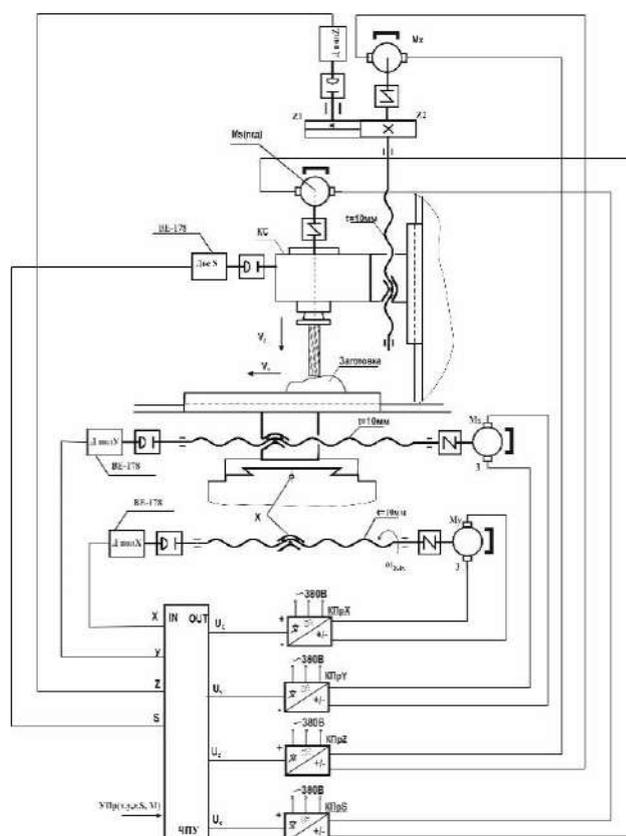


Рисунок 3.1 – Типовая схема управления формообразующими движениями МЦС фрезерно-расточной группы

Приводы по координатам  $X$ ,  $Y$  (двигатели  $M_x$ ,  $M_y$ ) перемещают заготовку, привод по координате  $Z$  (двигатель  $M_z$ ) перемещает режущий инструмент, обеспечивая необходимое направление и величину контурной подачи ( $\vec{F}$ ); привод главного движения (двигатель  $M_s$ ) вращает инструмент, создавая необходимую скорость резания ( $V$ ). Как было отмечено в п. 2.3 эти станки имеют большое число вспомогательных приводов (на рис.3.1 не показаны) их суммарная установленная мощность может достигать 10...15% [70]. К этому следует добавить, что машинное

время обработки заготовок на таком оборудовании составляет всего 5-20% от времени пребывания заготовки на станке [118]. Остальное время он находится в состоянии «готовность» и потребляет достаточно большую мощность - 15-35% от общей установленной мощности [70]. Вспомогательные узлы станка потребляют больше энергии, чем энергия, используемая на режимах резания [121].

Следует отметить, что компоновка станка оказывает ограниченное влияние на его энергопотребление. Токарные многоцелевые станки, позволяющие выполнять операции фрезерования, имеют также три управляемые координаты. Они отличаются тем, что линейная координата заменена круговой. Как объекты энергетического мониторинга они эквивалентны МЦС фрезерной группы. Применение в них револьверных головок вместо инструментальных магазинов позволяет сократить потери энергии в циклах смены инструментов.

В соответствии с рассмотренной в главе 1 ИИУС ЭМ (рис. 1.7) и предложенной в п. 2.2 ее модификацией (рис. 2.3) детализация этой системы для структурного подразделения, представляющего 4-й иерархический уровень ПМП ( $j=4$  участок, цех) и определяемого реализуемым ТП, характеристиками заготовок, видом и количеством используемого оборудования, связана с параметризацией моделей ТО (2.22) ... (2.30) (см. рис.3.2). На рисунке отражены:

- иерархический уровень ИИУС ЭМ ПМП (ЛЦОИ), куда интегрированы разработанные модули идентификации ИПНЭ (см. рис. 3.2);
- дополнительные связи с уровнем ПИП, для измерения энергопотребления элементами и ТО в целом;
- дополнительные связи систем ЧПУ ТО с уровнем ЛЦОИ, для получения информации о технологических параметрах функционирования ТО;
- дополнительные связи уровня ЛЦОИ с подсистемой SCADA ИС ПМП, для получения информации о характеристиках обрабатываемых заготовок.

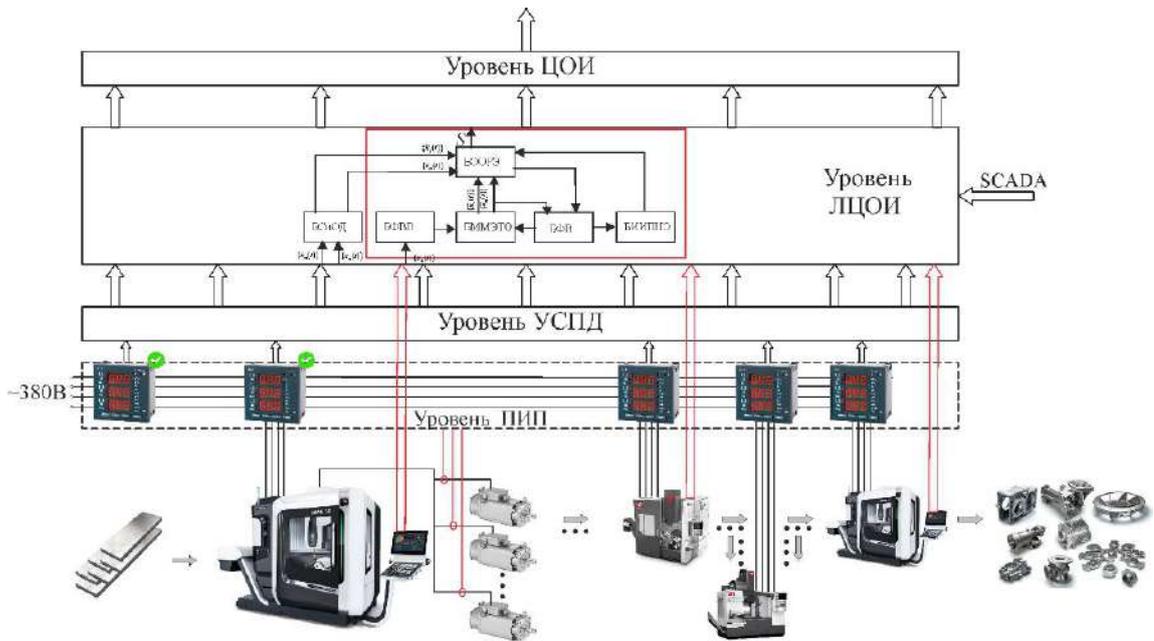


Рисунок 3.2 – Структурная схема ИИУС ЭМ для участка МЦС ПМП

Потоки информации на этом уровне иерархии описываются векторами параметров состояния, управляющих и возмущающих воздействий для каждого  $i$ -го элемента ТО структурного подразделения с  $i = \overline{1, n}$ , где  $n$  – число МЦС в подразделении. С точки зрения блочного построения удобно объединить управления и детерминированные возмущения в один вектор входных воздействий.

$$\mathbf{U}_i(\mathbf{t}) = \left\| \begin{matrix} u_x & P_{nx} & u_y & P_{ny} & u_z & P_{nz} & u_s^j & P_{ns} \end{matrix} \right\|^T; \quad (3.1)$$

$$\mathbf{X}_i(\mathbf{t}) = \left\| \begin{matrix} F_x & P_x & F_y & P_y & F_z & P_z & \omega & M \end{matrix} \right\|^T,$$

где  $u_\lambda, P_{n\lambda}$  – команда управления скоростью перемещения и нагрузка на привод по  $\lambda$ -ой координатной оси, где  $\lambda = x, y, z, s$ ;  $F_\lambda, P_{n\lambda}, \omega, M$  – скорость перемещения и усилие развиваемое на выходе привода по  $\lambda$ -ой координатной оси в  $i$ -ом МЦС.

Большинство стационарных параметров ТО, оказывающих влияние на энергопотребление, определяются типоразмером и конструктивными особенностями оборудования. Они влияют на временные характеристики перемещений исполнительных механизмов станка на холостых ходах и, как следствие, на потери энергии.

Коэффициенты матрицы состояний  $\mathbf{A}_i$  и матрицы управления  $\mathbf{B}_i$  выражаются через электрические и механические параметры приводов, приведенные в таблице 2.1.

$$\mathbf{A}_i = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline a_{11} & a_{12} & 0 & a_{14} & 0 & a_{16} & 0 & a_{18} \\ \hline a_{21} & a_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & a_{32} & a_{33} & a_{34} & 0 & a_{36} & 0 & a_{38} \\ \hline 0 & 0 & a_{43} & a_{44} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & a_{52} & 0 & a_{54} & a_{55} & a_{56} & 0 & a_{58} \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & a_{65} & a_{66} & 0 & 0 \\ \hline 0 & a_{72} & 0 & a_{74} & 0 & a_{76} & a_{77} & a_{78} \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{87} & a_{88} \\ \hline \end{array}; \quad (3.2)$$

$$\mathbf{B}_i = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline b_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & b_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & b_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & b_{44} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & b_{55} & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_{66} & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_{77} & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_{88} \\ \hline \end{array}.$$

Будем полагать, что рассматриваемая динамическая система ТО (2.22) наблюдаема, то есть  $\mathbf{C}^j = \mathbf{E}_{8 \times 8}$ . Учитывая, что все приводы независимые, для обеспечения заданного качества процессов регулирования использованы матрицы обратных связей по координатам состояния (3.2), определяемые известными методами модального управления [122].

В соответствии с рекомендациями построения ИИУС ЭМ (глава 2) и структурой модели ТО (рис. 2.4) в качестве контролируемых параметров будем использовать потребляемую мощность приводов подач, главного движения и всего станка. Расчет потерь энергии в приводах будем производить по зависимости коэффициента полезного действия двигателя от силовых и скоростных характеристик нагрузки (2.31), (2.32) [103, 120]

$$K_{oci} = \left\| \begin{array}{cc|cc|cc|cc} k_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & k_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{44} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & k_{55} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{66} & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{77} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{88} \end{array} \right\| . \quad (3.3)$$

Для получения реальной информации о потерях энергии необходимо в зависимости от технических возможностей конкретного ТО установить в соответствующие цепи датчики мощности или использовать штатные каналы доступа к внутренней информации систем ЧПУ о нагрузках на приводы и потребляемую ими мощность [123, 124, 125]. Такими возможностями, в частности, с 2017г обладают системы ЧПУ OKUMA и DMG MORI [121].

Модель (3.1) ... (3.3) формирует штатный режим энергопотребления, представляющий собой диаграммы полезной и полной мощностей, потребляемой приводами МЦС.

БФВВ с помощью модуля анализа УП преобразует текст управляющей программы системы ЧПУ в команды управления приводами подач по координатам X, Y, Z и привода главного движения S, регламентируя режим их работы в течении всего ТП, реализуемого на данном станке при обработке конкретной детали. Таким образом, формируются векторы задания скоростей перемещения по координатным осям  $\vec{F}_X, \vec{F}_Y, \vec{F}_Z, \vec{F}_S$  и соответствующие управляющие воздействия  $u_X, u_Y, u_Z, u_S$ .

БООРЭ в соответствии с предложенным в пункте 2.2 критерием (2.17), в котором частными показателями являются потребляемые мощности  $N_X(t), N_Y(t), N_Z(t), N_S(t)$  и затраты энергии  $E_X(t), E_Y(t), E_Z(t), E_S(t)$  соответствующих приводов, определяет степень их соответствия ШРЭ. В относительных допустимых параметрах энергопотребления (2.16) вектор существенных свойств ТО описывается выражением:

$Y^j = \langle y_{x1}^j, y_{x2}^j, y_{y1}^j, y_{y2}^j, y_{z1}^j, y_{z2}^j, y_{s1}^j, y_{s2}^j \rangle$ , где числовые индексы означают относительные величины допустимых значений отклонения потребляемых: 1-мощности; 2-энергии соответствующих приводов.

При нарушении критерия (2.17), то есть при выходе частных показателей за допустимые пределы  $\delta_i^j$ , фиксируются момент времени, характер нарушения (выход за допустимые верхний или нижний пределы) и режимы функционирования МЦС ( $\vec{F}_x, \vec{F}_y, \vec{F}_z, \vec{F}_s$ ).

Задание в качестве объекта ЭМ участка МЦС позволяет произвести дальнейшую конкретизацию возмущений, приводящих к НРЭ, и их связей с режимами функционирования.

В частности, возмущения в условиях функционирования, перечисленные в 1.4, дополняются действиями операторов станка, приводящими к ошибкам в координатной привязке и базировании заготовки на станке, ручной коррекции скоростей подачи, смещению инструмента и приспособления [121].

Возмущения по компоновке, определяются не только изменением рабочего пространства, но и координатами расположения точек смены инструмента и инструментального магазина.

Анализ показывает, что они находят свое проявление в энергопотреблении только на определенных режимах работы приводов ТО, например, возмущения по:

- инструменту и обрабатываемому материалу – на РХ;
- компоновке, кинематической схеме и привязке заготовки – на ХХ;
- настройкам приводов – на РХ, ХХ и в покое (заторможенном режиме);
- базированию и закреплению заготовки – на РХ с учетом направления движения.

### 3.2 Информационное обеспечение энергетического мониторинга технологического оборудования ПМП

При реализации операций механической обработки всегда решается задача получения поверхностей заданных размеров и качества за определенное время.

Анализ факторов, определяющих размеры и точность, показывает, что влияние на них собственно воздействия может быть представлено только опосредовано через элементы ТО, исходную форму и материал заготовки [126, 127]. С целью анализа энергетических характеристик воздействия и формирования эталонного режима энергопотребления целесообразно предположить внешние для него условия идеальными. В этом случае основной его целью является образование новой поверхности с заданной скоростью и требуемым качеством [118]. Характеристики ТО ПМП и инструмента, форма и материал заготовки выступают как параметры системы [94, 95].

В соответствии с подходом, предложенным в пункте 2.1, динамика изменения свойств заготовки (размеров) (2.7) определяется через скорости образования поверхностей и скорости удаления материала. Они выражаются через параметры режимов обработки ( $R$ ): контурную подачу ( $F$ ), скорость резания ( $V$ ); геометрические параметры формообразования ( $G$ ): – глубину резания при точении ( $b$ ); ширину и глубину резания ( $B, H$ ) при фрезеровании. Приведенные параметры в соответствии с (2.5) относятся к режимным параметрам технологического оборудования.

Взаимосвязь этих параметров во многом определяется требованиями технического, технологического и экономического характера. Доминирующее значение среди них занимают режущие возможности инструмента, максимально допустимая скорость резания и требуемое значение шероховатости обработанной поверхности [96, 128, 129, 130].

С целью идентификации параметров режима обработки использован безразмерный  $\zeta$ -параметр с фиксированной шкалой, предложенный в работах [131, 132, 133]. Он характеризует степень интенсивности обработки, т. е. на сколько жесткие режимы могут быть реализованы с помощью конкретного воздействия в заданных условиях. Через этот параметр выражаются зависимости обратной подачи  $S=f_s(\zeta)$ , глубины  $b=f_b(\zeta)$  и  $H=f_h(\zeta)$ , ширины  $B=f_b(\zeta)$  и скорости резания  $V=f_v(\zeta)$ . Наиболее общими свойствами этих функций является то, что они непрерывны и возрастающие. Исключение составляет убывающая функция  $V=f_v(\zeta)$ .

При таком подходе полезная мощность, затрачиваемая на операции механической обработки в соответствии с (2.7), представлена линейной функцией от скорости образования новых поверхностей на заготовке, стружке и детали, и скорости удаления материала с заготовки

$$N(\xi) = A_N b(\xi)S(\xi) + B_N b(\xi)V(\xi) + E_N S(\xi)V(\xi) + D_N b(\xi)S(\xi)V(\xi), \quad (3.4)$$

где  $A_N, B_N, E_N, D_N$  – коэффициенты аппроксимации мощности резания.

Множители и коэффициенты модели и имеют следующие размерности и смысл: множитель  $b(\xi)S(\xi)$  – площадь плоскости сдвига в зоне разрушения,  $m^2$ ;  $b(\xi)V(\xi)$  – скорость образования боковой поверхности стружки,  $m^2/c$ ;  $S(\xi)V(\xi)$  – скорость образования поверхности на детали,  $m^2/c$ ;  $b(\xi)S(\xi)V(\xi)$  – скорость удаления объема материала с заготовки,  $m^3/c$ ;  $A_N$  – удельная мощность образования плоскостей сдвига,  $Дж/(c \cdot m^2)$ ;  $B_N$  – удельная энергия образования боковой поверхности стружки,  $Дж/m^2$ ;  $E_N$  – удельная энергия образования поверхности детали,  $Дж/m^2$ ;  $D_N$  – удельная энергия изменения объема заготовки,  $Дж/m^3$ .

Для получения параметров  $A_N, B_N, E_N, D_N$  модели (3.4) использован метод наименьших квадратов. Целевая функция выражена следующим образом:

$$\Phi(A_N, B_N, E_N, D_N) = \sum_{\xi=0}^{100} \left( \frac{N(\xi) - N_{ex}(\xi)}{N_{ex}(\xi)} \right)^2, \quad (3.5)$$

где  $N_{ex}(\xi)$  – эмпирическая зависимость мощности резания [93].

Эмпирические зависимость мощности от режимов резания [93]:

- при точении  $N_{ex}(\xi) = C_{NT} \cdot b(\xi)^x \cdot S(\xi)^y \cdot V(\xi)^n \cdot (75 / \sigma_{ep})^m$ ;

- при фрезеровании  $N_{ex}(\xi) = C_{NF} \cdot H^{pH}(\xi) \cdot S_z^{ps}(\xi) \cdot z^{pz*} \cdot B^{pB}(\xi) \cdot D_f^{pD} \cdot V(\xi)$ , (3.6)

где  $C_{NT}, C_{NF}, x, y, n, m, pb, ps, pz, pB, pD$  – коэффициенты и показатели степени эмпирических зависимостей;  $\sigma_{ep}$  – предел прочности обрабатываемого материала;  $z, D_f$  – число зубьев и диаметр фрезы.

Для обобщения (3.4) на фрезерование в (3.6) сделаны следующие подстановки  $C = C_0 \cdot D_f^{(pB-pD)} \cdot (1 - \cos \psi_p) \cdot z^{(pz-ps)}$ ;  $S(\xi) = (S_z(\xi) \cdot z)^{ps}$ ;

$b(\xi) = H(\xi)$ ;  $S(\xi) = (S_z(\xi) \cdot z)^{ps}$ , где  $\psi_p = \arccos\left(1 - \frac{2B}{D_f}\right)$  – угол контакта фрезы с заготовкой.

При использовании (3.4) для фрезерования предложено считать, что  $b(p) = H(p) + D_f \psi$ , где  $\psi = \arccos\left(1 - \frac{2B}{D_f}\right)$  – угол контакта фрезы с заготовкой.

Значения показателей степени практически не зависят от режима и слабо зависят от обрабатываемого материала [93].

Задача аппроксимации сводится к минимизации целевой функции

$$J = \min_{A_N, B_N, E_N, D_N \in \Omega} \Phi(A_N, B_N, E_N, D_N) \quad (3.8)$$

После подстановки в (3.5) выражений (3.4) и (3.6) и последующего его дифференцирования в соответствии с (3.7) получены уравнения с неизвестными  $A_N, B_N, E_N, D_N$

$$\begin{aligned} \sum_{\xi=0}^{100} \left( \left( \frac{(N(\xi) - N_{ex}(\xi))}{N_{ex}^2(\xi)} \right) \cdot b(\xi) V(\xi) \right) = 0; & \quad \sum_{\xi=0}^{100} \left( \left( \frac{(N(\xi) - N_{ex}(\xi))}{N_{ex}^2(\xi)} \right) \cdot b(\xi) S(\xi) \right) = 0; \\ \sum_{\xi=0}^{100} \left( \left( \frac{(N(\xi) - N_{ex}(\xi))}{N_{ex}^2(\xi)} \right) \cdot S(\xi) V(\xi) \right) = 0; & \quad \sum_{\xi=0}^{100} \left( \left( \frac{(N(\xi) - N_{ex}(\xi))}{N_{ex}^2(\xi)} \right) \cdot b(\xi) S(\xi) V(\xi) \right) = 0; \end{aligned} \quad (3.8)$$

Для традиционно используемых при обработке конструкционных сталей значений параметров в (3.6) [93]:  $C_{NT} = 2.8 \cdot 10^8, x = 1.0, y = 0.75, n = 0.85, m = 0.35$  и  $C_{NF} = 0.68 \cdot 10^8, pb = 0.85, ps = 0.7, pz = 1.0, pB = 1.0, pD = -0.86$  определены коэффициенты модели (3.4):

- для точения  $A_N = 4.1 \cdot 10^7, B_N = -0.4 \cdot 10^5, E_N = 1.9 \cdot 10^6, D_N = 9.6 \cdot 10^8$ ;

- для фрезерования  $A_N = -1.4 \cdot 10^6, B_N = -0.15 \cdot 10^5, E_N = 6.4 \cdot 10^6, D_N = 1.2 \cdot 10^8$

Построены функциональные зависимости мощности резания расчетной  $N(\xi)$  и эмпирической  $N_{ex}(\xi)$  для трех вариантов ТО (рис. 3.3).

Замечено, что снижение требований к качеству образуемых поверхностей и увеличение жесткости оборудования приводят к расширению диапазона используемых мощностей (рис. 3.3, кривая 3). Наоборот повышение требований к качеству поверхностей неизбежно сказывается на снижении уровня используемых мощностей (рис. 3.3, кривая 1).

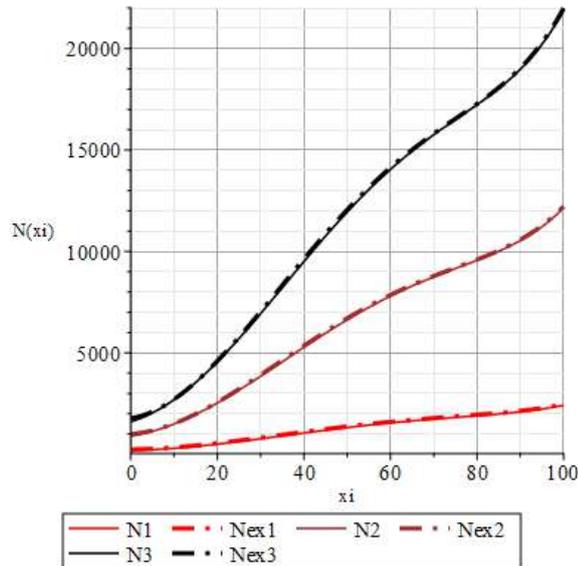


Рисунок 3.3 – Результаты аппроксимации экспериментальной зависимости мощности резания

Зависимости относительной погрешности аппроксимации мощности резания  $FN(\xi)$  и среднеквадратичного отклонений  $F2N(\xi)$  соответственно от обобщенного параметра представлены на рис. 3.4

$$FN(\xi) = \left( \frac{N(\xi) - N_{ex}(\xi)}{N_{ex}(\xi)} \right); \quad (3.9)$$

$$F2N(\xi) = (FN(\xi))^2. \quad (3.10)$$

Максимальное значение среднеквадратичного отклонения мощности резания не превышает 0,2...0,6%. Относительная величина погрешности ее аппроксимации не превышает 4..6% во всем диапазоне изменения обобщенного параметра  $\xi \cong 0..100$  (рисунок 3.4а, 3.4б).

Параметры линеаризованной зависимости нагрузки на ИО МЦС (2.27) определяются из (3.4), с учетом  $N(\xi) = P_{ok}(\xi)V(\xi)$  [93].

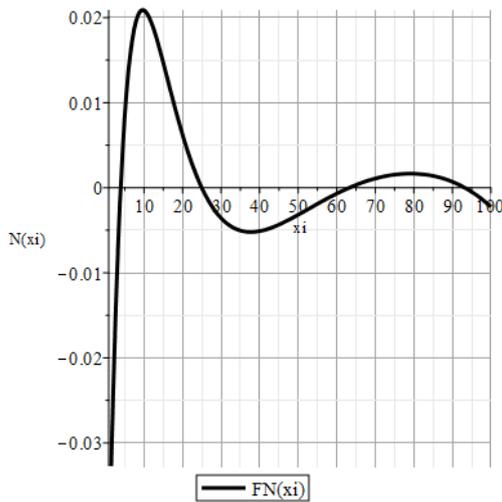
Тогда тангенциальная (окружная) составляющая силы резания

$$P_{ok}(\xi) = B_N b(\xi) + \{A_N b(\xi) / V(\xi) + E_N + D_N b(\xi)\} S(\xi) \quad (3.11)$$

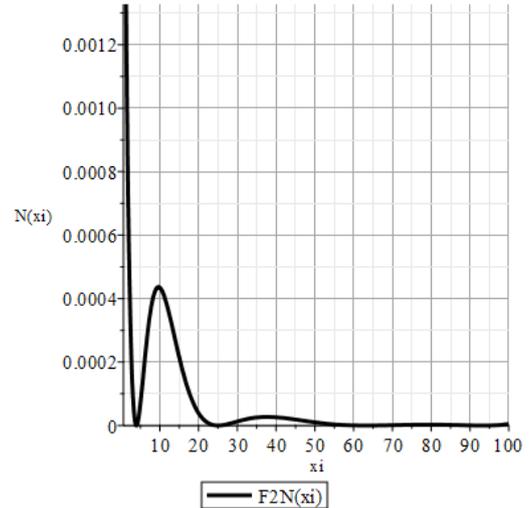
или для минутной подачи

$$P_{ok}(\xi) = B_N b(\xi) + 2\pi \{A_N b(\xi) + (E_N + D_N b(\xi)) V(\xi)\} D_f F(\xi) V^{-2}(\xi), \quad (3.12)$$

где  $F(\xi) = \frac{S(\xi)V(\xi)}{2\pi D_f}$  - минутная контурная подача.



а)



б)

Рисунок 3.4 – Зависимости относительных величин: а) погрешности аппроксимации  $FN(\xi)$  и б) среднеквадратичного отклонений  $F2N(\xi)$  мощности резания от обобщенного параметра

В дальнейшем учитывая закономерную взаимосвязь параметров режима обработки  $b, S, V, H, B$  через обобщенный параметр  $\xi$  с целью упрощения математических выражений не будем представлять их запись в виде функций этого параметра.

Поскольку траектория движения инструмента описывается пространственной кривой (2.13) то нагрузка на приводы по координатным осям определяется через углы между вектором контурной подачи и соответствующими осями [112, 113, 114]

$$\alpha_{Fz} = \arccos \frac{\Delta z}{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}} \quad \alpha_{Fx} = \arctg \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (3.13)$$

где  $\alpha_{Fz}, \alpha_{Fzx}$  – углы между вектором контурной подачи  $F$  и плоскостью  $XU$ , между ее проекцией на эту плоскость  $F_{xy}$  и осью  $X$ .

Учитывая, что соотношение радиальной и тангенциальной составляющих сил резания практически постоянно  $\check{P}_p = (0.35...0.4)\check{P}_{ok}$  [93], то равнодействующая сил резания в плоскости перпендикулярной оси инструмента равна  $\check{R}_p \approx (1.05...1.1)\check{P}_{ok}$ . Угол между равнодействующей и окружной силой также практически не изменяется и равен  $\beta = \arctan\left(\frac{\check{P}_p}{\check{P}_{ok}}\right) \approx 0.34...0.42$ .

Осевую составляющую силы резания определим через радиальную составляющую  $P_o = \left(1 + \frac{F_z}{F_k}\right)\check{P}_p$ , полагая что  $\check{P}_{ok} = P_{ok} \cos \beta_z$ ,  $\beta_z = \arctg \frac{F_z}{V}$ .

Составляющие силы резания параллельная  $P_{=F}$  и перпендикулярная  $P_{nF}$  направлению подачи в плоскости перпендикулярной оси инструмента при несимметричном фрезеровании зависят от угла контакта фрезы с заготовкой [93]. Их средние значения принято считать при  $\hat{\psi}_p = 0.5\psi_p$ .

$$P_{=F} = \check{R}_p \cos(\beta + \hat{\psi}_p); \quad P_{nF} = \check{R}_p \sin(\beta + \hat{\psi}_p) \quad (3.14)$$

Составляющие сил резания по координатным осям определяются через соответствующие углы

$$\begin{aligned} P_x &= P_{=F} \cdot \cos \alpha_{Fx} + P_{nF} \cdot \sin \alpha_{Fx}; \\ P_y &= P_{=F} \cdot \sin \alpha_{Fx} + P_{nF} \cdot \cos \alpha_{Fx} \\ P_z &\approx (1 + \cos \alpha_{Fz})P_{ok} \cdot \cos \beta_z, \end{aligned} \quad (3.15)$$

Сделав простейшие преобразования можно записать

$$\begin{aligned} P_x &= G_x P_{ok}; \quad P_y = G_y P_{ok}; \quad P_z = G_z P_{ok}; \\ G_x &= 1.07\{\cos(\beta + \hat{\psi}_p) \cdot \cos \alpha_{Fx} + \sin(\beta + \hat{\psi}_p) \cdot \sin \alpha_{Fx}\} \cos \beta_z; \\ G_y &= 1.07\{\cos(\beta + \hat{\psi}_p) \cdot \sin \alpha_{Fx} + \sin(\beta + \hat{\psi}_p) \cdot \cos \alpha_{Fx}\} \cos \beta_z \\ G_z &\approx 1.07(1 + \cos \alpha_{Fz}) \cdot \cos \beta_z. \end{aligned} \quad (3.16)$$

Учитывая линейную зависимость окружной силы от контурной подачи (3.12)

$$P_{ok} = B_N b + \pi D_f V^{-2} \{A_N b + E_N V + D_N b V\} F = P_{ok=} + A_{okF} F; \quad (3.17)$$

Выполним линеаризацию (3.15) в соответствии с (2.27) относительно подач по координатным осям в окрестности заданных их значения  $F_{inx}$ ,  $F_{iny}$ ,  $F_{inz}$ . Обозначив

$\lambda = \{x, y, z\}$ , обобщенное выражение для сил резания действующих вдоль соответствующих осей представим в следующем виде

$$P_{\lambda}(t) = P_{0\lambda} + a_{cutF\lambda} F_{\lambda}(t); \quad (3.18)$$

$$a_{cutF\lambda} = G_{\lambda} \frac{A_{okF} F_{in\lambda}}{F} \Big|_{F_{\lambda}=F_{in\lambda}}, P_{0\lambda} = G_{\lambda} \left( P_{ok=} + A_{okF} F - \frac{A_{okF} F_{\lambda}^2}{F} \right) \Big|_{F_{\lambda}=F_{in\lambda}}.$$

Следует отметить, что полученное выражение в отличии от [114] моделирует нагрузку на привод, находящийся и в заторможенном режиме, то есть в отсутствии подачи по его координате. Она объясняется наличием нормальных составляющих сил резания  $P_{nF}$  к направлению контурной подачи.

Учитывая, что  $M_H = P_{ok} D_f / 2$ ;  $\omega = 2V / D_f$ , момент сил резания можно представить следующим образом

$$M_H = 0.5 D_f B_N b + 2\pi F [2A_N b + (E_N + D_N b) D_f \omega] \omega^{-2} \quad (3.19)$$

Тогда параметры линеаризованной функция нагрузки на привод главного движения (2.27) примут значения

$$M_H = M_0 + a_{cutV} \cdot \omega \quad (3.20)$$

$$a_{cutV} = \{2\pi F [4A_N b + (E_N + D_N b) D_f \omega] \omega^{-3}\} \Big|_{\omega=\omega_n}$$

$$M_0 = \{0.5 D_f B_N b + 4\pi F [2A_N b + (E_N + D_N b) D_f \omega] \omega^{-2} + 4\pi F A_N b \omega^{-2}\} \Big|_{\omega=\omega_n}$$

В соответствии с пунктом 2.1 мощности, затрачиваемые на реализацию нагрузок (3.15) и (3.17)., привязанные к длительности операций ТП, являются основой для построения диаграмм нагружения на исполнительные органы МЦС. Их использование в динамической ММЭТО позволяет формировать эталонные графики потребления энергетических ресурсов, обнаружить отклонения от них реальных процессов, реализовать алгоритм идентификации ИПНЭ.

### 3.3 Модуль анализа управляющих программ станков с ЧПУ

Обработка на станке, оснащенный системой числового программного управления (ЧПУ), осуществляется по загруженной в его память управляющей программе (УП). Основным языком программирования для их написания является G-код, который регламентируется стандартом ISO 6983-1:2009 [134] и ГОСТ 20999-83 [135]. В технической литературе этот язык называется кодом ISO 7-bit.

Несмотря на стандарт, этот язык имеет множество реализаций, вводимых разработчиками многоцелевых станков. Тем не менее, это не мешает ему оставаться главным языком программирования в отрасли промышленного производства [136].

В таблицах 3.1 приведены значения символов адресов команд управления станка.

Таблица 3.1 – Значение символов адресов

<b>Символ</b>	<b>Кодовая позиция символа</b>	<b>Значение</b>
A	4/1	Угол поворота вокруг оси X
B	4/2	Угол поворота вокруг оси Y
C	4/3	Угол поворота вокруг оси Z
D	4/4	Вторая функция инструмента
E	4/5	Вторая функция подачи
F	4/6	Первая функция подачи
G	4/7	Подготовительная функция
H	4/8	Не определен
I	4/9	Параметр интерполяции или шаг резьбы параллельно оси X
J	4/10	Параметр интерполяции или шаг резьбы параллельно оси Y
K	4/11	Параметр интерполяции или шаг резьбы параллельно оси Z
L	4/12	Не определен
M	4/13	Вспомогательная функция
N	4/14	Номер кадра
O	4/15	Не определен
P	5/0	Третичная длина перемещения, параллельного оси X
Q	5/1	Третичная длина перемещения, параллельного оси Y
R	5/2	Перемещение на быстром ходу по оси Z или третичная длина перемещения, параллельного оси Z
S	5/3	Функция главного движения
T	5/4	Первая функция инструмента
X	5/8	Перемещение параллельное оси X основной системы координат станка
Y	5/9	Перемещение параллельное оси Y основной системы координат станка
Z	5/10	Перемещение параллельное оси Z основной системы координат станка

Символ	Кодовая позиция символа	Значение
U	5/5	Перемещение параллельное оси X станка вспомогательной системе координат U,V,W
V	5/6	Перемещение параллельное оси Y станка в вспомогательной системе координат U,V,W
W	5/7	Перемещение параллельное оси Z станка в вспомогательной системе координат U,V,W
A,B,C		Повороты вокруг соответствующих осей основной системы координат X,Y,Z

В таблицах 3.2 приведены значения управляющих символов и знаков.

Таблица 3.2 – Значения управляющих символов и знаков

Символ	Кодовая позиция символа	Наименование	Значение
ГТ	0/9	Табуляция	Символ, управляющий перемещением действующей позиции печати в следующую, заранее определенную знаковую позицию на той же строке. Предназначен для управления устройствами печати при распечатке управляющей программы. УЧПУ не воспринимается
ПС	0/10	Конец кадра	Символ, обозначающий конец кадра управляющей программы
%	2/5	Начало программы	Знак, обозначающий начало управляющей программы (используется также для остановки носителя данных при обратной перемотке)
(	2/8	Круглая скобка левая	Знак, обозначающий, что следующая за ним информация не должна обрабатываться на станке
)	2/9	Круглая скобка правая	Знак, обозначающий, что следующая за ним информация должна обрабатываться на станке
+	2/11	Плюс	Математический знак
-	2/13	Минус	Математический знак
.	2/14	Точка	Десятичный знак
/	2/15	Пропуск кадра	Знак, обозначающий, что следующая за ним информация до первого символа "Конец кадра" может обрабатываться или не обрабатываться на станке (в зависимости от положения органа управления на пульте

Символ	Кодовая позиция символа	Наименование	Значение
			управления УЧПУ). Когда этот знак стоит перед символами "Номер кадра" и "Главный кадр", он действует на целый кадр управляющей программы
:	3/10	Главный кадр	Знак, обозначающий главный кадр управляющей программы

Разработанный модуль анализа УП [136, 137] на основании текста управляющей программы при формировании входного воздействия решает следующие задачи:

- лексический и синтаксический анализ текста УП;
- получение списка кадров УП;
- решение геометрических задач в пределах кадра: линейной или круговой интерполяций;
- определение приводов управляемых координатных осей станка, задействованных в реализации перемещений в пределах кадра УП;
- получение элементарных перемещений инструмента вдоль управляемых координатных осей;
- расчет временных показателей выполнения каждого кадра УП.

Для реализации синтаксического и лексического анализаторов текста УП грамматика языка G-код описана с использованием метасимволов:

**<управляющая программа>** → <начало программы> {кадр} <конец программы>

**<начало программы>** → ‘%’

**<конец программы>** → ‘%’

**<кадр>** → {<функция>} {<параметр>} <конец кадра>

**<конец кадра>** → #13#10

**<функция>** → <идентификатор функции> <цифра> {<цифра>}

**<идентификатор функции>** → (D | E | F | G | M | S | T)

**<параметр>** → <идентификатор параметра> [(+|-) ]

[<разделитель>] <цифра> {<цифра>} [<разделитель>] [ {<цифра> } ]

<идентификатор параметра> → (A | B | C | H | I | J | K | L | N | O | P | Q | R | U | V | W | X | Y | Z)

<разделитель> → .

<цифра> → ( 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 )

Синтаксический анализатор реализован с помощью метода рекурсивного спуска: для каждого нетерминального символа создана процедура его обработки, получающая на вход список лексем и текущее положение курсора в нём. Проверка корректности количества аргументов и их типов в каждой из этих процедур выполнена в виде конечного автомата.

Иллюстрация процедуры определения приводов, используемых в образовании той или иной поверхности, приведена на примере траектории движения инструмента при обработке детали типа «Шестерня» (рисунок 3.5).

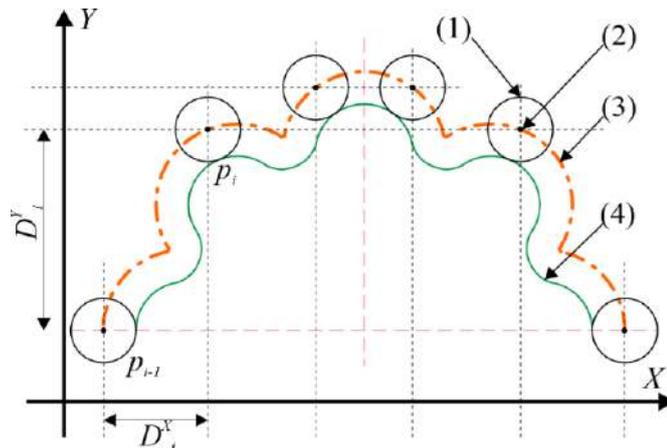


Рисунок 3.5 – Траектория движения инструмента. 1 – режущий инструмент-фреза; 2 –  $i$ -ая точка траектории; 3 – траектория движения инструмента; 4 – образуемая на заготовке поверхность

В соответствии с (2.13) в случае линейной интерполяции, заданной командой G01 и приращения координат при движении инструмента из  $i$ -ой в  $(i+1)$ -ую точку вдоль соответствующих осей  $oX$ ,  $oY$  и  $oZ$ , значения подач по этим осям определяются следующими выражениями:

$$\vec{F} = \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (|\vec{F}| \cos(\alpha_z)) \cdot \cos(\alpha_{xy}) \\ (|\vec{F}| \cos(\alpha_z)) \cdot \sin(\alpha_{xy}) \\ |\vec{F}| \sin(\alpha_z) \end{pmatrix}, \quad (3.21)$$

$$\alpha_{xy} = \arctg\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right) \quad \alpha_z = \arctg\left(\frac{\Delta z}{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}}\right), \quad (3.22)$$

$$\Delta x = T_x^{i+1} - T_x^i \quad \Delta y = T_y^{i+1} - T_y^i \quad \Delta z = T_z^{i+1} - T_z^i, \quad (3.23)$$

где  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  - приращение координат вдоль осей  $OX, OY, OZ$  на  $i$ -ом участке траектории соответственно;  $T_x^i, T_y^i, T_z^i$  - координаты положения инструмента в  $i$ -ой точке траектории. В случае круговой интерполяции, заданной командами G02 и G03, дуга разбивается на  $N$  участков, рассчитываемых как линейная интерполяция.

Временные характеристики выполнения кадра управляющей программы рассчитываются в соответствии со следующими зависимостями

$$T_i = \frac{F_i}{\Delta S_i} \quad (3.24)$$

$$\Delta S_i = \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2 + \Delta z_i^2}$$

где  $T_i$  - время выполнения  $i$ -го кадра управляющей программы;  $F_i$  - контурная подача в  $i$ -ом кадре;  $\Delta S_i$  - перемещение инструмента в  $i$ -ом кадре в направлении контурной подачи.

Иллюстрация возможностей МАУП продемонстрирована на УП обработки детали типа «Шестерня» на МЦС фрезерно-расточной группы, (см. Приложение В). Интерфейс разработанного модуля представлен на рисунке 3.6.

	X	Y	Z	DX	DY	DZ	D	T	S	V
N0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N8	51,53	-68,631	0	-51,93	68,631	0	86,0635	0	0	1500
N9	51,53	-68,631	-46	0	0	46	46	30,6666	0	1500
N10	51,53	-68,631	-45	0	0	3	3	2	500	1500
N11	10,887	-71,481	-45	40,943	2,84995	0	41,0426	27,3613	1000	1500
N12	8,246	-72,7	-45	2,741	1,21906	0	2,99984	1,99985	1000	1500
N13	8,042	-72,782	-45	0,18406	0,88195	0	0,20114	0,13425	1000	1500
N14	6,047	-73,421	-45	1,505	0,64906	0	2,00796	1,30866	1000	1500
N15	4,416	-73,839	-45	1,651	0,40906	0	1,70096	1,13377	1000	1500
N16	2,077	-74,165	-45	2,339	0,32906	0	2,36106	1,57446	1000	1500
N17	0,042	-74,299	-45	1,995	0,134	0	1,99945	1,33295	1000	1500
N18	-1,512	-74,179	-45	1,994	-0,12006	0	1,99796	1,33173	1000	1500
N19	-3,507	-73,952	-45	1,995	-0,22706	0	2,00797	1,33856	1000	1500
N20	-5,502	-73,472	-45	1,995	-0,48006	0	2,05195	1,36795	1000	1500
N21	-7,897	-72,844	-45	1,995	-0,628	0	2,09195	1,39433	1000	1500
N22	-9,892	-71,978	-45	1,995	-0,866	0	2,17495	1,44496	1000	1500
N23	-11,887	-70,867	-45	1,995	-1,1109	0	2,28345	1,52232	1000	1500
N24	-13,367	-69,849	-45	1,48	-1,018	0	1,79636	1,19752	1000	1500
N25	-15,671	-67,854	-45	2,304	-1,995	0	3,04755	2,03175	1000	1500

Рисунок 3.6 – Интерфейс модуля анализа управляющих программ

Текст управляющей программы состоит из 2323 кадров, в 2289 из них решается задача линейной интерполяции, а в 17 – задача круговой интерполяции. При выполнении программы используется один инструмент – фреза диаметра 20 мм (назначение инструмента осуществляется командой  $T1$ ). Траектория движения инструмента приведена на рисунке 3.7, где маркером отмечена начальная ее точка.

Процесс обработки контура состоит из циклически повторяемых действий (см. рисунок 3.8) – формирования выступа (внешний диаметр), и кармана (внутренний диаметра). Как видно из рисунка 3.9 переход инструмента по оси  $oZ$  осуществляется отводом его от заготовки на холостом ходу.

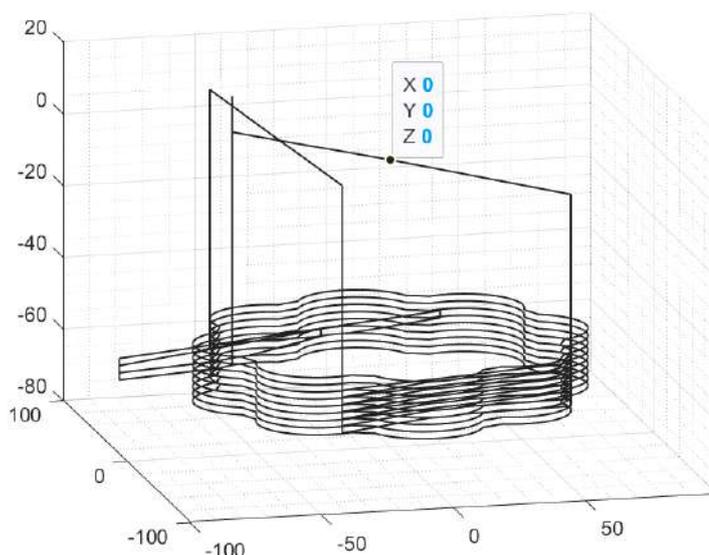
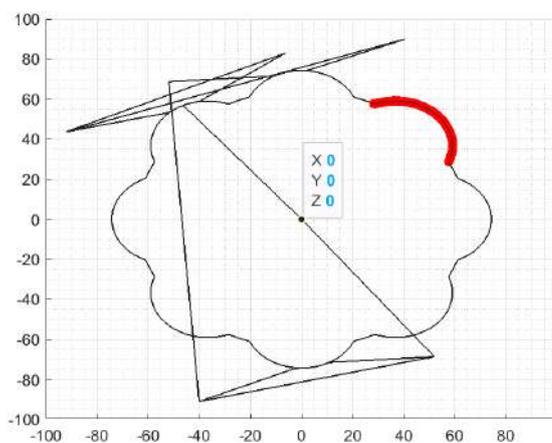
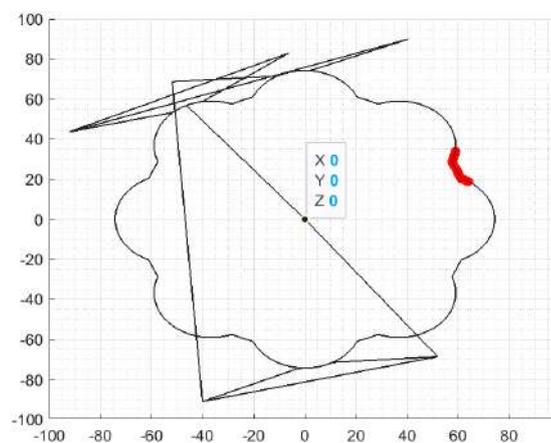


Рисунок 3.7 – Траектория движения инструмента при обработке детали типа «Шестерня»



(а)



(б)

Рисунок 3.8 – Элементы контура (а) – выступ, внешний диаметр (б) – впадина карман, внутренний диаметр

Скорость главного движения, заложенная в УП, составляет 90 м/мин. Контурная подача при обработке основных элементов поверхности детали составляет 1.0 м/мин. Быстрые перемещения инструмента, которые, как правило, соответствуют холостым ходам, осуществляются на скорости 3.0 м/мин.

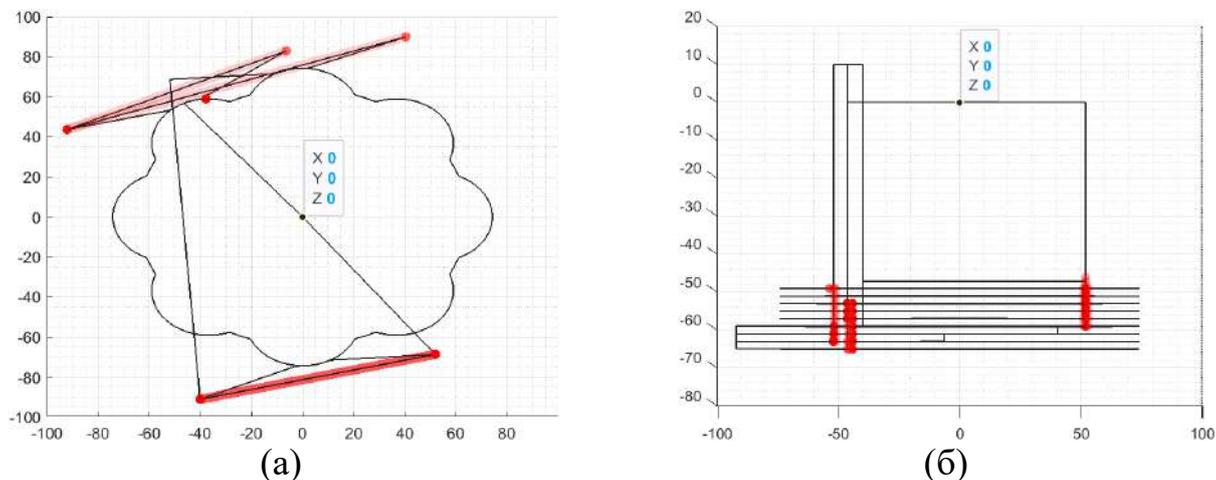


Рисунок 3.9 – Отводы инструмента (а) – по координатам X и Y; (б) – по координате Z

На рисунке 3.10 представлен результат работы МАУП – формирование входных воздействий на динамическую модель станка, в частности, при реализации части траектории, соответствующей обработке выступа детали с переходом на «следующий» уровень по оси  $oZ$  (строку). На графике приведены результаты разложения контурной подачи по координатным осям –  $oX$ ,  $oY$ ,  $oZ$ , и скорость главного движения.

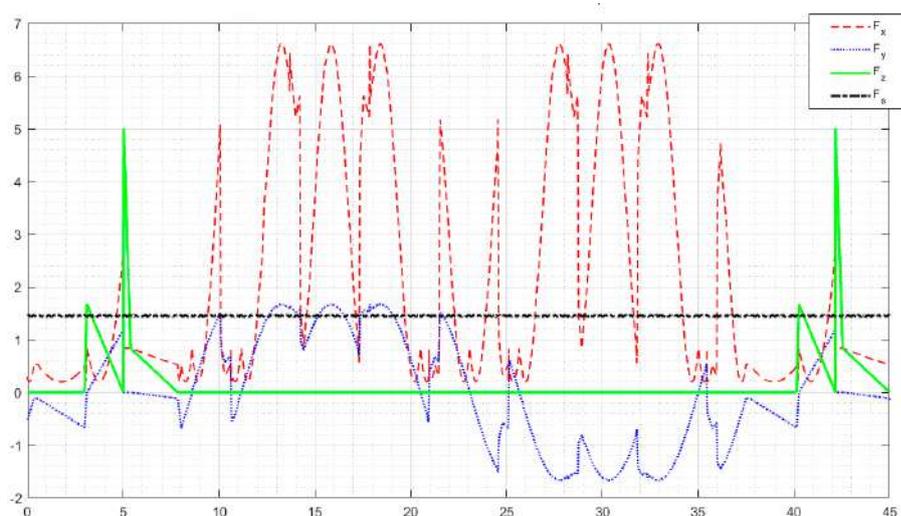


Рисунок 3.10 – Результат работы МАУП – задание скоростей подачи по осям:

$$F_x(t), F_y(t), F_z(t), F_s(t)$$

Из полученного графика изменения входных воздействий на приводы можно сделать вывод, что при обработке даже относительно гладких поверхностей приводы работают с большими динамическими нагрузками.

### 3.4. Имитационное моделирование ИИУС ЭМ ПМП

Целью имитационного моделирования элементов ИИУС ЭМ является проверка адекватности ММЭТО (п.3.1), алгоритма идентификации ИПНЭ (п.2.4), чувствительности системы к систематизированным выше ИПНЭ (п.3.1) и установления их связи с режимами функционирования.

Следует учитывать, что на практике оценивание текущего состояния МЦС может производиться только в реальных условиях, когда некоторые координаты вектора его состояния не измеряются, некоторые измеряются с существенными случайными ошибками, а управление подвержено случайным возмущениям. В этих условиях в качестве алгоритма оценивания использован оптимальный фильтр Калмана (ОФК) [138, 139, 140]. Он позволяет существенно снизить погрешности получаемой информации. Для этих целей динамическая система МЦС, описываемая линейным векторным дифференциальным уравнением (2.22), дополняется стохастическими помехами по управлению и измерению

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}^* \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) + \mathbf{G}\mathbf{w}(t), & \mathbf{A}^* &= (\mathbf{A} + \mathbf{B}\mathbf{K}_{oc}\mathbf{C}) \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{v}(t) \end{aligned} \quad (3.25)$$

где  $\mathbf{u}(t)$  -  $r$ -мерный вектор управления;  $\mathbf{w}(t)$  -  $k$ -мерный вектор случайных возмущений по управлению;  $\mathbf{A}$  - матрица состояния размерности  $n \times n$ ;  $\mathbf{B}$  - матрица управления размерности  $n \times r$ ;  $\mathbf{G}$  - матрица передачи случайных воздействий размерности  $n \times k$ ;  $\mathbf{y}$  -  $m$ -мерный вектор измерения;  $\mathbf{v}(t)$  -  $m$ -мерный вектор помех измерения;  $\mathbf{C}$  - матрица измерения размерности  $m \times n$ .

При построении ОФК приняты известные допущения [138, 139, 140]:

- система (3.22) при  $\mathbf{w}(t) \equiv \mathbf{0}$  и  $\mathbf{v}(t) \equiv \mathbf{0}$  наблюдаема;
- случайные воздействия  $\mathbf{w}(t)$  и помехи  $\mathbf{v}(t)$  являются гауссовскими случайными процессами типа белого шума с нулевыми математическими ожиданиями и интенсивностями, определяемыми симметричными неотрицательно

определенными матрицами  $Q(t)$  размерности  $k \times k$  и  $R(t)$  размерности  $m \times m$  соответственно;

- начальное состояние системы  $x(t_0)$  -  $n$ -мерный случайный вектор с известными математическим ожиданием  $M[x(t_0)] = \bar{x}_0$  и корреляционной матрицей

$$M \left\{ \begin{bmatrix} x(t_0) - \bar{x}_0 \\ \vdots \\ x(t_0) - \bar{x}_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t_0) - \bar{x}_0^T \\ \vdots \\ x(t_0) - \bar{x}_0^T \end{bmatrix} \right\} = P(t_0, t_0);$$

-  $x(t_0)$ ,  $w(t)$ ,  $v(t)$  взаимно не коррелированы при всех  $t \geq t_0$ .

Для стационарной системы, в которой  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{C}$ ,  $\mathbf{T}$ ,  $\mathbf{Q}$ ,  $\mathbf{R}$  – матрицы с постоянными коэффициентами, уравнение фильтра Калмана принимает вид

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}^* \hat{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{B} \mathbf{u}(t) + \mathbf{L} [\mathbf{y}(t) - \mathbf{C} \hat{\mathbf{x}}(t)], \quad (3.26)$$

где  $\hat{\mathbf{x}}(t)$  -  $n$ -мерный вектор оценок состояния системы;  $\mathbf{L}$  - матрица коэффициентов усиления фильтра Калмана.

Построение фильтра сводится к определению матрицы коэффициентов усиления  $\mathbf{L}$ , которая обеспечивает оптимальную оценку, в смысле минимума дисперсии ошибки оценивания, вектора состояния. Она постоянна и определяется выражением:

$$\mathbf{L} = \mathbf{P} \mathbf{C}^T \mathbf{R}^{-1} \quad (3.27)$$

где  $\mathbf{P}$  - положительно определенная матрица, являющаяся решением алгебраического матричного уравнения Риккати-Лурье

$$0 = \mathbf{A} \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A}^T + \mathbf{P} \mathbf{C}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{C} \mathbf{P} + \mathbf{T} \mathbf{Q} \mathbf{T}^T \quad (3.28)$$

Структурная схема системы имитационного моделирования ИИУС ЭМ ТО приведена на рис. 3.11.

Схема включает в себя:

- Модель потребления энергии ТО с номинальными параметрами (матрица  $\mathbf{A}$ ), формирующую штатный режим энергопотребления. В ней предусмотрены дополнительные возможности для учета параметрических возмущений  $P_A$  и детерминированных возмущений по входу  $F_m$ .

- Модель потребления энергии ТО, с параметрами, учитывающими нарушение режима его функционирования (матрица  $\mathbf{A}^*$ ), формирующую текущий

режим энергопотребления. В ней предусмотрен ввод стохастических возмущений по входу  $w(t)$  и возмущений по выходу  $v(t)$ .

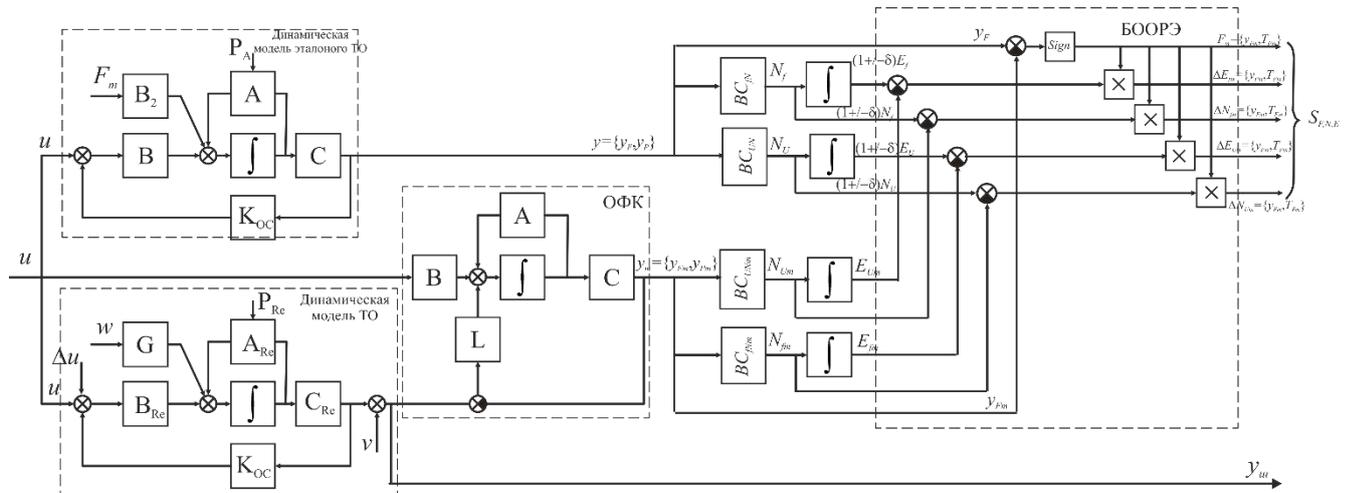


Рисунок. 3.11 – Структурная схема системы имитационного моделирования

### ИИУС ЭМ ТО

- Модель ОФК, построенная на номинальных параметрах матрицы  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{C}$  и формирующая оценки контролируемых параметров ММЭТО  $\vec{F}$ ,  $\vec{N}$ ,  $\Delta\vec{N}$ .
- Модели блоков формирования полезной и полной мощностей, и значений скоростей подач.
- Модель БООРЭ, формирующая в соответствии с критерием (2.17) оценки отклонения параметров энергопотребления за допустимые пределы и соответствующие им технологические режимы  $\vec{F}$ .

Все причины нарушения режима энергопотребления вызваны отклонением параметров или режимов функционирования элементов ПМП. Они выражаются в возмущениях: внешних или внутренних, воздействующих на: материальный поток, оборудование или средства технического оснащения, случайных или систематических, по измерению, управлению или параметрические, которые находят свое проявление в той или иной мере в режиме энергопотребления.

Приведенные математические модели энергопотребления (3.25, 3.26) позволяют произвести оценку реакции ММЭТО на эти возмущения, влияния условий функционирования (режимов работы) ТО на энергопотребление, а, следовательно, установить их связь с ИПНЭ и реализовать алгоритм их

идентификации, предложенный в пункте 2.4, на уровне ТО, то есть в сокращенном варианте.

Иллюстрация функционирования разработанной ИИУС ЭМ ТО проведена на примере трех-координатной обработки типовой детали для МЦС, рассмотренной в п.3.3. Исходные параметры для моделирования определяются техническими характеристиками станка (таблица 3.3) [141], параметрами тяговых устройств (таблица 3.4) и двигателей (таблица 3.5) [142]:

Таблица 3.3 – Технические характеристики МЦС

Перемещение по оси X (мм)	762
Перемещение по оси Y (мм)	406
Перемещение по оси Z (мм)	508
Мин./макс. расстояние от торца шпинделя до стола (мм)	102-610
Размер стола (мм)	914 x 356
Время смены инструмента, с	4,2
Автоматически сменных инструментов (шт)	20
Обороты шпинделя (об/мин)	12000
Мощность привода шпинделя (кВт)	29,4
Габаритные размеры станка (Д x Ш x В)	2570 x 2510 x 2800

Таблица 3.4 – Параметры тягового устройства

Параметр	X	Y	Z
Тип двигателя	1FK7061-7AF71-1FH0	1FK7061-7AF71-1FH0	1FT7046-5AF70-1FH0
Длина винта, мм	700	2800	700
Диаметр винта, мм	40	40	50
Момент инерции вращающейся части привода, кг·м <sup>2</sup>	0,003	0,0071	0,0053
Масса стола, кг	88	208	155
Осевая жесткость привода, Н/мкм	82	194	144
Пропорциональный коэффициент усиления K <sub>c</sub>	1,54	3,63	2,71

Таблица 3.5 – Технические данные двигателей

Техническая информация	Единица измерения	1FK7061-7AF71-1FH0	1FT7046-5AF70-1FH0
Номинальная скорость	Об/мин	3000	3000
Номинальный момент	Нм	5,4	5,6
Номинальный ток	А	5,3	3,5
Момент инерции	кг·м <sup>2</sup>	0,000374	0,000839
Максимальная скорость	Об/мин	6000	5200
Максимальный момент	Нм	17,3	31
Постоянная момента	Нм/А	1	1,75
Постоянная напряжения	В/1000Об/мин	66	111
Сопротивление обмотки	Ом	0,74	1,55
Индукция вращающегося поля	мГн	20	11
Коэффициент усиления частотного преобразователя, Кп	-	400	400

Моделирование работы ИИУС ЭМ осуществлялось при обработке детали типа «Шестерня» в соответствии с управляющей программой, рассмотренной в пункте 3.3. Пример входного воздействия (см. рис. 3.10) на модели станков, определяющего режимы их работы, при формообразовании контура, приведенного на рисунке 3.8. Для получения зависимости полезной мощности от режимных параметров станка была выполнена аппроксимация экспериментальной зависимости мощности резания и получены коэффициенты модели (3.4) для трех типов обрабатываемой стали: 35Г2, 40Х и 40ХС [93].

Моделирование [143, 144, 145] проводилось в среде Matlab (см Приложение Г). Матрицы **A**, **B**, **C**, **K<sub>ос</sub>**, **G**, **L**, а также векторы управляющих воздействий формировались автоматически. Вектор возмущений задавался в ручном режиме. Предусмотрена возможность изменять комплекты визуализируемых векторов выходных исследуемых параметров.

Результаты имитационного моделирования представлены на рис.3.12.

По результатам моделирования можно сделать следующие выводы:

1) разработанная модель адекватно воспроизводит контур обрабатываемой поверхности;

2) мощности, потребляемые приводами в покое, реверсе или на малых скоростях значительно больше, чем мощности перемещения даже на больших скоростях, особенно это характерно для оси Z, что подтверждает низкое значение КПД для этих условий.

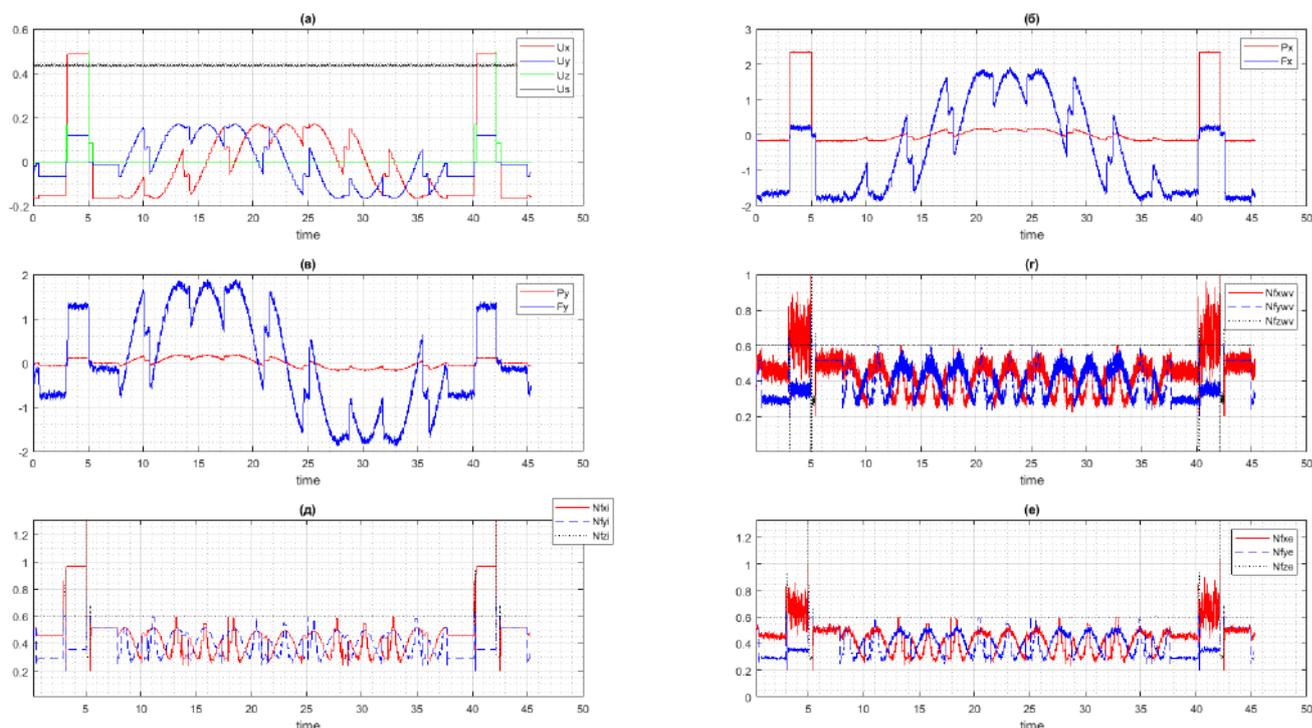


Рисунок. 3.12 – Результаты имитационного моделирования ИИУС ЭМ ТО при обработке детали типа «Шестерня»: (а) – диаграмма задающих напряжений на приводах; (б, в) – скорость и усилие, развиваемые приводами по координатам X и Y; (г, д, е) – полные мощности, потребляемые приводами и измеренные: (г) – на входе ОФК; (д) – на выходе идеальной модели; (е) – на выходе ОФК.

3) предложенная модель позволяет выделить как полезную составляющую так полную мощность, потребляемую приводом, что позволяет произвести оценку потерь мощности, не поддающихся наблюдению в реальных условиях. Они характеризуют качество функционирования привода;

4) анализ информационных сигналов системы имитационного моделирования ИИУС ЭМ ТО показал, что шумы, возникающие в измерительных каналах мощностей, существенно искажают полезные сигналы. Это создает

определённые трудности при их использовании в идентификации ИПНЭ (рис. 3.12.г) и обосновывает необходимость фильтрации измеряемых сигналов;

5) установлено, что СКО, полученных на выходе ОФК оценок измеряемых сигналов (см. рис. 3.12.е), не превышает 2..3% от выходных сигналов модели (см. рис. 3.12.д).

Для проверки работоспособности алгоритма идентификации ИПНЭ в модели МЦС (см. пункт 2.4) в соответствии с приведенной систематизацией ИПНЭ изменялись параметры модели и входные возмущения, позволяющие «искусственно» вводить НРЭ на различных уровнях. Путем варьирования этих же параметров в модели энергопотребления добивались смещения верхней и нижней допустимых границ (ВГ и НГ), на величину и направление такие, чтобы диаграмма энергопотребления станка вошла в допустимую область. Тожественное сравнение коэффициентов матриц  $A$  динамических моделей эталонного и «реального» ТО позволяет идентифицировать конкретные источники и причины нарушения энергопотребления.

В соответствии с рассмотренной выше методикой имитационного моделирования произведена систематизация возможных ИПНЭ, и их связи с диагностическими признаками и режимами функционирования ТО, в которых они находят наиболее существенное проявление (см. таблица 3.6). Она подтвердила выводы п.2.2 о том, что задача идентификации ИПНЭ может не иметь, иметь одно или несколько решений. В частности, причины, связанные с обрабатываемым материалом и используемым инструментом, имеют одни и те же индикаторы. Поэтому при использовании одного инструмента задача идентификации не может быть решена. Для ее решения требуется, чтобы в ТП использовалось не менее двух инструментов. Причины, связанные с нарушением ТП по выбору ТО и привязкой заготовки к нему, не могут быть идентифицированы только по результатам измерений мощностей и требуют для решения задачи дополнительной информации о типоразмерах заданного и используемого ТО и об отличии в координатах точек смены и расположения магазина инструментов.

Таблица 3.6 – Взаимосвязь ИПНЭ, диагностических признаков и параметров состояния объекта мониторинга

Источник	Возмущения Причины нарушения	Параметры функционирования				$\tilde{E}_{f_0}$		$\tilde{E}_{f_p}$		$\tilde{N}_{f_p}$		$t$
		Скорость	Направление	Инструмент	Привод	ВГ НГ	ВГ	НГ	ВГ	НГ		
ТП	Материал	(РХ)	(+)^(^-)	Все	Все	+	+	-	+	-	-	
	Инструмент	(РХ)	(+)^(^-)	Конкретный	Все	+	+	-	+	-	-	
	Режимы обработки	(РХ)	(+)^(^-)	Конкретный	Все	+	+	+	+	+	+	
	УП, Маршрутный ТП	(РХ)^(XX)	(+)^(^-)	Все	Все	+	+	+	+	+	+	
ТО	Циклограмма	РХ^(XX/ручная масш)	(+)^(^-)	Все	Все	+	-	+	-	+	+	
	Типоразмер	XX/смена инструмента	(+)^(^-)	Все	Все	+	+	-	-	-	+	
	Привязка детали	XX/смена инструмента	(+)^(^-)	Все	Все	+	+	-	-	-	+	
	Установка и базирование заготовки	РХ	(+)^(^-)	Конкретный	Конкретный	+	-	-	+	+	-	
Привод	Настройка	РХ^(XX)^(V=0)	(+)^(^-)	Все	Конкретный	+	+	-	+	-	-	
	Изменение параметров	РХ^(XX)	(+)^(^-)	Все	Конкретный	+	+	-	+	-	-	

### Выводы по главе 3

Обобщая вышесказанное, можно сделать следующие выводы:

- формализована структура информационно-измерительной системы энергетического мониторинга цеха механической обработки, учитывающая, ядром которой являются модели энергопотребления, которые обеспечивает формирование штатного режима энергопотребления, представляющего собой диаграммы полезной и полной мощностей, потребляемой исполнительными механизмами станка;
- полезная мощность, затрачиваемая на операции механической обработки в соответствии, представлена линейной функцией от скорости образования новых поверхностей и скорости удаления материала с заготовки, которые выражены через режимные параметры оборудования, что подтвердило возможность использования математической модели производственного процесса, приведенной в главе 2;
- потери энергии в исполнительных механизмах станка выражены через зависимость КПД электродвигателей от относительных частоты и моментов, которые являются режимными параметрами приводов;

- описана динамическая модель станка векторным линейным дифференциальным уравнением, состоянием которой выступают режимные параметры работы станка – скорости главного движения и приводов управляемых координатных осей, и энергетические параметры – потребляемые мощности названных ранее приводов;
- произведена систематизация источников и причин нарушения штатных режимов энергопотребления на предмет влияния на: интегральные составляющие на уровнях станка и исполнительных механизмов; дифференциальные составляющие на уровне исполнительных механизмов;
- произведенный анализ возможных причин нарушения циклограммы выполнения управляющей программы показал, что основной причинной является занижение режимных параметров во время работы оборудования;
- разработан модуль анализа управляющих, осуществляющий формирование входного воздействия по ее тексту путем решения задач линейной, круговой интерполяций, разложения контурной подачи и расчета временных характеристик выполнения кадров управляющей программы;
- произведено моделирование работы информационно-измерительной системы в соответствии с предложенной во главе 2 методом;
- для апробации работы алгоритма идентификации источников и причин нарушения штатных режимов энергопотребления в модели станка были введены параметрические и входные возмущения, которые приводили к «нарушению» штатного режима энергопотребления;
- в результате моделирования информационно-измерительной системы удалось идентифицировать все приведенные источники и причины нарушения штатных режимов энергопотребления;
- снижение частоты вращения привода относительно номинальной приводит к увеличению потерь, которые при значении момента от 10% до 100% от номинального значения могут достигать 50%;
- разработанная модель адекватно воспроизводит контур обрабатываемой поверхности.

## ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ И УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

### 4.1 Методика проведения экспериментальных исследований ИИУС ЭМ

Экспериментальные исследования разработанных элементов ИИУС ЭМ проводились на участке механической обработки, состоящем из двух многоцелевых станков фирмы HAAS VF разных типоразмеров, при обработке партии деталей 3-х наименований (фланец, пуансон и опора) в количестве 480 шт. Доступ к данным осуществлялся в соответствии со стандартом доступа к технологическим параметрам станков с ЧПУ MTConnect [121, 146]. Характеристики станка приведены в пункте 3.4.

С целью проверки работоспособности элементов ИИУС ЭМ полный комплекс экспериментальных (подробный) исследований проводился при обработке детали типа фланец с габаритными размерами 170x310x32 мм (рис.4.1). Она является наиболее сложной и характеризуется высокой трудоемкостью, имеет отверстия круглого (диаметром 114 мм) и прямоугольного (размером 63x123 мм) сечений, несколько карманов и обнижений различного профиля и глубины, 34 отверстия диаметром от 5 до 12 мм. Материал заготовки Сталь 38ХС ГОСТ 4543-71. Чертеж детали приведен в приложении Д.



Рисунок 4.1 – Обрабатываемая деталь - фланец

В качестве исходных данных использовалась управляющая программа, состоящая из 14166 кадров, в которой запрограммировано 24 смены 18-ти инструментов, из них 8 фрез, 5 сверел, 3 метчика и 2 зенкера. Она явилась основой для определения режимных параметров обработки и зависимости от них полезной потребляемой мощности. Для построения ММЭТО МЦС использовались основные характеристики станка и параметры приводов, позволяющих восстановить зависимости потерь энергии в них. В результате определены векторы управлений и штатных возмущений, матрицы параметров, управления и наблюдения (3.1) ... (3.3).

Для контроля полной мощности, потребляемой ИО, в станок установлены датчики: измерители мощности – РМ3215 (см. рис.4.2).

Для иллюстрации возможностей моделирования штатного режима энергопотребления ИИУС ЭМ выбран фрагмент УП (см. Приложение Е) обработки боковой поверхности соединительного выступа фланца прямоугольного сечения размером 144x244x12 мм с радиусами закругления углов 12 мм.

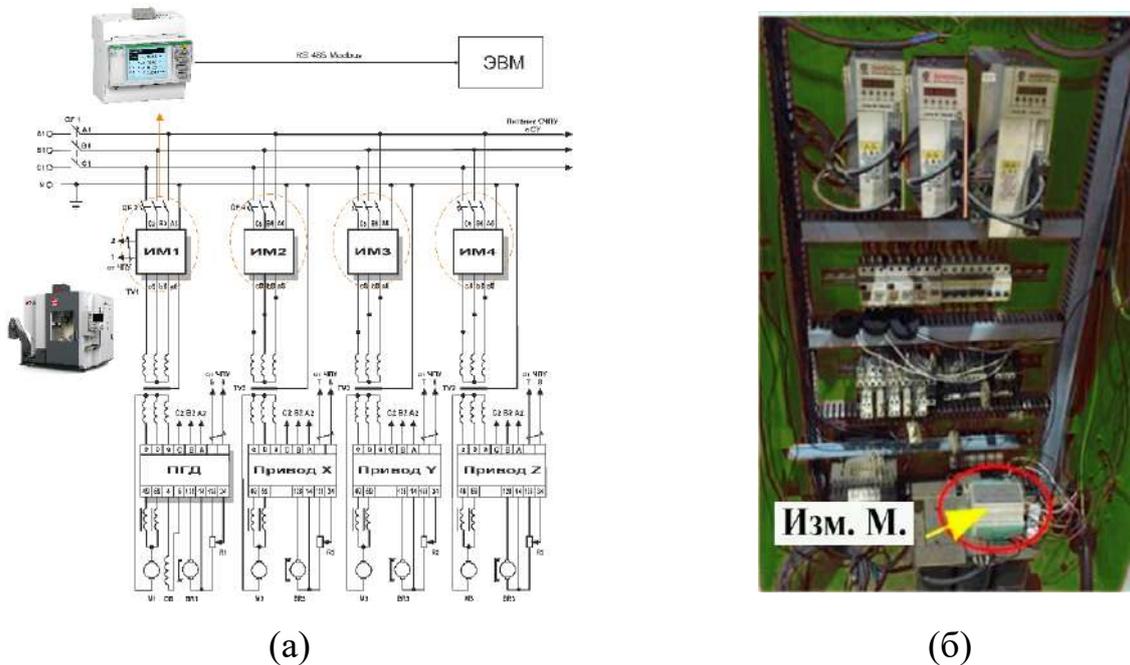


Рисунок 4.2 – Схема подключения средств измерения (а), их конструктивное размещение в шкафу электроавтоматики (б).

## 4.2 Результаты экспериментальных исследований энергопотребления на участке МЦС

Результаты экспериментальных исследований энергопотребления приводов МЦС приведены на рисунке 4.3. На нем можно видеть графики изменения скоростей по осям X, Y, Z (см. рис. 4.3а) при выполнении двух строк обработки соединительного выступа (рис. 4.1).

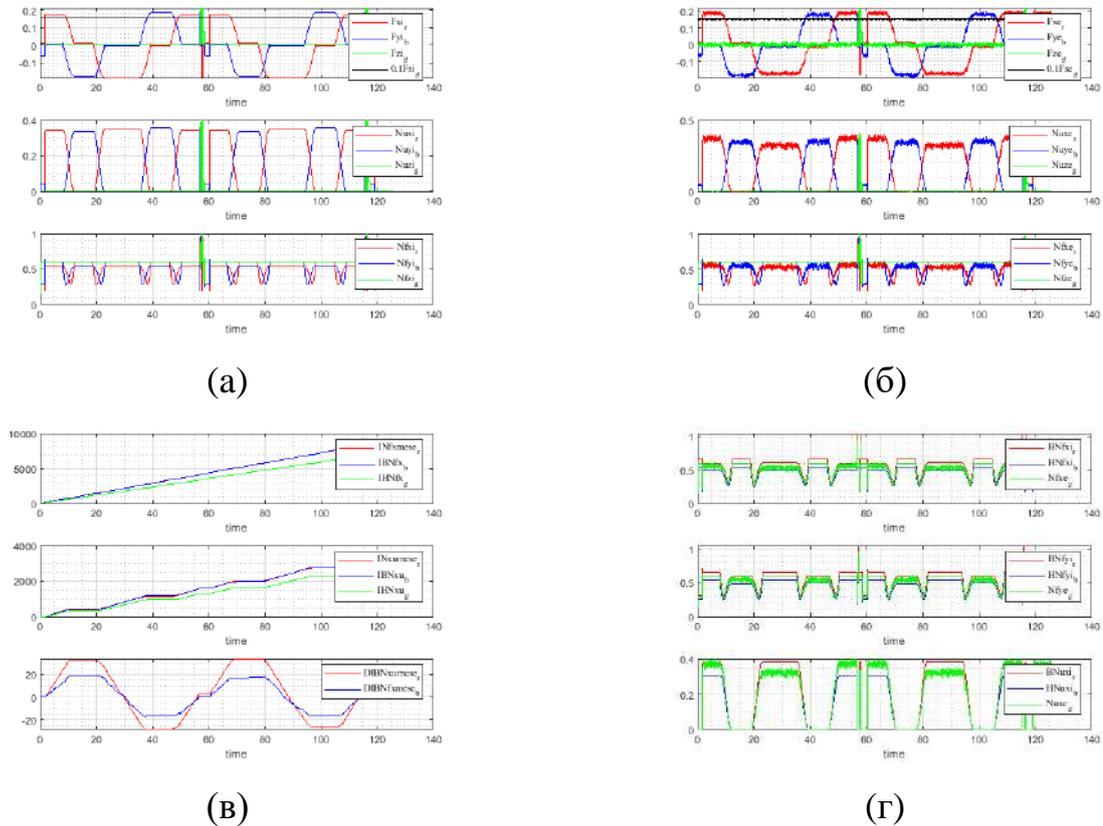


Рисунок 4.3 – Диаграммы энергопотребления приводами координатных перемещений: (а) – в штатном режиме; (б) – результаты оценки после фильтрации; результаты анализа составляющих энергопотребления: (в) – интегральных и (г) – мгновенных.

На рисунке 4.3а представлены и зависимости мощностей, потребляемых этими приводами. Их анализ показывает, что заданные режимы резания создают незначительную нагрузку на приводы, которая всего в 3 раза больше нагрузки на холостых ходах и в 1,5 раза меньше мощности, потребляемой приводом в фиксированном положении, что особенно характерно для привода по

координате  $Z$ . Это говорит о низкой энергоэффективности использования данного типоразмера оборудования при обработке выбранной детали.

Анализ результатов фильтрации сигналов измерения разработанной ММЭТО МЦС показал, при задании уровня интенсивности шумов 10-30% она восстанавливает исходные сигналы с достаточной для практики степенью точности (см. рис. 4.3б).

ИИУС ЭМ по критерию НРЭ (2.18) на 20с обнаружен выход интегральной составляющей энергопотребления за верхнюю допустимую границу (см. рис. 4.3в). На основании анализа мгновенной составляющей (см. рис. 4.3г) критерий (2.18) показал, что по координате  $X$  в положительном направлении потребляемая мощность больше, чем в отрицательном направлении. На основании предложенной систематизации возможных ИПНЭ сделан вывод о том, что причиной этого является нарушение условий базирования заготовки по координате  $U$ . Моделирование возмущения, связанного со смещением исходного положения заготовки, подтвердило полученное отклонение от штатного режима энергопотребления.

При обработке партии деталей, указанной в п. 4.1, было выявлено 20 случаев отклонения от ШРЭ из них 80% с идентификацией ИПНЭ, в 11 случаях принято решение об изменении режимов функционирования. Результаты экспериментальных исследований приведены в таблице 4.1. В ней приведены следующие обозначения:  $\Delta E_{cp}\%$  - зафиксированное относительное отклонение энергоемкости операции;  $\%НРЭ$  - относительное число обнаруженных НРЭ при обработке конкретной заготовки;  $\%ПП$  - относительное число деталей, на которых принято решение об изменении условий функционирования. Например, из таблицы видно, что обнаруженное отклонение в характеристиках обрабатываемого материала «Детали №1» (разные поставщики заготовок) на 1-м станке удалось компенсировать путем их выбора, на 2-м станке в виду ограниченного их количества это не достигнуто. Большой износ инструмента на «Детали №2» потребовал оперативной замены инструмента при обнаружении увеличения энергопотребления как на 1-м так и на 2-м станках.

Завышенное энергопотребление, обусловленное потерями на холостых ходах практически на всех деталях и на всех станках кроме «Детали №1» на 2-м станке, говорит об их несоответствии составу оборудования на участке МЦС. Этот недостаток является наиболее распространенным, и может быть устранен применением специальных средств технологического оснащения, изменяющих характеристики рабочего пространства оборудования [118].

Таблица 4.1 – Результаты экспериментальных исследований на участке МЦС

	Станок №1									Станок №2								
Кэф-т готовности приводов	0,15									0,15								
Время смены инструмента	5,7									4,5								
Габариты раб зоны X/Y/Z	1626			813			862			762			406			582		
Уст. мощность	35									29,4								
<b>Наименование детали</b>	<b>Деталь №1 Фланец</b>			<b>Деталь №2. Пуансон</b>			<b>Деталь №3. Опора</b>			<b>Деталь №1</b>			<b>Деталь №2</b>			<b>Деталь №3</b>		
Размер детали	310	170	32	56	45	53	120	60	40	310	170	32	56	45	53	120,00	60	40
Кэф-т исп. мощности	0,2500			0,1000			0,5000			0,3333			0,1333			0,6667		
Кэф-т исп. времени	0,1038			0,8333			0,0679			0,1038			0,8333			0,0679		
Количество деталей	50			20			100			10			100			200		
Количество инструментов	24			3			5			24			3			5		
Макс. диаметр фрезы в УП	20,00			8,00			40,00			20,00			8,00			40,00		
Число кадров УП	14166			88200			365			14166			88200			365		
Энергоемк. обр-ки, кВтч/МДж	2,2351/8,0463			2,5396/9,1425			0,4500/1,6199			1,4844/5,3439			1,6867/6,0720			0,2989/1,0759		
Время обработки, ч	3,25			1,15			0,5			3,25			1,15			0,5		
Причины	%ΔE <sub>ср</sub>	%НРЭ	%ПР	%ΔE <sub>ср</sub>	%НРЭ	%ПР	%ΔE <sub>ср</sub>	%НРЭ	%ПР	%ΔE <sub>ср</sub>	%НРЭ	%ПР	%ΔE <sub>ср</sub>	%НРЭ	%ПР	%ΔE <sub>ср</sub>	%НРЭ	%ПР
Материал	1,61	2	98	0,0000	0	0	0,0000	0	0	10,6868	100	0	0,0000	0	0	0,0000	0	0
Инструмент	0,0000	0	0	0,8228	10	90	0,0000	0	0	0,0000	0	0	3,0360	10	100	0,3066	5	95
Циклограмма	0,3253	2	98	0,0000	0	0	0,0662	1	99	0,0000	0	0	0,0000	0	0	0,7988	10	90
Типоразмер	3,1800	100	0	0,1590	100	0	1,3250	100	0	0,3168	0	0	0,3960	100	0	1,3200	100	0
Привязка детали	0,0156	2	98	0,0000	0	0	0,0000	0	0	0,0071	10	90	0,0000	0	0	0,0297	10	90
Установка и базирование	0,0377	10	90	0,0000	0	0	0,0000	0	0	0,0000	0	0	0,0000	0	0	0,0000	0	0

Общие затраты энергии составили 1623 МДж, увеличение затрат энергии при нарушении ШРЭ составило бы 152,8 МДж, за счет принятия решений об изменении режимов функционирования потери энергии сокращены на 19,1 МДж, что соответствует экономии 12,5% энергоресурсов.

Таким образом применение разработанной ИИУС ЭМ позволяет на основании анализа отклонений от штатного режима энергопотребления оперативно идентифицировать организационные, управленческие, параметрические и субъективные причины. Они являются основой для формирования рекомендаций для принятия соответствующих решений, об изменении режимов функционирования.

#### Выводы по главе 4

- Обоснована необходимость применения алгоритмов фильтрации в модуле оценки отклонений энергопотребления от штатного режима ИИУС ЭМ, построенных, в частности, с использованием фильтра Калмана, уменьшивших ошибку оценивания их выходных координат по сравнению с ошибкой измерения

на всех управляемых координатах почти в три раза, что подтвердило корректность разработанных моделей и алгоритмов оценивания.

- Опытно-промышленная апробация разработанных средств ИИУС ЭМ показала, что их применение позволяет снизить энергоемкость операций обработки заготовок на МЦС фрезерно-расточной группы на 7-15 % за счет своевременного обнаружения отклонений от штатного режима энергопотребления и принятия адекватных управленческих решений в виде своевременной замены инструмента, коррекции режимов при изменении характеристик обрабатываемого материала, изменении координат исходной точки траектории при больших потерях на холостых ходах.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе решена актуальная научная задача расширения функциональных возможностей ИИУС ЭМ на основе оперативной идентификации источников и причин нарушения штатных режимов энергопотребления, обеспечивающих принятие адекватных решений по повышению эффективности расходования энергетических ресурсов.

Основные научные и практические результаты заключаются в следующем:

1. Проведенный анализ существующих ИИУС ЭМ показал, что в них отсутствует возможность оценки эффективности энергопотребления ПМП, поскольку нет оперативной и адекватной информации о желаемом штатном режиме энергопотребления, соответствующим конкретным условиям функционирования ТО и производства, а, следовательно, и нет оценки меры отклонения от него, что позволило формализовать задачу совершенствования ИИУС ЭМ, на основе систематизации множества возможных ИПНЭ и оценки необходимого объема и вида информации для их идентификации.

2. Предложена структура ИИУС ЭМ, отличающаяся тем, что в известную ИИУС включены блок моделей ТО, восстанавливающий характеристики штатного режима энергопотребления в конкретных условиях функционирования, блок оценки отклонений от него информации о реальном процессе, поступающей с первичных измерительных приборов ИИУС, блок формирования возмущений и блок идентификации ИПНЭ, позволяющих конкретизировать рекомендации по принятию решений о проведении энергосберегающих мероприятий.

3. На основании анализа известных моделей энергопотребления ТО, показавшего их ограниченность в связи с некорректным учетом характеристик ТО и потерь энергии в динамических процессах, предложена ММЭТО, обеспечивающая преобразования в составе ИИУС ЭМ информации, регламентирующей режим функционирования реальных ТО, в расчетные значения потребляемой мощности и потерь в них, описываемая системой линейных дифференциальных уравнений, учитывающей характеристики его приводов и возможные помехи по каналам управления, возмущения и измерения, позволившая

оперативно генерировать информацию о штатном режиме энергопотребления для конкретных условий, являющуюся эталоном для оценки его эффективности.

4. Формализован критерий нарушения режимов энергопотребления, отличающийся тем, что основан на сравнении текущих мгновенных и интегральных характеристик энергопотребления с штатными их значениями, формируемыми ММЭТО, позволяющий ИИУС ЭМ определять момент времени и источники нарушения энергопотребления для перехода к идентификации причин, вызвавших его.

5. Предложен алгоритм идентификации ИПНЭ, отличающийся тем, что основан на генерировании в ИИУС ЭМ векторов параметрических и входных возмущений на ММЭТО, наиболее вероятных для текущих значений отклонений мгновенных и интегральных характеристик энергопотребления от штатного их значения и приводящих моделируемый процесс в соответствии с реальным, позволяющий локализовать источник и возможную причину нарушения режима энергопотребления ТО до конкретных исполнительных механизмов и параметров их функционирования, создавая условия для принятия адекватных решений о проведении энергосберегающих мероприятий.

6. Математическое моделирование ИИУС ЭМ участка механической обработки с МЦС фрезерно-расточной группы при трех-координатной обработке деталей проводилось с моделями энергопотребления МЦС, описываемыми системой линейных дифференциальных уравнений 8-го порядка в векторной форме с постоянными в пределах кадра управляющей программы коэффициентами; с систематизированными связями наиболее вероятных возмущений объекта мониторинга с отклонениями мгновенных и интегральных характеристик энергопотребления от штатного их значения.

В результате моделирования доказано, что предложенная ИИУС ЭМ ПМП позволяет обнаружить возмущения при изменении их значения более чем на 5 10%, и приводящие к отклонению режима энергопотребления более чем на 10%, кроме этого показано, что в рассмотренных условиях потери мощности на чистовых операциях обработки соответствуют низким значениям КПД, не превышающим

50%, что указывает на неэффективное использование с точки зрения энергопотребления выбранного оборудования.

7. Опытно-промышленная апробация разработанных элементов структуры ИИУС ЭМ на примере операций обработки деталей различного функционального назначения на участке МЦС фрезерно-расточной группы показала, что отклонения мощностей, потребляемых приводами координатных перемещений МЦС, от расчетных штатных значений не превышает 3-7%, а общие затраты энергии составляют 1623 МДж, увеличение затрат энергии, вызванных нарушением ШРЭ, составило бы 152,8 МДж, за счет принятия решений об изменении режимов функционирования потери энергии сокращены до 19,1 МДж, что соответствует экономии 12,5% энергоресурсов.

Ряд теоретических положений внедрен в учебный процесс на кафедре вычислительной техники Института прикладной математики и компьютерных наук Тульского государственного университета.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы. Научные и практические результаты диссертационного исследования рекомендуется применять в различных отраслях промышленности для повышения эффективности использования энергетических ресурсов, а также в учебном процессе при подготовке магистров и аспирантов в области информационно-измерительных и управляющих систем и повышении квалификации инженерно-технических работников промышленных предприятий.

Перспективой дальнейшего развития диссертационных исследований является их распространение на другие средства технологического оснащения ПМП, такие как термические и гальванические установки, кузнечнопрессовое оборудование и др., а также развитием предложенного подхода на всю иерархическую структуру предприятия с учетом расходования энергетических ресурсов не технологического назначения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Управление эффективностью и качеством: Модульная программа: Пер. с англ. /Под ред. И. Прокопенко, К. Норта: В 2ч,–Ч.1. –М.: Дело, 2001. –800с.
2. Указ Президента РФ от 04.06.2008 N 889 «О некоторых мерах по повышению энергетической и экологической эффективности российской экономики».
3. Государственная программа Российской Федерации «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года».
4. Государственная программа Российской Федерации «Энергоэффективность и развитие энергетики».
5. Отчет по реализации государственной программы «Энергоэффективность и развитие энергетики» за 2018.
6. Отчет по реализации государственной программы «Энергоэффективность и развитие энергетики» за 2017.
7. Государственный доклад о состоянии энергосбережения и повышении энергетической эффективности в Российской Федерации за 2018 год. Москва. – 2019.
8. Промышленность России. 2012. Росстат.
9. Иванов В.А. Анализ энергозатрат в различных отраслях промышленности // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 7, №1 (2015) <http://naukovedenie.ru/PDF/144TVN115.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/144TVN115.
10. Сальников В.С. Технологические основы эффективного энергопотребления производственных систем. – Тула: Издательство “Тульский полиграфист”, 2003. – 187 с.
11. EIA, 2010. “Annual Energy Review 2010,” p. 38.
12. Fysikopoulos, Apostolos & Papacharalampopoulos, Alexios & Pastras, Georgios & Stavropoulos, Panagiotis & Chryssolouris, George. (2013). Energy

Efficiency of Manufacturing Processes: A Critical Review. *Procedia CIRP*. 7. 628-633. 10.1016/j.procir.2013.06.044.

13. Int. Energy Agency (IEA), 2008. *Worldwide Trends in Energy Use and Efficiency, Key Insights from IEA Indicator Analysis* (online).

14. Jucker, B., Leupp, P., and Sjökvist, T., 2008. *Electrical energy – The challenge of the next decades*. *Abb Review*, pp. 8-13.

15. Salnikov V & Frantsuzova, Y. (2020). *Measuring the energy efficiency of workplace lighting in industrial enterprises*. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 971. 052035. 10.1088/1757-899X/971/5/052035.

16. Комаров, Л. В. Направления развития систем энергоменеджмента / Л. В. Комаров, Е. В. Елагин // *Мир компьютерной автоматизации*. – 2016. – № 2(109). – С. 49–58.

17. Воеводкина, Ю. С. Классификация и значение топливно-энергетических ресурсов в производственной деятельности предприятия / Ю. С. Воеводкина // *Интернет-журнал «Науковедение»*. – 2014. – № 2. – С. 1–10.

18. Сальников В.В., Французова Ю.В. Энергетическое представление некоторых объектов промышленных предприятий // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. Выпуск 10. – Тула: ТулГУ, 2018. С. 108 – 113.

19. Виды производств с позиции автоматизации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://opiobjektid.tptlive.ee/Automatiseerimine/12\\_\\_\\_\\_.html](http://opiobjektid.tptlive.ee/Automatiseerimine/12____.html) (дата обращения 10.02.2022).

20. Информационные системы в промышленности-общие понятия, определения, термины [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [http://www.up-pro.ru/library/information systems/production/promyshennost-is.html](http://www.up-pro.ru/library/information%20systems/production/promyshennost-is.html) (дата обращения 10.02.2022).

21. Мальков М. В., Олейник А. Г., Федоров А. М. Моделирование технологических процессов: методы и опыт // *Труды Кольского научного центра РАН*. 2010. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-tehnologicheskikh-protsessov-metody-i-opyt> (дата обращения: 13.06.2022).

22. Справочник проектировщика АСУ ТП /Под редакцией Г. Л. Смилянского. –М.: Машиностроение, 1983.–527с.
23. Автоматизация дискретного производства /Под общей редакцией проф. Е. И. Семенова и проф. Л. И. Волчкевича. –М.: Машиностроение; –София: Техника, 1987. –520с.
24. Удовик, А. В. Инструменты планирования энергоресурсов машиностроительного предприятия / А. В. Удовик, А. В. Авдеев, А. Ю. Невокшенов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2016. – Т. 2, № 12. – С. 299–301.
25. Ерзин, Сальников В.В. Один из аспектов оценки эффективности технологических систем // Известия ТулГУ. Технические науки, Вып. 11. Ч. 2 – Тула: Изд-во ТулГУ, 2014 стр. 594-603
26. Сальников В.В., А.Н. Ивутин Повышение эффективности расходования энергетических ресурсов в производственных системах // Сборник тезисов докладов научно-практической конференции «Инновационные наукоемкие информационные технологии»: материалы. Тула: Тульский государственный университет, 2016, С. 16-19
27. Сальников В.В., Ивутин А.Н. Роль технологической информации в обеспечении эффективного энергопотребления предприятия // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, Вып. 8. Ч. 1 – Тула: Изд-во ТулГУ, 2017, 359 С. 165-170
28. Сальников В.В., Ивутин А.Н. Разработка комплексного подхода к оценке эффективности потребления энергоресурсов промышленными предприятиями, базирующегося на использовании технологической информации // Сборник тезисов докладов научно-практической конференции «Инновационные наукоемкие информационные технологии»: материалы. Тула: Тульский государственный университет, 2017 С. 9-12
29. Глудкин О.П., Горбунов Н.М., Гуров А.И., Зорин Ю.В. Всеобщее управление качеством. Под ред. О.П. Глудкина. –М.: Радио и связь, 1999. –600с.

30. Энергосберегающая технология. Электроснабжение народного хозяйства. В 5–ти кн. / Под редакцией В. А. Веникова. –М.: Высшая школа, 1990.
31. Smith C.B. Energy management principles (Elmsford, New York, Pergamon, 1981).
32. Thuman A. Handbook for energy audit (Atlanta, Georgia, Fairmount, 1984).
33. Гиссин В.И. Управление качеством продукции: Учебн. пособие. – Ростов н/Д: Феникс, 2000. –256с.
34. Мамаев В.С., Осипов Е. Г. Основы проектирования машиностроительных заводов –М.: Машиностроение, 1974. –295с.
35. Ганеева Ж. Г.. "Определение понятия «Мониторинг» в различных сферах его применения" Вестник Челябинского государственного университета, vol. 8, no. 1, 2005, pp. 30-33.
36. Краус, М. Измерительные информационные системы / М. Краус, Э. Вошни. - Москва: Мир, 1975. - 312 с.
37. Новоселов, О. Н. Основы теории и расчета информационно-измерительных систем / О. Н. Новоселов, А. Ф. Фомин. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва: Машиностроение, 1991. - 336 с.
38. Куо Б., Теория и проектирование цифровых систем управления, М., Машиностроение, 1986 г.
39. Изерман Р. Цифровые системы управления: Пер. с англ.- М.: Мир, 1984.- 541 с.
40. Гаглюева И.Э. Анализ автоматизированных систем контроля, учета и управления электропотреблением / И.Э. Гаглюева // Перспективы развития информационных технологий. – Новосибирск: Изд-во ООО «Центр развития научного сотрудничества», 2011. – №6. – С.93–97.
41. Довгалюк О.Н., Исмаев Х.Б. Оптимизация процесса контроля параметров режима для автоматизированной системы контроля и управления электропотреблением / О.Н. Довгалюк, Х.Б. Исмаев // Сборник трудов

Международной научно-технической конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. – Белгород, 2015. – С.3167–3171.

42. Добаев А.З. Композиция алгоритмов анализа данных в автоматизированных системах контроля и учета электроэнергии / А.З. Добаев, Г.Е. Веселов, А.А. Кузьменко // Перспективы науки. – Тамбов: Фонд развития науки и культуры, 2017. – №3. – С.9–13.

43. Шаров В.В. Система автоматического контроля и учета электроэнергии на основе web-интерфейсов / В.В. Шаров, Р.И. Фатыхов // Датчики и системы. – М.: Сенсидат-Плюс, 2015. – №9–10. – С.62–64.

44. Игумнов С.Н. Автоматизация проектирования информационно-измерительной системы коммерческого и технического учета электроэнергии / С.Н. Игумнов // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – Астрахань: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Астраханский государственный университет», 2008. – №1. – С.12–15.

45. Энфорс АСКУЭ Предприятия // Комплексный учет энергоресурсов на предприятии URL: <https://nforceit.ru/npravleniya/programmnoe-obespechenie-askue/enfors-askue-predpriyatiya/> (дата обращения: 01.02.2022).

46. АИИС КУЭ ОРЭМ/АИИС КУЭ // Система АСКУЭ - НПО МИР URL: <https://mir-omsk.ru/products/generation/> (дата обращения: 01.02.2022).

47. АИИС "Матрица" // АИИС КУЭ (АСКУЭ) URL: <http://matritca.ru/produktsiya/aiis-kue-askue> (дата обращения: 01.02.2022).

48. Диспетчер // Система мониторинга "Диспетчер" URL: <https://tula.intechnology.ru/> (дата обращения: 01.02.2022).

49. Автоматизированная система коммерческого учета электроэнергии (АСКУЭ) - АО «Энергомера» // АСКУЭ - АО «Энергомера» URL: <http://www.energomera.ru/ru/products/askue/about> (дата обращения: 01.02.2022).

50. Система мониторинга промышленного оборудования // ЛО ЦНИТИ - Цифровое производство: ПО для станков с ЧПУ URL: <https://locniti.com/> (дата обращения: 01.02.2022).

51. Компания WINNUM – глобальный поставщик решений для Промышленного Интернета Вещей // URL: <https://winnum.io/production/> (дата обращения: 01.02.2022).

52. Siemens | MindSphere URL: <http://siemens.mindsphere.io/en> (дата обращения: 01.02.2022).

53. Обзор | CIMCO MDC-Max | CIMCO URL: <https://www.cimco.com/ru/software/cimco-mdc-max/overview/> (дата обращения: 01.02.2022).

54. Real-time Production Monitoring System | MachineMetrics URL: <https://www.machinemetrics.com/production-monitoring> (дата обращения: 01.02.2022).

55. Energy Monitoring Solution Practice URL: <https://www.aveva.com/en/products/energy-monitoring-solution/> (дата обращения: 01.02.2022).

56. Лапинин И.Г., Шестеренко А.В. Контроль электропотребления в распределительных сетях // Вюник УБНТЗ. — 1998. — № 5

57. Быценко С.Г. Инструментальное обеспечение рынка электроэнергетики. Концепция создания автоматизированной системы контроля и управления энергопотребления. Промышленная энергетика. №8, 9, 10 1997

58. Быценко С.Г. Инструментальное обеспечение рынка электроэнергетики. Концепция создания автоматизированной системы контроля и управления энергопотребления. Промышленная энергетика. №1, 2, 3, 4 1998

59. Гуртовцев А.Л. Комплексная автоматизация энергоучета на промышленных предприятиях и хозяйственных субъектах // Современные технологии автоматизации. №1999. №3

60. Ершов С.В., Фролоков Е.М. Система АСКУЭ // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, Вып. 12 Ч. 3. Тула: Изд-во ТулГУ, 2012 С. 31-37

61. Гришагина Н.М., Гарайшина Э.Г. автоматизированная система коммерческого учета энергетических электроэнергии (АСКУЭ) // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. №12. – с. 297-299
62. Tang, D. Li, L., and Du, K., 2006. “On the Developmental Path of Chinese Manufacturing Industry Based on Resource Restraint,” *Jiangsu Social Sciences*, vol. 4, pp. 51-58.
63. Council of the European Union, <http://consilium.europa.eu/>
64. Federal Ministry of Economics and Technology: Energy Concept for an Environmentally Sound, Reliable and Affordable Energy Supply, <http://www.bmu.de>
65. IEA: Energy Technology perspectives 2012, pathways to a clean energy system, executive summary. [www.iea.org](http://www.iea.org)
66. Gutowski, T., Dahmus, J., Thiriez, A., 2006. Electrical Energy Requirements for Manufacturing Processes, in: 13th CIRP International Conference of Life Cycle Engineering. Lueven, pp. 1–5
67. Нормирование и экономия расходов электрической энергии на машиностроительных предприятиях : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.09.03 / Петрицкий Сергей Александрович; [Место защиты: Нижегород. гос. техн. ун-т]. - Нижний Новгород, 2010. - 19 с.
68. Li, W., Kara, S., 2011. An empirical model for predicting energy consumption of manufacturing processes: a case of turning process. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.* 225, 1636–1646. <https://doi.org/10.1177/2041297511398541>
69. Guo, Y., Loenders, J., Duflou, J., Lauwers, B., 2012. Optimization of energy consumption and surface quality in finish turning. *Procedia CIRP* 1, 512–517. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.04.091>
70. Shaohua Hu, Fei Liu, Yan He, Tong Hu, 2012. An on-line approach for energy efficiency monitoring of machine tools *J. Clean. Prod.* 27, 133-140. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.01.013>
71. Li, L., Yan, J., Xing, Z., 2013. Energy requirements evaluation of milling machines based on thermal equilibrium and empirical modelling. *J. Clean. Prod.* 52, 113–121. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.02.039>

72. Li, T., Yuan, C., 2013. Numerical modeling of specific energy consumption in machining process, in: Proceedings of the ASME 2013 International Manufacturing Science and Engineering Conference. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, Wisconsin, USA, pp. 1–6. <https://doi.org/https://doi.org/10.1115/MSEC2013-1247>
73. Киреева, Наталья Владимировна. Управление затратами промышленного предприятия с многопродуктовым производством: автореферат дис. ... доктора экономических наук : 08.00.05 / Киреева Наталья Владимировна; [Место защиты: Юж.-Ур. гос. ун-т]. - Челябинск, 2015. - 39 с.
74. Velchev, S., Kolev, I., Ivanov, K., Gechevski, S., 2014. Empirical models for specific energy consumption and optimization of cutting parameters for minimizing energy consumption during turning. *J. Clean. Prod.* 80, 139–149. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.099>
75. Liu, N., Zhang, Y.F., Lu, W.F., 2015. A hybrid approach to energy consumption modelling based on cutting power: A milling case. *J. Clean. Prod.* 104, 264–272. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.049>
76. Zhao, G., Hou, C., Qiao, J., Cheng, X., 2016. Energy consumption characteristics evaluation method in turning. *Adv. Mech. Eng.* 8, 1–8. <https://doi.org/10.1177/1687814016680737>
77. Zhong, Q., Tang, R., Lv, J., Jia, S., Jin, M., 2016a. Evaluation on models of calculating energy consumption in metal cutting processes: a case of external turning process. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 82, 2087–2099. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7477-4>
78. Zhong, Q., Tang, R., Peng, T., 2016b. Decision rules for energy consumption minimization during material removal process in turning. *J. Clean. Prod.* 140, 1819–1827. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.084>
79. Zhou, L., Li, J., Li, F., Xu, X., Wang, L., Wang, G., Kong, L., 2017. An improved cutting power model of machine tools in milling process. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 91, 2383–2400. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9929-x>

80. Малькова, Людмила Дмитриевна. Разработка научно-методической базы управления энергопотреблением при механической обработке резанием: автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.02.07 / Малькова Людмила Дмитриевна; [Место защиты МГТУ им. Н.Э. Баумана, гос. ун-т]. - Москва, 2019. - 18 с.
81. Салихзянова, Н. А. Роль информационных систем в эффективном управлении современным предприятием / Н. А. Салихзянова, Д. Х. Галлямова // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – Т. 15. – № 4. – С. 170-172.
82. Белякова, Г. Я. Цифровая экономика и новые подходы к управлению производственной кооперацией в машиностроении / Г. Я. Белякова, Д. А. Фокина // Вестник Алтайской академии экономики и права. – 2019. – № 5-1. – С. 24-29.
83. Белякова, Г. Я. Особенности развития производственной кооперации машиностроителей в рамках ЕАЭС / Г. Я. Белякова, Д. А. Фокина // Фундаментальные исследования. – 2017. – № 11-1. – С. 190-194.
84. Сальников В.В., Ивутин А.Н., Французова Ю.В. Компьютерная поддержка использования энергетических ресурсов в производственной системе // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, Вып. 6. Тула: Изд-во ТулГУ, 2018 С. 106-114
85. Savnikov V.V. Computer based support for efficient use of energy in manufacturing // Proc. 7th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO) 2018, pp. 565-568.
86. Sychugov A., Frantsuzova Y., Salnikov V. (2020) Process Modeling for Energy Planning of Technological Systems. In: Radionov A., Karandaev A. (eds) Advances in Automation. RusAutoCon 2019. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 641. Springer, Cham (pp. 933-943)
87. ГОСТ 14.004-83 Технологическая подготовка производства. Термины и определения основных понятий (с Изменениями N 1, 2)
88. ГОСТ 3.1109-82 Единая система технологической документации (ЕСТД). Термины и определения основных понятий (с Изменением N 1)

89. Технология переработки природного газ и конденсата: Справочник: в 2 ч. - М.: ООО "Недра-Бизнесцентр", 2002 - ч.1
90. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве / А. М. Дальский, Б. М. Базров, А. С. Васильев и др. / Под ред. А. М. Дальского.— М.: Изд-во МАИ, 2000.
91. Патраков Н. Н., Курицына В. В. Моделирование дискретных технологических систем в производстве деталей аэрокосмической техники с позиции технологического наследования. / Информационные технологии в проектировании и производстве.— 2002.— №2.— С.67–71.
92. Salnikov V., Frantsuzova Y. (2021) Modeling of Production Process Energy Characteristics in Mechanical Engineering. In: Radionov A.A., Gasiyarov V.R. (eds) Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020). ICIE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-54817-9\\_70](https://doi.org/10.1007/978-3-030-54817-9_70)
93. Справочник технолога–машиностроения. Под. ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. –М.: Машиностроение, 1990. Т. 1, 2 –495с.
94. Вульф А. М. Резание металлов. –М: Машиностроение, 1973. –496с.
95. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов.–М.: Машиностроение, 1975. –344с.
96. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания. –М.: Машиностроение, 1976. –278с.
97. Старков В. К. Дислокационные представления о резании металлов. –М. Машиностроение, 1979. –160с.
98. Швец В. В. Некоторые вопросы теории технологии машиностроения. – М: Машиностроение, 1967. –64с.
99. Энергетический анализ и экологичность технологических процессов механообработки / Л. Э. Шварцбург, Н. А. Иванова, С. А. Рябов, Д. И. Кулизаде // Вестник МГТУ "Станкин". – 2021. – № 4(59). – С. 30-34.

100. Формирование наилучших доступных технологий механической обработки на основе энергоэффективности / Н. А. Иванова, С. А. Рябов, Л. Э. Шварцбург, Т. Заборовский // СТИН. – 2019. – № 7. – С. 38-40.

101. Михайлов О.П., Веселов О.В. Экспериментальное определение параметров привода металлорежущих станков//Станки и инструменты 1990. №8. С. 9-10

102. Комплексная автоматизация производства /Л. И. Волчкевич, М. П. Ковалев, М. М. Кузнецов. –М.: Машиностроение, 1983. –269с.

103. Фираго, Б. И. Теория электропривода / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. Минск: Техноперспектива, 2007. 585 с.

104. Trzynadlowski, A. Control of Induction Motors / A. Trzynadlowski. London: Academic Press, 2001. 228 p. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-701510-1.x5000-4>

105. Калдыбаев, Р. С. Адаптивные (самоадаптирующиеся) системы автоматического управления / Р. С. Калдыбаев // Международный студенческий научный вестник. – 2020. – № 6. – С. 8.

106. Сальников, В. С. Один из аспектов энергосбережения на промышленных предприятиях / В. С. Сальников, Ю. В. Французова // Системы управления электротехническими объектами (СУЭТО-8) : ТРУДЫ ВОСЬМОЙ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ, Тула, 11–12 декабря 2018 года. – Тула: Тульский государственный университет, 2018. – С. 40-43.

107. Сальников В.В. Французова Ю.В. Один из аспектов разработки системы планирования и мониторинга энергетической эффективности промышленных предприятий // Инновационные наукоемкие информационные технологии: доклады студентов, аспирантов, молодых ученых на научно-технической конференции Тула: Изд-во ТулГУ, 2019

108. Сальников С.В., Сальников В.В Информационное обеспечение состояния зоны резания при точении // МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ. Международный форум: тезисы. / Изд-во:

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (Санкт-Петербург). С. 149-151

109. Lv, J., Tang, R., & Jia, S. (2014). Therblig-based energy supply modeling of computer numerical control machine tools. *Journal of Cleaner Production*, 65, 168-177.

110. Zhang C., Jiang P. Sustainability Evaluation of Process Planning for Single CNC Machine Tool under the Consideration of Energy-Efficient Control Strategies Using Random Forests // *Sustainability*. 2019. Т. 11. № 11. С. 3060.

111. Eberspächer, Philipp & Schraml, Philipp & Schlechtendahl, Jan & Verl, Alexander & Abele, Eberhard. (2014). A Model- and Signal-based Power Consumption Monitoring Concept for Energetic Optimization of Machine Tools. *Procedia CIRP*. 15. 44–49. 10.1016/j.procir.2014.06.020.

112. Salnikov V., Frantsuzova Y. (2020) Energy Consumption Modeling of Machining Processes. In: Radionov A., Kravchenko O., Guzeev V., Rozhdestvenskiy Y. (eds) *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019)*. ICIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham (pp. 1285-1294)

113. Hu, L., Peng, C., Evans, S., Peng, T., Liu, Y., Tang, R., & Tiwari, A. (2017). Minimising the machining energy consumption of a machine tool by sequencing the features of a part. *Energy*, 121, 292-305.

114. Hu, L., Liu, Y., Peng, C., Tang, W., Tang, R., & Tiwari, A. (2018). Minimising the energy consumption of tool change and tool path of machining by sequencing the features. *Energy*, 147, 390-402.

115. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления. Оценивание параметров и состояния. – М.: Мир, 1975. – 681 с.

116. Костоглотов, А. А. Идентификация параметров динамических систем на основе объединенного принципа максимума / А. А. Костоглотов, В. В. Дерюшев, А. И. Костоглотов // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки*. – 2004. – № S2. – С. 13-18.

117. Дилигенская А.Н. Идентификация объектов управления. –Самара: Самарский государственный технический университет, 2009. – 136 с.

118. Шадский Г.В., Сальников В. С., Ерзин О.А. Управление эффективностью многоцелевых станков в технологических комплексах промышленных предприятий / Тула: Изд-во ТулГУ, 2009. – 185 с.

119. Аверьянов О.И. Модульный принцип построения станков с ЧПУ. –М.: Машиностроение, 1987. –232с.

120. Фираго Б.И., Александровский С.В. Энергетические показатели синхронного частотно-регулируемого электропривода. Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2018;61(4):287-298. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-4-287-298>

121. Shin, Seung-Jun & Woo, Jungyub & Rachuri, Sudarsan. (2017). Energy efficiency of milling machining: Component modeling and online optimization of cutting parameters. Journal of Cleaner Production. 161. 10.1016/j.jclepro.2017.05.013.

122. Кузовков Н.Т. Модальное управление и наблюдающие устройства. – М.: Машиностроение, 1976

123. Сальников В.В. Разработка системы энергетического анализа (ENSIS) объектов промышленных предприятий машиностроительного профиля // Инновационные наукоемкие информационные технологии: доклады студентов, аспирантов, молодых ученых на научно-технической конференции / под общ. ред. В.Ю. Анцева. Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. С. 19-22

124. Сальников В.В. Французова Ю.В. Технологический мониторинг энергопотребления производственных систем // Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производства: технология и надежность машин, приборов и оборудования: материалы XIV Международной научно-технической конференции. – Вологда: ВоГУ, 2020. С. 220-224

125. Французова, Ю. В. Интеллектуальная система энергетического мониторинга производственных систем / Ю. В. Французова, В. В. Сальников // Интеллектуальные и информационные системы. Интеллект - 2021 : Труды Всероссийской научно-технической конференции, Тула, 16–17 ноября 2021 года. – Тула: Тульский государственный университет (Тула), 2021. – С. 121-127.

126. Балакшин Б. С. Основы технологии машиностроения. –М: Машиностроение, 1969. –560с.
127. Васин С. А., Верещака А. С., Кушнер В. С. Резание металлов. Термомеханический подход к системе взаимодействий при резании. –М.:изд–во МГТУ им. Баумана,2001.–448с.
128. Великанов К.М., Новожилов В.В. Экономичные режимы резания металлов.–Л.: Машиностроение, Ленингр. отд–ние, 1972. –120с.
129. Игумнов Б.Н. Расчет оптимальных режимов обработки для станков и автоматических линий. –М.: Машиностроение, 1980. –265с
130. Рыжов Э.В. Оптимизация технологических процессов механической обработки. –Киев: Наук. Думка, 1989. –192с.
131. Шадский Г.В., Сальников В. С. Идентификация параметров процесса резания // Известия Тульского государственного университета. Серия машиностроение. Выпуск 1 (специальный). Сб. избр. тр. Первой международной электронной науч.–техн. конф. “Технологическая системотехника” 2002 –Тула: Гриф и К, 2003. с.209 –218.
132. Сальников В.В. Математическая модель энергопотребления промышленного оборудования // Интеллектуальные и информационные системы: Материалы Международной научно-технической конференции / Тульский государственный университет. – Тула, 2017 С. 221-224
133. Сальников В.В. Методика нормирования затрат энергоресурсов технологической операции // Интеллектуальные и информационные системы: материалы. Тула: Тульский государственный университет, 2016 С. 309-313
134. ISO 6983-1:2009 (Part 1) Automation system and integration. Numerical control of machines. Program format and definition of address words: Data format for positioning, line motion and contouring control systems // ISO, Geneva
135. Устройства числового программного управления для металлообрабатывающего оборудования: ГОСТ 20999-83. – Издание официальное. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1983. – 28 с.

136. Сальников В.В., Французова Ю.В. Энергетический анализ управляющих программ для многоцелевых станков // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. Научный журнал, Том 7, № 2 С. 275-283

137. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022660690 «Программный модуль для анализа управляющих программ для станков с числовым программным управлением» / Правообладатель: ФГБОУ ВО ТулГУ / Сальников В.В. Заявка №2022619957. Дата поступления: 30.05.2022 Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ: 08.06.2022

138. P Kalman, R. E., A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems Trans. ASME (American Society of Mechanical Engineers), J. Basic Eng., 1960, vol. 82 D.

139. Kalman, R. E., Contributions to the Theory of Optimal Control. Bol. Soc. Mat. Mexicana, 5, 102-119, 1960.

140. Калман Р. Об общей теории систем управления // Труды 1-го конгресса ИФАК. М: Из-во АН СССР. 1961г., Т.2 .521-547. (On the general theory of control systems, in Proceeding first IFAC Congress on Automatic Control, Moscow, 1960; Butterworths, London, 1961, Vol. 1, pp.481-492.

141. UMC-750SS | 5-осевой фрезерный станок | Конус ISO 40 // HAAS F1 TEAM URL: <https://www.haascnc.com/ru/machines/vertical-mills/universal-machine/models/umc-750ss.html> (дата обращения: 02/02/2022).

142. Бушуев В.В. Повышение точности станков с ЧПУ для контурной обработки за счет улучшения динамических характеристик электромеханических приводов подачи: дис. канд. тех. наук: 05.02.07. - М., 2017. - 183 с.

143. V. Salnikov and Y. Frantsuzova, "Monitoring the Consumption of Energy Resources in Cyberphysical Production Systems," 2021 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), 2021, pp. 142-147, doi: 10.1109/RusAutoCon52004.2021.9537521

144. В.В. Сальников, Ю.В. Французова Моделирование энергетических характеристик производственных процессов в машиностроении // 56 научно-

практическая конференция профессорско-преподавательского состава ТулГУ: сборник докладов. В 2 ч. / под ред. д-ра техн. наук М.С. Воротилина. Ч. 2. Тула: Изд-во ТулГУ, 2020 С. 371-380

145. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022660689 «Программа моделирования потребления электроэнергии производственными системами с учетом загрузки оборудования» / Правообладатель: ФГБОУ ВО ТулГУ / Сальников В.В. [и др.] Заявка №2022619963. Дата поступления: 30.05.2022 Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ: 08.06.2022

146. MTConnect Standard // MTConnect URL: <https://www.mtconnect.org/standard-download20181> (дата обращения: 02.02.2022).

**Акты внедрения**

Утверждаю  
 Генеральный директор  
 ОАО «МИЛЕНА»  
 Е. В. Андреева  
 2021

**АКТ**

внедрения результатов диссертационной работы

Акт составлен о том, что результаты диссертационной работы Сальникова Владимира Владимировича «Информационно-измерительная и управляющая система энергетического мониторинга с идентификацией источников и причин нарушения режимов энергопотребления» используются на ОАО «МИЛЕНА» при отладке ТП обработки заготовок на участке МЦС.

В частности:

- модуль анализа управляющих программ, позволяющий оценить адекватность траекторий формообразования на предмет корректности назначения холостых ходов, оказывающих влияние на энергопотребление.
- модуль информационно-измерительной системы энергетического мониторинга, воспроизводящий желаемый режим энергопотребления МЦС с целью оценки отклонений реальных процессов от него.

Перечисленные элементы результатов исследований Сальникова В.В. используются при запуске деталей в производство и позволяют снизить приведенные затраты энергии на участке МЦС.

Технический уровень разработки отвечает современным требованиям.

Начальник технологического отдела

Особоюйник А.А.

## ООО НИИ «Научеёмкие Технологии»

Юридический адрес: 300034 г.Тула, ул. Революции, 35 а

тел./ф. 8(4872) 55-26-44 e-mail: [info@ssoft24.com](mailto:info@ssoft24.com)

ИНН/КПП 7106501828/710601001

### АКТ

о внедрении результатов диссертационного исследования

Настоящим удостоверяется, что рекомендации, содержащиеся в диссертационном исследовании Сальникова Владимира Владимировича, использовались в ООО НИИ «Научеёмкие Технологии» при создании информационно-измерительной и управляющей системы энергетического мониторинга, что позволило оперативно идентифицировать источники и причины нарушения штатных режимов энергопотребления и повысить эффективность принятия управленческих решений при проведении энергосберегающих мероприятий.

Директор ООО НИИ  
«Научеёмкие Технологии»



Маслова А.А.

Утверждаю  
Генеральный директор  
ООО «Опытно-Производственный центр  
Тулеского завода механических систем»

Козлов А.А.  
2022г.

АКТ

внедрения результатов научно-исследовательской работы

Комиссия в составе: председателя, генерального директора ООО «Опытно-Производственный центр Тульского завода механических систем» Козлов А.А. и членов комиссии - главного инженера Фокина Кирилла Дмитриевича, главного технолога Казьмина Сергей Юрьевича, составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Сальникова Владимира Владимировича «Информационно-измерительная и управляющая система энергетического мониторинга с идентификацией источников и причин нарушения режимов энергопотребления», в частности, методик, математических моделей, программных и технических средств используются в ООО «Опытно-Производственный центр Тульского завода механических систем» при проектировании и отладке ТП обработки заготовок на участке МЦС с целью повышения энергоэффективности производства.

Технический уровень разработок соответствует современным требованиям.

Главный инженер

Фокин К.Д.

Главный технолог

Казьмин С.Ю.



Общество с ограниченной ответственностью  
«СервисСофт Инжиниринг»  
Инновационно-промышленная группа

115201, Москва г, Каширский проезд, дом № 13, помещение XIII Эт. 2, Ком 2, internet: <http://www.ssoft24.ru/> e-mail: [info@ssoft24.com](mailto:info@ssoft24.com)

Справка  
о внедрении результатов диссертационного исследования

Выдана Сальникову В.В. для представления в ученый совет Д24.2.417.03 при ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» по адресу 300012, г.Тула, пр. Ленина, 92

Сальников В.В. проводил исследования, связанные с разработкой информационно-измерительной и управляющей системы энергетического мониторинга, позволяющей идентифицировать источники и причины нарушения штатных режимов энергопотребления.

**Практическое применение.** Результаты работы были использованы и применяются в настоящее время для совершенствования информационно-измерительных и управляющих систем энергетического мониторинга путем реализации возможностей идентификации источников и причин нарушения штатных режимов энергопотребления.

**Практическая значимость.** Руководство ООО «СервисСофт Инжиниринг» отмечает целесообразность использования положений, разработок и практических рекомендаций диссертации Сальникова В.В. в практической деятельности энергетических служб промышленных предприятий по повышению их энергетической эффективности

Директор ООО «СервисСофт Инжиниринг»



В.В. Сергеечев

17.05.2022 г.

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
**Федеральное государственное бюджетное**  
**образовательное учреждение высшего образования**  
**ТУЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**



УТВЕРЖДАЮ  
 Проректор по учебной работе  
 и цифровизации  
 ФГБОУ ВО ТулГУ  
 д.т.н., доцент  
 В.В. Котов  
 «15» 02 2022 г.

**АКТ**

**о внедрении результатов научно-исследовательской работы  
 в учебный процесс**

Настоящий акт подтверждает то, что научные положения и результаты диссертационного исследования Сальникова Владимира Владимировича, проведенного по теме «Информационно-измерительная и управляющая система энергетического мониторинга с идентификацией источников и причин нарушения режимов энергопотребления» успешно внедрены в учебный процесс и используются при чтении лекций, проведении лабораторных и практических занятий по дисциплинам: «Основы моделирования систем», «Проектирование информационных систем» и «Структуры и алгоритмы обработки данных» для студентов, обучающихся на кафедре «Вычислительная техника» ТулГУ.

Директор института прикладной  
 математики и компьютерных наук  
 д.т.н., доц.

А.А. Сычугов

Заведующий кафедрой  
 вычислительной техники  
 д.т.н., проф.

А.Н. Ивутин

12022

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**СВИДЕТЕЛЬСТВО**  
о государственной регистрации программы для ЭВМ  
№ 2022660690

**Программный модуль для анализа управляющих программ для станков с числовым программным управлением**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет» (ТулГУ) (RU)*

Автор(ы): *Сальников Владимир Владимирович (RU)*

Заявка № 2022619957  
Дата поступления 30 мая 2022 г.  
Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 08 июня 2022 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности



*Ю.С. Зубов*

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022660689

Программа моделирования потребления  
электроэнергии производственными системами с учетом  
загрузки оборудования

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Тульский государственный университет» (ТулГУ) (RU)*

Авторы: *Сальников Владимир Владимирович (RU),  
Французова Юлия Вячеславовна (RU)*

Заявка № 2022619963

Дата поступления 30 мая 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 08 июня 2022 г.



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

## Фрагмент УП обработки детали типа шестерня

N1290G01Z-3.95F400.	N1585Z-6.8	N1905G01Y-60.
N1295Y90.625	N1590G01Z-11.75F400.	N1910G02X155.Y-82.5I-22.5J0
N1300X155.F1069.521	N1595Y90.625	N1915G01X-65.
N1305G02X185.625Y60.I0J-	N1600X155.F1069.521	N1920G02X-87.5Y-60.I0J22.5
30.625	N1605G02X185.625Y60.I0J-	N1925G01Y60.
N1310G01Y-60.	30.625	N1930G02X-65.Y82.5I22.5J0
N1315G02X155.Y-90.625I-	N1610G01Y-60.	N1935G01X46.6
30.625J0	N1615G02X155.Y-90.625I-	N1940Y94.5
N1320G01X-65.	30.625J0	N1945G00Z3.
N1325G02X-95.625Y-	N1620G01X-65.	N1950G90G54X43.4Y94.5
60.I0J30.625	N1625G02X-95.625Y-	N1955Z-2.9
N1330G01Y60.	60.I0J30.625	N1960G01Z-7.85F400.
N1335G02X-65.Y90.625I30.625J0	N1630G01Y60.	N1965Y82.5
N1340G01X46.6	N1635G02X-65.Y90.625I30.625J0	N1970X155.F1069.521
N1345Y102.625	N1640G01X46.6	N1975G02X177.5Y60.I0J-22.5
N1350G00Z3.		N1980G01Y-60.
N1355G90G54X43.4Y102.625	N1645Y102.625	N1985G02X155.Y-82.5I-22.5J0
N1360Z-.95	N1650G00Z3.	N1990G01X-65.
N1365G01Z-5.9F400.	N1655G90G54X43.4Y102.625	N1995G02X-87.5Y-60.I0J22.5
N1370Y90.625	N1660Z-8.75	N2000G01Y60.
N1375X155.F1069.521	N1665G01Z-12.F400.	N2005G02X-65.Y82.5I22.5J0
N1380G02X185.625Y60.I0J-	N1670Y90.625	N2010G01X46.6
30.625	N1675X155.F1069.521	N2015Y94.5
N1385G01Y-60.	N1680G02X185.625Y60.I0J-	N2020G00Z3.
N1390G02X155.Y-90.625I-	30.625	N2025G90G54X43.4Y94.5
30.625J0	N1685G01Y-60.	N2030Z-4.85
N1395G01X-65.	N1690G02X155.Y-90.625I-	N2035G01Z-9.8F400.
N1400G02X-95.625Y-	30.625J0	N2040Y82.5
60.I0J30.625	N1695G01X-65.	N2045X155.F1069.521
N1405G01Y60.	N1700G02X-95.625Y-	N2050G02X177.5Y60.I0J-22.5
N1410G02X-65.Y90.625I30.625J0	60.I0J30.625	N2055G01Y-60.
N1415G01X46.6	N1705G01Y60.	N2060G02X155.Y-82.5I-22.5J0
N1420Y102.625	N1710G02X-65.Y90.625I30.625J0	N2065G01X-65.
N1425G00Z3.	N1715G01X46.6	N2070G02X-87.5Y-60.I0J22.5
N1430G90G54X43.4Y102.625	N1720Y102.625	N2075G01Y60.
N1435Z-2.9	N1725G00Z3.	N2080G02X-65.Y82.5I22.5J0
N1440G01Z-7.85F400.	N1730G90G54X43.4Y94.5	N2085G01X46.6
N1445Y90.625	N1735G01Z-2.F400.	N2090Y94.5
N1450X155.F1069.521	N1740Y82.5	N2095G00Z3.
N1455G02X185.625Y60.I0J-	N1745X155.F1069.521	N2100G90G54X43.4Y94.5
30.625	N1750G02X177.5Y60.I0J-22.5	N2105Z-6.8
N1460G01Y-60.	N1755G01Y-60.	N2110G01Z-11.75F400.
N1465G02X155.Y-90.625I-	N1760G02X155.Y-82.5I-22.5J0	N2115Y82.5
30.625J0	N1765G01X-65.	N2120X155.F1069.521
N1470G01X-65.	N1770G02X-87.5Y-60.I0J22.5	N2125G02X177.5Y60.I0J-22.5
N1475G02X-95.625Y-	N1775G01Y60.	N2130G01Y-60.
60.I0J30.625	N1780G02X-65.Y82.5I22.5J0	N2135G02X155.Y-82.5I-22.5J0
N1480G01Y60.	N1785G01X46.6	N2140G01X-65.
N1485G02X-65.Y90.625I30.625J0	N1790Y94.5	N2145G02X-87.5Y-60.I0J22.5
N1490G01X46.6	N1795G00Z3.	N2150G01Y60.
N1495Y102.625	N1800G90G54X43.4Y94.5	N2155G02X-65.Y82.5I22.5J0
N1500G00Z3.	N1805Z1.	N2160G01X46.6
N1505G90G54X43.4Y102.625	N1810G01Z-3.95F400.	N2165Y94.5
N1510Z-4.85	N1815Y82.5	N2170G00Z3.
N1515G01Z-9.8F400.	N1820X155.F1069.521	N2175G90G54X43.4Y94.5
N1520Y90.625	N1825G02X177.5Y60.I0J-22.5	N2180Z-8.75
N1525X155.F1069.521	N1830G01Y-60.	N2185G01Z-12.F400.
N1530G02X185.625Y60.I0J-	N1835G02X155.Y-82.5I-22.5J0	N2190Y82.5
30.625	N1840G01X-65.	N2195X155.F1069.521
N1535G01Y-60.	N1845G02X-87.5Y-60.I0J22.5	N2200G02X177.5Y60.I0J-22.5
N1540G02X155.Y-90.625I-	N1850G01Y60.	N2205G01Y-60.
30.625J0	N1855G02X-65.Y82.5I22.5J0	N2210G02X155.Y-82.5I-22.5J0
N1545G01X-65.	N1860G01X46.6	N2215G01X-65.
N1550G02X-95.625Y-	N1865Y94.5	N2220G02X-87.5Y-60.I0J22.5
60.I0J30.625	N1870G00Z3.	N2225G01Y60.
N1555G01Y60.	N1875G90G54X43.4Y94.5	N2230G02X-65.Y82.5I22.5J0
N1560G02X-65.Y90.625I30.625J0	N1880Z-.95	N2235G01X46.6
N1565G01X46.6	N1885G01Z-5.9F400.	N2240Y94.5
N1570Y102.625	N1890Y82.5	N2245G00Z3.
N1575G00Z3.	N1895X155.F1069.521	N2250Z25.
N1580G90G54X43.4Y102.625	N1900G02X177.5Y60.I0J-22.5	N2255G90G54X46.6Y-106.5

N2260Z-9.  
N2265G01Z-14.F1000.  
N2270Y-95.5F802.141  
N2275X-95.F1069.521  
N2280G02X-120.5Y-70.I0J25.5  
N2285G01Y70.  
N2290G02X-95.Y95.5I25.5J0  
N2295G01X185.  
N2300G02X210.5Y70.I0J-25.5  
N2305G01Y-70.  
N2310G02X185.Y-95.5I-25.5J0  
N2315G01X43.4  
N2320Y-106.5  
N2325G00Z-9.  
N2330G90G54X46.6Y-106.5  
N2335Z-11.  
N2340G01Z-16.F1000.  
N2345Y-95.5F802.141  
N2350X-95.F1069.521  
N2355G02X-120.5Y-70.I0J25.5  
N2360G01Y70.  
N2365G02X-95.Y95.5I25.5J0  
N2370G01X185.  
N2375G02X210.5Y70.I0J-25.5  
N2380G01Y-70.  
N2385G02X185.Y-95.5I-25.5J0  
N2390G01X43.4  
N2395Y-106.5  
N2400G00Z-9.  
N2405G90G54X46.6Y-106.5  
N2410Z-13.  
N2415G01Z-18.F1000.  
N2420Y-95.5F802.141  
N2425X-95.F1069.521  
N2430G02X-120.5Y-70.I0J25.5  
N2435G01Y70.  
N2440G02X-95.Y95.5I25.5J0  
N2445G01X185.  
N2450G02X210.5Y70.I0J-25.5  
N2455G01Y-70.  
N2460G02X185.Y-95.5I-25.5J0  
N2465G01X43.4  
N2470Y-106.5  
N2475G00Z-9.  
N2480G90G54X46.6Y-106.5  
N2485Z-15.  
N2490G01Z-20.F1000.  
N2495Y-95.5F802.141  
N2500X-95.F1069.521  
N2505G02X-120.5Y-70.I0J25.5  
N2510G01Y70.  
N2515G02X-95.Y95.5I25.5J0  
N2520G01X185.  
N2525G02X210.5Y70.I0J-25.5  
N2530G01Y-70.  
N2535G02X185.Y-95.5I-25.5J0  
N2540G01X43.4  
N2545Y-106.5  
N2550G00Z-9.  
N2555G90G54X46.6Y-106.5  
N2560Z-17.  
N2565G01Z-22.F1000.  
N2570Y-95.5F802.141  
N2575X-95.F1069.521  
N2580G02X-120.5Y-70.I0J25.5  
N2585G01Y70.  
N2590G02X-95.Y95.5I25.5J0  
N2595G01X185.  
N2600G02X210.5Y70.I0J-25.5  
N2605G01Y-70.  
N2610G02X185.Y-95.5I-25.5J0  
N2615G01X43.4  
N2620Y-106.5  
N2625G00Z-9.  
N2630G90G54X46.6Y-106.5  
N2635Z-19.  
N2640G01Z-24.F1000.

```

% Предупреждение: MATLAB ранее выходил из строя из-за низкоуровневой
% графической ошибки.
clear;
format short e

% загрузка данных Flanec
load('gcode_g0203_v2.mat');
% чтение данных из таблицы
begPnt = 76;
endPnt = 3100 %1564;

% загрузка данных Shesterny
% load('d:\SVS\Matlab\gcode_g3.mat');
% % чтение данных из таблицы
% begPnt = 260;
% endPnt = 530;

x_cntr = gcode('x');
y_cntr = gcode('y');
z_cntr = gcode('z');
F = gcode('F');
fX = gcode('fX');
fY = gcode('fY');
fZ = gcode('fZ');
t = gcode('t');
% выбор куска траектории
x00 = x_cntr(begPnt:endPnt);
y00 = y_cntr(begPnt:endPnt);
z00 = z_cntr(begPnt:endPnt);
fX0 = fX(begPnt:endPnt);
fY0 = fY(begPnt:endPnt);
fZ0 = fZ(begPnt:endPnt);
t0 = t(begPnt:endPnt);

% Задание вектора времени!!!!!!
t00 = t0 - t0(1,1);

[time_u, unique_indeces] = unique(t00);
x00 = x00(unique_indeces, :);
y00 = y00(unique_indeces, :);
z00 = z00(unique_indeces, :);

fX0 = fX0(unique_indeces, :);
fY0 = fY0(unique_indeces, :);
fZ0 = fZ0(unique_indeces, :);

% шаг выбирать на порядок меньше минимальной длительности кадра
%t=[0:0.0008:t00(length(t00))];%for Shesterny
t=[0:0.08:time_u(length(time_u))];
%t=[0:0.008:time_u(length(time_u))];

% fX00 = interp1(t00, fX0, t);
% fY00 = interp1(t00, fY0, t);
% fZ00 = interp1(t00, fZ0, t);

fX00 = interp1(time_u, fX0, t, 'next');
fY00 = interp1(time_u, fY0, t, 'next');
fZ00 = interp1(time_u, fZ0, t, 'next');

% H=zeros(2,2)
% H(1,1)=1;H(2,2)=2;H

%Исходные параметры*****
A=zeros(8,8);
B=zeros(8,8);
Dk2=zeros(4,4);
Jx=0.005; Jy=1.2*Jx;Jz=1.2*Jy; Js=Jz;
Rx=0.74; Ry=0.74;Rz=0.74;Rs=0.74;
Lx=0.02;Ly=0.02;Lz=0.02;Ls=0.02;
Cmx=1.0;Cmy=1.0;Cmz=1.0;Cms=1.0;
Cex=0.012;Cey=0.012;Cez=0.012;Ces=0.012;
% KVx=20;KVy=20;KVz=20;KVs=20;
KVx=10;KVy=10;KVz=10;KVs=10;
% KVx=2.0;KVy=2.0;KVz=2.0;KVs=2.0;

```

```

A(1,5)=1/Jx;A(2,6)=1/Jy;A(3,7)=1/Jz;A(4,8)=1/Js;
A(5,5)=-Rx/(Cmx*Lx);A(6,6)=-Ry/(Cmy*Ly);A(7,7)=-Rz/(Cmz*Lz);A(8,8)=-Rs/(Cms*Ls);%???
A(5,1)=-Cex/(Lx);A(6,2)=-Cey/(Ly);A(7,3)=-Cez/(Lz);A(8,4)=-Ces/(Ls);%???
B(5,5)=KVx/(Lx);B(6,6)=KVy/(Ly);B(7,7)=KVz/(Lz);B(8,8)=KVs/(Ls);%???
B(1,1)=1/Jx;B(2,2)=1/Jy;B(3,3)=1/Jz;B(4,4)=1/Js;
CNx=10.0;CNy=10.0;CNz=10.0;CNS=10.0;%

%Dk2 матрица с постоянными коэффициентами не позволяет моделировать
%уменьшение нагрузки на XX. На XX Dk2=0 или использовать sys1
%Dk2(1,1)=CNx/Jx;Dk2(2,2)=CNy/Jy;Dk2(3,3)=CNz/Jz;Dk2(4,4)=CNS/Js;
Dk2(1,1)=CNx;Dk2(2,2)=CNy;Dk2(3,3)=CNz;Dk2(4,4)=CNS;% приучете матрицы B

%Перекрестные связи!!!!!!появляется скорость при u=0
% Dk2(2,1)=0.2*Dk2(1,1);Dk2(3,1)=0.2*Dk2(1,1);
% Dk2(1,2)=0.2*Dk2(2,2);Dk2(3,2)=0.2*Dk2(2,2);
% Dk2(1,3)=0.2*Dk2(3,3);Dk2(2,3)=0.2*Dk2(3,3);

%Асходные матрицы
% A; %Fx, Fy, Fz, Fs Mnx, Mny, Mnz, Mns,
% B;% Матрица управления %Mxx, Mxy, Mxz, Mxs Ux, Uy, Uz, Us,
% Dk2; % Матрица нагрузки пропорциональна скоростям
% Матрица наблюдения Z=diag([1;2;3;4])
C=eye(8);

% Матрица постоянных возмущений по управлению Pxx
D = zeros(8,8);
% Исходная модель САУ непрерывная
Ts=0;%Ts=-1 система не утойчива
sysP = ss(A,B,C,D,Ts);
%size(sysP)
%sysP.OutputName
%sysP.InputName

%управляемость и наблюдаемость sysP
%Rc=ctrb(sysP); Dn=obsv(sysP); Hcn=Dn*Rc;r1=rank(Rc), r2=rank(Dn), r3= rank(Hcn)
%sysM=canon(sysP,'modal'); sysM.a, sysM.b, sysM.c % T
%???[sysC,T]=canon(sysP,'compan'); sysC.a, sysC.b, sysC.c, T, ctrb(sysP)

% Матрица коэффициентов ООС по скорости
%for Flanec Ko=200 for shesterny Ko=20000
Dk = 200*[ 0.001    0    0    0
           0    0.001    0    0
           0    0    0.001    0
           0    0    0    0.001 ];%Fx, Fy, Fz, S, if aij>0 ООС

%Замена соединения блоков и формирование новой матрицы A с учетом ООС
D0=zeros(8,4);
Dk0=[Dk2;Dk];
Dk01=[Dk0,D0];
B*Dk01;
% A
A=A-B*Dk01;% Обратная связь по состоянию, а не по наблюдению
sys = ss(A,B,C,D,Ts);
%управляемость и наблюдаемость sys
Rc=ctrb(sys); Dn=obsv(sys); Hcn=Dn*Rc;r1=rank(Rc), r2=rank(Dn), r3= rank(Hcn)
% size(sys)
% sys.OutputName
% sys.InputName
%*****
%Dополнительная идеальная система с овыми возмущениями
A2=0.5*A;% Штатная модель параметров(вероятно она должна быть и Калмане)
Dk22=1.5*Dk2;%Модель штатных возмущений
Dk02=[Dk22;Dk];
Dk012=[Dk02,D0];
B2=0.5*B;
%B*Dk01;
% Модель с возмущениями параметрическими и контролируемыеми
A2=A2-B2*Dk012;% Штатная модель параметров
sys2 = ss(A2,B2,C,D,Ts);% Штатная модель ЦМСт без возмущений
% Идеальная модель
A2=A;
B2=B;
%Штатная модель ЦМСт с возмущений
% B4=zeros(8,8);
B4=10.0*eye(8);%200 существенно влияет на границы!!!!!!!!!!!!*****
sys3=ss(A2,[B2 B4],C,[D D],Ts);%,'InputName', ['u' 'z'] , 'OutputName', ['ym']);
%size(sys3)
% sys3.InputName
%*****

```

```

% Модель стохастического возмущения
% Fmm=ones(1,8)*0.1;
% %fm=Fmm.*randn(length(t),1);%(повходу)
% Модель постоянного возмущения
% fm=Fmm.*heaviside(t);
%*****
%B3=zeros(8)
B3=30.0*eye(8); % !увеличение коэффициента приводит к ухудшению фильтрации!!
% увеличивает пропорционально EstErrCovY1 при10 нет помех при 100 0.5 от исход
% Исходный объект с шмами по управлению
Plant=ss(A,[B B3],C,[D D],Ts);%,-1 discret model no work
%Plant=ss(A,[B B],C,[D D],Ts);
% Plant.InputName
% Plant.OutputName
%size(Plant)

%*****
%INTENSIVNOST NOISE best filtr
% Q = eye(8)*0.01;%(повходу) intensiv noise influens on const in Ye
% R = eye(8)*0.01;%(по выходу)больше 0.005 очень большой шум

% For demonstraion NOISE INTENSIVNOST NOISE supper best filtr
Q = eye(8)*0.0001;%(повходу) intensiv noise influens on const in Ye
R = eye(8)*0.0001;%(по выходу)больше 0.005 очень большой шум

w=(sqrtm(Q)*ones(8,1))'.*randn(length(t),1);%(повходу)
v=(sqrtm(R)*ones(8,1))'.*randn(length(t-1),1);%(по выходу)

%Model САУ*****
% Построение фильтра Калмана на модели Plant, Mx,Z,Mu-только в дискретн моделях
[kalmf,L,P,M] = kalman(Plant,Q,R);%есть только в дискретн моделях
% kalmf.InputGroup.controls1= [1,2,3];%???
% kalmf.InputGroup.yv =[4,5];%???
% kalmf.OutputGroup
% kalmf.InputName
% kalmf.OutputName
%size(kalmf);

% Для проверки ФКБ строится генератор: Модель объекта с шумами по входу и выходу
a=A;
bv=zeros(8,8);
% b=[B B3 bv];%???
b=[B B bv];
c=[C;C];
dk= eye(8);
d=[D D 0*dk;D D dk];
Psys=ss(a,b,c,d,Ts);%,-1 discret model no work
% Psys.InputGroup.controls2= [1,2,3];
% Psys.InputGroup.noise= [4,5,6,7,8];
% Psys.InputName
% Psys.OutputName
%size(Psys)

% Подключение генератора входных сигналов к ФКБ объединени по U
sysP=parallel(Psys,kalmf,[1,2,3,4,5,6,7,8],[1,2,3,4,5,6,7,8],[[],[]]);
%size(sysP);%перевернул вектор воздействий с [u,w,v] на {'w' 'v' 'u'}!!!!
% sysP.InputName
% sysP.OutputName

%Соединить входы #sysP(kalmf) Yv [25...32] с выходами sysP(Psys) Yv [9..16] ПОС!!!!!!!!!!!!
sysP2 = 1.0*eye(8);%ifluens on dinamic sys = feedback(G,K,feedin,feedout,1)
SimModel=feedback(sysP,sysP2, [25,26,27,28,29,30,31,32],[9,10,11,12,13,14,15,16],1);
% SimModel.InputName
% SimModel.OutputName
%Удалить yv из списка входов Yv [25...32] SimModel([output],[input])!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
%x1-x8-coordinata stats sysP, x9-x16 -coordinata stats kalmf исключены из выходов?
SimModel = SimModel([1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24], ...
[1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24]);%y,yv,ye not X
%State-space model with 24 outputs (yw,yvw,ye), 24 inputs(w,v,u), and 16 states.
% SimModel.InputName
% SimModel.OutputName
% size(SimModel)

%SimModel2=parallel(sys,SimModel,[1,2,3,4,5,6,7,8],[17,18,19,20,21,22,23,24],[[],[]]);%*?????
%SimModel2=parallel(SimModel,sys,[17,18,19,20,21,22,23,24],[1,2,3,4,5,6,7,8],[[],[]]);%not filtr on W
SimModel2=parallel(SimModel,sys2,[17,18,19,20,21,22,23,24],[1,2,3,4,5,6,7,8],[[],[]]);
%State-space model with 32 outputs (yw,yv,ye,y), 24 inputs(w,v,u), and 24 states.
% SimModel2.InputName
% SimModel2.OutputName
% size(SimModel2)

```

```

SimModel3=parallel(SimModel,sys3,[17,18,19,20,21,22,23,24],[1,2,3,4,5,6,7,8],[[],[]]);

% Задание вектора входных воздействий!*****
%%
% u5 = round((10*fX00),5);
% u6 = round((10*fY00),5);
% u7 = round((10*fZ00),5);
u5 = (10*fX00);
u6 = (10*fY00);
u7 = (10*fZ00);
u50 = abs(u5);
u60 = abs(u6);
u70 = abs(u7);

% u5=2*sin(0.05*t);
% u6=2*cos(0.05*t);
% u7=0.*heaviside(t);
% u50=abs(u5);
% u60=abs(u6);
% u70=abs(u7);
u8=1.45+0.015*sin(23.8*t);%colm????

%non line controls*****
% Задание вектора входных постоянных возмущений!!!!!!потери в двигателе
Pxx=0.2;
%V0=0.4*heaviside(t);
V0=0.1*heaviside(t);%при изменении Ку СУ и уменьшении Ubx необходимо уменьшитьV0

M01=0.1;
P01=0.2*heaviside(t);%=0.4
K01=200.0;
u11=P01.*(1+K01*((u60-V0).*(u60-V0)));
u10=heaviside(u60-V0);
PYx=(1-u10).*u11+u10.*P01;
u13=P01.*(1+K01*((u50-V0).*(u50-V0)));
u12=heaviside(u50-V0);
PXx=(1-u12).*u13+u12.*P01;
u14=heaviside(u70-V0);
u15=P01.*(1+K01*((u70-V0).*(u70-V0)));
PZx=(1-u14).*u15+u14.*2.5.*P01;
PSx=0.2*Pxx*u8.*u8;
Mxx=-0.1;
Mxxx=Mxx*sign(u5).*heaviside(t);%Mx>0 if u5<0 round
Mxxy=Mxx*sign(u6).*heaviside(t);
Mxxz=Mxx*sign(u7).*heaviside(t);
% Vxx=2.0;%for Flanec
Vxx=0.3;%for Shesterny
u1=Mxxx+48.0*u5.*(heaviside(u50-Vxx));%токовая компенсация нагрузки на XXdk2

%*****
%при50 Nf(for XX)=0;при46.9 Nf(for XX)=0.8;при 45.9 Nf(for XX)=1.15; при47.9 Nf(for XX)=0.7
u2=Mxxy+4.9*u6.*(heaviside(u60-Vxx));
u3=Mxxz+4.9*u7.*(heaviside(u70-Vxx));
u4=Mxx+0.0*u8;
%*****
%моделирует увеличение нагрузки по оси X в отрицательном направлении-
%увеличение ширины реза в отрицательном направлении, т.е. ошибка установки
%детали -2мм?
Knx=0.55;%появляется скорость при u=0
Mnx=Knx*u50;
%u1=u1+Mnx;%искажает всю картину+10.;
u = [u1 u2 u3 u4 u5 u6 u7 u8];
%*****
%Стохастические возмущения на входе A3
Fmm=ones(1,8)*0.1;
%fm=Fmm.*randn(length(t),1);%(повходу)
%Модель постоянного возмущения на входе A3
fm=Fmm.*heaviside(t);
fm(:,1)=fm(:,1)-40*Mnx;%
%+11.2*Mnx;%-40 Возмущение, компенсирующее Mnx на входе u1(B=200,B4=10)
%не удаётся скомпенсировать возмущение Mnx

% моделирование работы САУ!!!!!!*****
% [y,t,x] = lsim(sys,u, t);
% [y,out,x]=lsim(Plant,[u,w],t);%CAY with noise on U
% [y,out,x]=lsim(Psys,[u,w,v],t);%CAY with noise on U and Y
%параллельное соединение блоков меняет нумерацию входов с [u,w,v] на [w,v,u]
%тк входы u Psys подключаются ко входам u kalmf

% [y,out,x]=lsim(SimModel,[w,v,u]);% with Ts=-1 система не утойчива

```

```

[y,out,x]=lsim(SimModel2,[w,v,u],t);%%!!!!!!!!!!!!!!*

%[y,out,x]=lsim(SimModel3,[w,v,u,fm],t);%%
%size(y)
%hold on
%*****
%Calc power
Nfxw=abs(y(:,1).*y(:,5))+PXx;
Nuxw=abs(y(:,1).*x(:,5));
Nfyw=abs(y(:,2).*y(:,6))+PYx;
Nuyw=abs(y(:,2).*x(:,6));
Nfzw=abs(y(:,3).*y(:,7))+PZx;
Nuzw=abs(y(:,3).*x(:,7));

Nfxwv=abs(y(:,9).*y(:,13))+PXx;
Nuxwv=abs(y(:,9).*x(:,13));%???? Было .*x(:,5) *****
Nfywv=abs(y(:,10).*y(:,14))+PYx;
Nuywv=abs(y(:,10).*x(:,14));
Nfzwv=abs(y(:,11).*y(:,15))+PZx;
Nuzwv=abs(y(:,11).*x(:,15));

Nfxe=abs(y(:,17).*y(:,21))+PXx;% по оценкам
Nuxe=abs(y(:,17).*x(:,21));
Nfye=abs(y(:,18).*y(:,22))+PYx;
Nuye=abs(y(:,18).*x(:,22));
Nfze=abs(y(:,19).*y(:,23))+PZx;
Nuze=abs(y(:,19).*x(:,23));

Nfxi=abs(y(:,25).*y(:,29))+PXx;
Nfyi=abs(y(:,26).*y(:,30))+PYx;
Nfzi=abs(y(:,27).*y(:,31))+PZx;
Nuxi=y(:,25).*y(:,29);
Nuyi=y(:,26).*y(:,30);
Nuzi=y(:,27).*y(:,31);

%for Shesterny Подгон*****
Nuxi0=Nuxi-heaviside(Nuxi-0.6)*2.0;
Nfxi0=Nfxi+PXx;
Nuxwv0=Nuxwv-heaviside(Nuxwv-0.8)*2.0;
Nfxwv0=Nfxwv+PXx;
% ограничение на всплеск по по NFz*****
Nfzwv0=Nfzwv-heaviside(Nfzwv-0.9);

% %Analiz*****
% %Analiz Velocity
Kdx=5;
del=0.10;
BFxi=y(:,25)*(1+del);
HFxi=y(:,25)*(1-del);
%Kvxe=1.75;
%Fxmese=(y(:,17)+heaviside(y(:,17)).*v5*Kvxe)*Kdx;%sign(y(:,17)).*
Fxmese=y(:,17)*Kdx;
%не понятно как сравнивать если скоростьменяет знак
DBFxe=1*heaviside(abs(Fxmese)-abs(BFxi));
DHFxe=1*heaviside(abs(HFxi)-abs(Fxmese));
Hevis=heaviside(t);
% %
% %Интегральные оценки
IDHFxe=cumtrapz(DHFxe);
IDBFxe=cumtrapz(DBFxe);
IBFxe=cumtrapz(BFxi);
IHFxe=cumtrapz(HFxi);
IFxmese=cumtrapz(Fxmese);
DIHFxmese=IFxmese-IBFxe;

% %
% %Analiz Pauer
KdNx=1.1;
BNxi=Nfxi*(1+del);
HNxi=Nfxi*(1-del);
BNyi=Nfyi*(1+del);
HNYi=Nfyi*(1-del);
Nxmese=Nfxe*KdNx;
DBNx=1.02*heaviside(abs(Nxmese)-abs(BNxi));
DHNxe=0.98*heaviside(abs(HNxi)-abs(Nxmese));%
Hevis=heaviside(t);
% %
% %Интегральные оценки
IDHNxe=cumtrapz(DHNxe);
IDBNxe=cumtrapz(DBNx);

```

```

IBNx=cumtrapz (BNxi);
IHNx=cumtrapz (HNxi);
INxmese=cumtrapz (Nxmese);
DIBNxmese=INxmese-IBNx;
DIHNxmese=INxmese-IHNx;
IBNxu= cumtrapz (Nuxi*(1+del));
IHNxu= cumtrapz (Nuxi*(1-del));
Nxumese=Nuxe*KdNx;
INxumese=cumtrapz (Nxumese);
DIBNxumese=INxumese-IBNxu;

%plot*****
% % %
%width = 10;
% height = 7.5;
% figure('Units','inches','Position',[1 1 width height])
% plot(x,y,...
% 'Linewidth',2,...
% 'Color','r',...
% 'Marker','o',...
% 'MarkerEdgeColor','k',...
% 'MarkerFaceColor','r')

% фазовые пространства!!!!!!
figure('Name', 'initial data');
subplot(411), plot(t,u5,'r',t, u6,'b',t,u7,'g',t,u8*0.3,'k'),grid, grid minor,
xlabel('time'),ylabel('U5_r U6_b U7_g 0.4*U8_k')
subplot(412), plot(t,1*u1,'r',t, u2,'b',t,u3,'g',t,u4,'k'),grid, grid minor,
xlabel('time'),ylabel('U1_r U2_b U3_g U4_k')
subplot(413), plot(t,PXx,'r',t, PYx,'b',t,PZx,'g'),grid, grid minor,
% subplot(413), plot(t,PXx,'r',t, PZx,'g'),grid, grid minor,
xlabel('time'),ylabel('PXx_r PYx_b PZx')
subplot(414), plot(t,y(:,29),'r',t, y(:,30),'b',t,y(:,31),'g',t,y(:,32)*0.3,'k'),grid, grid minor,
xlabel('time'),ylabel('Mx_r My_b Mz_g 0.3*Ms_k')
% subplot(414), plot(t,Mxxx,'r',t, Mxxy,'b',t,Mxxxz,'g'),grid, grid minor,
% xlabel('time'),ylabel('Mxxx_r Mxxy_b Mxxxz_g ')
% subplot(413),
% plot3(x_cntr, y_cntr, z_cntr);
% subplot(414),
% plot(x00,y00);
% hold on

%*****c A2,A3
figure('Name', 'model SimModel2(Kalmf) Out=32[Yw, Yv,Ye,Yi] In=24[w,v,u,z] Ye Estr Velocity');
subplot(411), plot(t,y(:,25), 'r',t,y(:,26), 'b',t, y(:,27),'g'), grid, grid minor,
% xlabel('time'),ylabel('Fxi_r Fyi_b Fzi_g')
xlabel('time'),legend('Fxi_r', 'Fyi_b', 'Fzi_g', 'FontSize', 8, 'FontName','Times New Roman')
subplot(412), plot(t,y(:,1), 'r',t,y(:,2), 'b',t, y(:,3)*0.1,'g'), grid, grid minor,
% xlabel('time'),ylabel('Fwx_r Fyw_b Fzw_g')
xlabel('time'),legend('Fwx_r', 'Fyw_b', 'Fzw_g')
subplot(413), plot(t,y(:,9), 'r',t,y(:,10), 'b',t, y(:,11)*0.1,'g'), grid, grid minor,
% xlabel('time'),ylabel('Fxwv_r Fyvw_b Fzvw_g')
xlabel('time'),legend('Fxwv_r', 'Fyvw_b', 'Fzvw_g')
subplot(414), plot(t,y(:,17), 'r',t,y(:,18), 'b',t, y(:,19)*0.1,'g'), grid, grid minor,
% xlabel('time'),ylabel('Fxe_r Fye_b Fze_g')
xlabel('time'),legend('Fxe_r', 'Fye_b', 'Fze_g')

% % % % *****AP рис6а A2=A;B2=B;
figure('Name', 'model SimModel3(Kalmf) Out=32[Yw, Yv,Ye,Yi] In=24[w,v,u,fm] Yi ');
subplot(311), plot(t,y(:,25), 'r',t,y(:,26), 'b',t, y(:,27),'g',t, y(:,28)*0.1,'k'), grid, grid minor,
xlabel('time'),legend('Fxi_r', 'Fyi_b', 'Fzi_g', '0.1Fsi_g','FontSize', 8, 'FontName','Times New Roman')
subplot(312), plot(t,Nuxi, 'r',t,Nuyi, 'b',t, Nuzi,'g'), grid, grid minor,
xlabel('time'),legend('Nuxi_r', 'Nuyi_b', 'Nuzi_g', 'FontSize', 8, 'FontName','Times New Roman')
subplot(313), plot(t,Nfxi, 'r',t,Nfyi, 'b',t, Nfzi,'g'), grid, grid minor,
xlabel('time'),legend('Nfxi_r', 'Nfyi_b', 'Nfzi_g', 'FontSize', 8, 'FontName','Times New Roman')
%
% % % % *****AP рис6б A2=A;B2=B;
figure('Name', 'model SimModel3(Kalmf) Out=32[Yw, Yv,Ye,Yi] In=24[w,v,u,fm] Ye ');
subplot(311), plot(t,y(:,17), 'r',t,y(:,18), 'b',t, y(:,19),'g',t, y(:,20)*0.1,'k'), grid, grid minor,
xlabel('time'),legend('Fxe_r', 'Fye_b', 'Fze_g', '0.1Fse_g','FontSize', 8, 'FontName','Times New Roman')
subplot(312), plot(t,Nuxe, 'r',t,Nuye, 'b',t, Nuze,'g'), grid, grid minor,
xlabel('time'),legend('Nuxe_r', 'Nuye_b', 'Nuze_g', 'FontSize', 8, 'FontName','Times New Roman')
subplot(313), plot(t,Nfxe, 'r',t,Nfy_e, 'b',t, Nfze,'g'), grid, grid minor,
xlabel('time'),legend('Nfxe_r', 'Nfy_e_b', 'Nfze_g', 'FontSize', 8, 'FontName','Times New Roman')
%
% % % % *****AP рис6в A2=A;B2=B;
figure('Name', 'model SimModel3(Kalmf) Out=32[Yw, Yv,Ye,Yi] In=24[w,v,u,fm] Analiz Diff ');
% subplot(311), plot(t,BNxi, 'r',t,HNxi, 'b',t, Nfxe,'g'), grid, grid minor,

```

```

% xlabel('time'),legend('BNfxi_r', 'HNfxi_b', 'Nfxe_g', 'FontSize', 8, 'FontName','Times New Roman')
% subplot(312), plot(t,BNfyi, 'r',t,HNfyi, 'b',t, Nfye,'g'), grid, grid minor,
% xlabel('time'),legend('BNfyi_r', 'HNfyi_b', 'Nfye_g', 'FontSize', 8, 'FontName','Times New Roman')
% subplot(313), plot(t,Nuxi*(1+del), 'r',t,Nuxi*(1-del), 'b',t, Nuxe,'g'), grid, grid minor,
% xlabel('time'),legend('BNuxi_r', 'HNuxi_b', 'Nuxe_g', 'FontSize', 8, 'FontName','Times New Roman')

% % % % % % *****AP пис6r A2=A;B2=B;
% figure('Name', 'model SimModel2(Kalmf) Out=32[Yw, Yv,Ye,Yi] In=24[w,v,u,fm] Integral');
% subplot(311), plot(t,INxmese, 'r',t,IBNx, 'b',t,IHNx, 'g'), grid, grid minor,
% xlabel('time'),legend('INfxmese_r', 'IBNfx_b', 'IHNfx_g', 'FontSize', 8, 'FontName','Times New Roman')
% subplot(312), plot(t,INxmese, 'r',t,IBNxu, 'b',t,IHNxu, 'g'), grid, grid minor,
% xlabel('time'),legend('INxmese_r', 'IBNxu_b', 'IHNxu_g', 'FontSize', 8, 'FontName','Times New Roman')
% subplot(313), plot(t,DIBNxumese, 'r',t,DIBNxumese, 'b'), grid, grid minor,
% xlabel('time'),legend('DIBNxumese_r', 'DIBNfxmese_b', 'FontSize', 8, 'FontName','Times New Roman')

% % % % % % *****AP пис4a,b A2=A;B2=B;%%,'Linewidth',3
%For Flanec
figure('Name', 'model SimModel2(Kalmf) Out=32[Yw, Yv,Ye,Yi] In=24[w,v,u,fm]with NOISE W+V');
% subplot(211), plot(t,y(:,25), 'r',t,Nfxi, 'b--',t, Nuxi,'k:', 'Linewidth',1), grid, grid minor,
% xlabel('time'),legend('Fx', 'Nfx', 'Nux')
% subplot(212), plot(t,Nfxwv, 'r',t,Nfywv, 'b--',t, Nfzwv,'k:'), grid, grid minor,
% xlabel('time'),legend('Nfxwv', 'Nfywv', 'Nfzwv')

subplot(211), plot(t,y(:,26), 'r',t,Nfyi, 'b--',t, Nuyi,'k:', 'Linewidth',2), grid, grid minor,
xlabel('time'),legend('Fy', 'Nfy', 'Nuy')
subplot(212), plot(t,Nfxwv, 'r',t,Nfywv, 'b--',t, Nfzwv0,'k:'), grid, grid minor,
xlabel('time'),legend('Nfxwv', 'Nfywv', 'Nfzwv')

%For Shesterny
figure('Name', 'model SimModel2(Kalmf) Out=32[Yw, Yv,Ye,Yi] In=24[w,v,u,fm]with NOISE W+V');
subplot(211), plot(t,y(:,25), 'r',t,Nfxi0, 'b--',t, Nuxi0,'k:', 'Linewidth',1), grid, grid minor,
xlabel('time'),legend('Fx', 'Nfx', 'Nux')
subplot(212), plot(t,Nfxwv0, 'r',t,Nfywv, 'b--',t, Nfzwv,'k:'), grid, grid minor,
xlabel('time'),legend('Nfxwv', 'Nfywv', 'Nfzwv')

%*****без A2
figure('Name', 'model CAY Psys Out=16[Y, Yv] signal+noise');
subplot(411), plot(t,y(:,9), 'r',t,y(:,10), 'b',t, y(:,11),'g',t, y(:,12),'k'), grid, grid minor,
xlabel('time'),ylabel('Yv1_r Yv2_b Yv3_g Yv4_k')
subplot(412), plot(t,y(:,13), 'r',t,y(:,14), 'b',t, y(:,15),'g',t, y(:,16),'k'), grid, grid minor,
xlabel('time'),ylabel('Yv5_r Yv6_b Yv7_g Yv8_k')
subplot(413), plot(t,Nfxw, 'r',t,Nfyw, 'b',t, Nfzw,'g',t, 0,'k'), grid, grid minor,
xlabel('time'),ylabel('Nfxw_r Nfyw_b Nfzw_g 0_k')
subplot(414), plot(t,PXx, 'r',t,PYx, 'b',t, PZx,'g',t, 0,'k'), grid, grid minor,
xlabel('time'),ylabel('PXx_r PYx_b PZx_g 0_k')
%

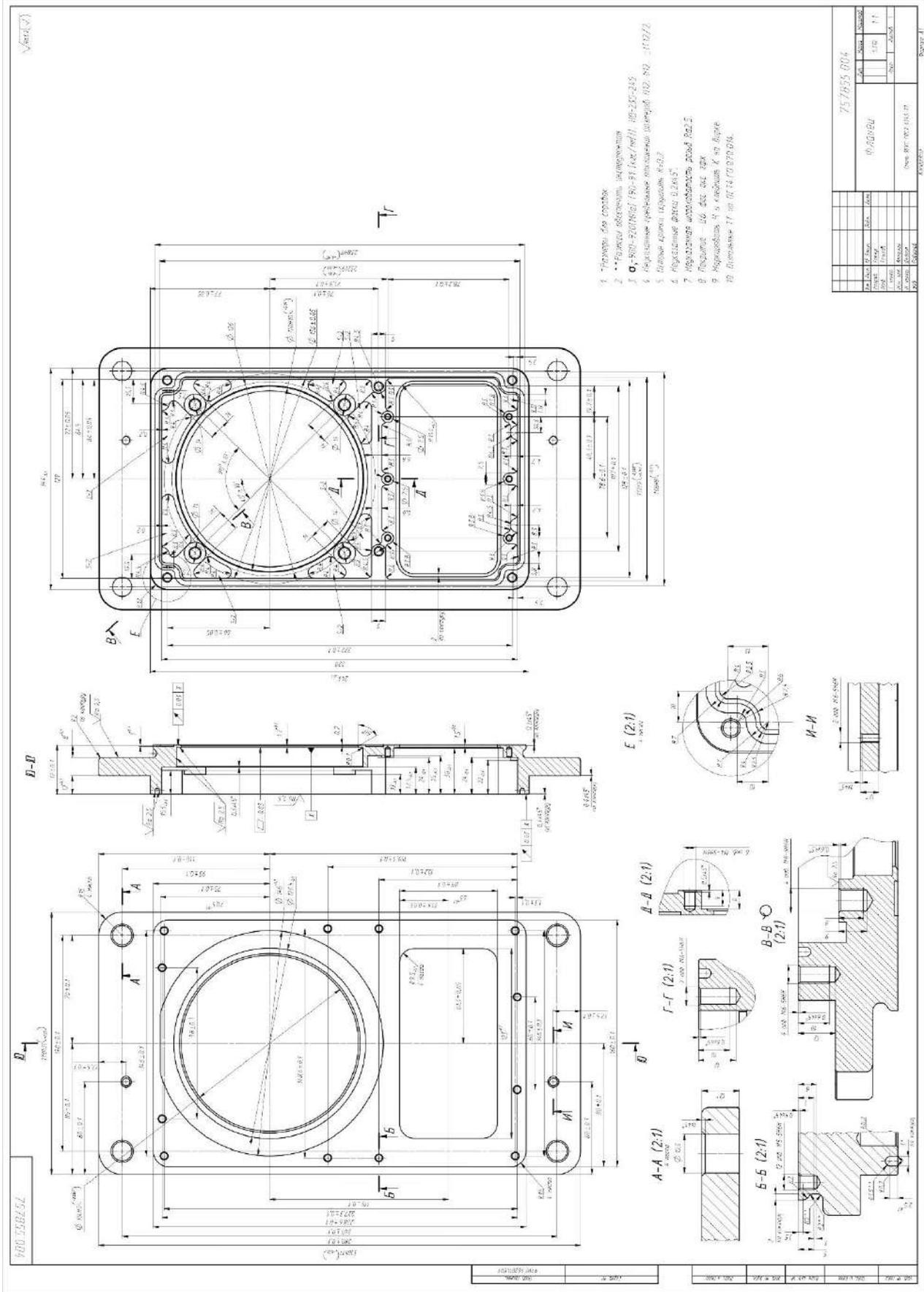
%*****

% %zeros

MeasErr=y(:,1)-y(:,9);
MeasErrCovYlw=sum(MeasErr.*MeasErr)/length(MeasErr)
EstErr=y(:,1)-y(:,17);
EstErrCovYlw=sum(EstErr.*EstErr)/length(EstErr)
MeasErr=y(:,25)-y(:,9);
MeasErrCovYli=sum(MeasErr.*MeasErr)/length(MeasErr)
EstErr=y(:,25)-y(:,17);
EstErrCovYli=sum(EstErr.*EstErr)/length(EstErr)
% plot(X2,Y2,':k','LineWidth',3);
% plot(X2,Y3,':b','LineWidth',3);
% plot(X2,Y4,'-.','Color',[.1 .7 .7],'LineWidth',3);
% plot(X2,Y5,'--','Color',[.1 .4 .1],'LineWidth',3);
% plot(X2,Y6,'r','LineWidth',3);

MeasErr=Nfxwv-Nfxi;
MeasErrCovNfxwv=sum(MeasErr.*MeasErr)/length(MeasErr)
EstErr=Nfxe-Nfxi;
EstErrCovNfxe=sum(EstErr.*EstErr)/length(EstErr)

```



## Фрагмент УП обработки детали типа фланец

N370G02X-65.Y106.875I46.875J0	N680Y118.875	N1030G02X-103.75Y-60.I0J38.75
N375G01X46.6	N685G00Z3.	N1035G01Y60.
N380Y118.875	N690G90G54X43.4Y110.75	N1040G02X-65.Y98.75I38.75J0
N385G00Z3.	N695G01Z-2.F400.	N1045G01X46.6
N390G90G54X43.4Y118.875	N700Y98.75	N1050Y110.75
N395Z-2.9	N705X155.F1069.521	N1055G00Z3.
N400G01Z-7.85F400.	N710G02X193.75Y60.I0J-38.75	N1060G90G54X43.4Y110.75
N405Y106.875	N715G01Y-60.	N1065Z-6.8
N410X155.F1069.521	N720G02X155.Y-98.75I-38.75J0	N1070G01Z-11.75F400.
N415G02X201.875Y60.I0J-46.875	N725G01X-65.	N1075Y98.75
N420G01Y-60.	N730G02X-103.75Y-60.I0J38.75	N1080X155.F1069.521
N425G02X155.Y-106.875I-46.875J0	N735G01Y60.	N1085G02X193.75Y60.I0J-38.75
N430G01X-65.	N740G02X-65.Y98.75I38.75J0	N1090G01Y-60.
N435G02X-111.875Y-60.I0J46.875	N745G01X46.6	N1095G02X155.Y-98.75I-38.75J0
N440G01Y60.	N750Y110.75	N1100G01X-65.
N445G02X-65.Y106.875I46.875J0	N755G00Z3.	N1105G02X-103.75Y-60.I0J38.75
N450G01X46.6	N760G90G54X43.4Y110.75	N1110G01Y60.
N455Y118.875	N765Z1.	N1115G02X-65.Y98.75I38.75J0
N460G00Z3.	N770G01Z-3.95F400.	N1120G01X46.6
N465G90G54X43.4Y118.875	N775Y98.75	N1125Y110.75
N470Z-4.85	N780X155.F1069.521	N1130G00Z3.
N475G01Z-9.8F400.	N785G02X193.75Y60.I0J-38.75	N1135G90G54X43.4Y110.75
N480Y106.875	N790G01Y-60.	N1140Z-8.75
N485X155.F1069.521	N795G02X155.Y-98.75I-38.75J0	N1145G01Z-12.F400.
N490G02X201.875Y60.I0J-46.875	N800G01X-65.	N1150Y98.75
N495G01Y-60.	N805G02X-103.75Y-60.I0J38.75	N1155X155.F1069.521
N500G02X155.Y-106.875I-46.875J0	N810G01Y60.	N1160G02X193.75Y60.I0J-38.75
N505G01X-65.	N815G02X-65.Y98.75I38.75J0	N1165G01Y-60.
N510G02X-111.875Y-60.I0J46.875	N820G01X46.6	N1170G02X155.Y-98.75I-38.75J0
N515G01Y60.	N825Y110.75	N1175G01X-65.
N520G02X-65.Y106.875I46.875J0	N830G00Z3.	N1180G02X-103.75Y-60.I0J38.75
N525G01X46.6	N835G90G54X43.4Y110.75	N1185G01Y60.
N530Y118.875	N840Z-.95	N1190G02X-65.Y98.75I38.75J0
N535G00Z3.	N845G01Z-5.9F400.	N1195G01X46.6
N540G90G54X43.4Y118.875	N850Y98.75	N1200Y110.75
N545Z-6.8	N855X155.F1069.521	N1205G00Z3.
N550G01Z-11.75F400.	N860G02X193.75Y60.I0J-38.75	N1210G90G54X43.4Y102.625
N555Y106.875	N865G01Y-60.	N1215G01Z-2.F400.
N560X155.F1069.521	N870G02X155.Y-98.75I-38.75J0	N1220Y90.625
N565G02X201.875Y60.I0J-46.875	N875G01X-65.	N1225X155.F1069.521
N570G01Y-60.	N880G02X-103.75Y-60.I0J38.75	N1230G02X185.625Y60.I0J-30.625
N575G02X155.Y-106.875I-46.875J0	N885G01Y60.	N1235G01Y-60.
N580G01X-65.	N890G02X-65.Y98.75I38.75J0	N1240G02X155.Y-90.625I-30.625J0
N585G02X-111.875Y-60.I0J46.875	N895G01X46.6	N1245G01X-65.
N590G01Y60.	N900Y110.75	N1250G02X-95.625Y-60.I0J30.625
N595G02X-65.Y106.875I46.875J0	N905G00Z3.	N1255G01Y60.
N600G01X46.6	N910G90G54X43.4Y110.75	N1260G02X-65.Y90.625I30.625J0
N605Y118.875	N915Z-2.9	N1265G01X46.6
N610G00Z3.	N920G01Z-7.85F400.	N1270Y102.625
N615G90G54X43.4Y118.875	N925Y98.75	N1275G00Z3.
N620Z-8.75	N930X155.F1069.521	N1280G90G54X43.4Y102.625
N625G01Z-12.F400.	N935G02X193.75Y60.I0J-38.75	N1285Z1.
N630Y106.875	N940G01Y-60.	N1290G01Z-3.95F400.
N635X155.F1069.521	N945G02X155.Y-98.75I-38.75J0	N1295Y90.625
N640G02X201.875Y60.I0J-46.875	N950G01X-65.	N1300X155.F1069.521
N645G01Y-60.	N955G02X-103.75Y-60.I0J38.75	N1305G02X185.625Y60.I0J-30.625
N650G02X155.Y-106.875I-46.875J0	N960G01Y60.	N1310G01Y-60.
N655G01X-65.	N965G02X-65.Y98.75I38.75J0	N1315G02X155.Y-90.625I-30.625J0
N660G02X-111.875Y-60.I0J46.875	N970G01X46.6	N1320G01X-65.
N665G01Y60.	N975Y110.75	N1325G02X-95.625Y-60.I0J30.625
N670G02X-65.Y106.875I46.875J0	N980G00Z3.	N1330G01Y60.
N675G01X46.6	N985G90G54X43.4Y110.75	N1335G02X-65.Y90.625I30.625J0
	N990Z-4.85	N1340G01X46.6
	N995G01Z-9.8F400.	N1345Y102.625
	N1000Y98.75	
	N1005X155.F1069.521	
	N1010G02X193.75Y60.I0J-38.75	
	N1015G01Y-60.	
	N1020G02X155.Y-98.75I-38.75J0	
	N1025G01X-65.	

N1350G00Z3.  
 N1355G90G54X43.4Y102.625  
 N1360Z-.95  
 N1365G01Z-5.9F400.  
 N1370Y90.625  
 N1375X155.F1069.521  
 N1380G02X185.625Y60.I0J-30.625  
 N1385G01Y-60.  
 N1390G02X155.Y-90.625I-30.625J0  
 N1395G01X-65.  
 N1400G02X-95.625Y-60.I0J30.625  
 N1405G01Y60.  
 N1410G02X-65.Y90.625I30.625J0  
 N1415G01X46.6  
 N1420Y102.625  
 N1425G00Z3.  
 N1430G90G54X43.4Y102.625  
 N1435Z-2.9  
 N1440G01Z-7.85F400.  
 N1445Y90.625  
 N1450X155.F1069.521  
 N1455G02X185.625Y60.I0J-30.625  
 N1460G01Y-60.  
 N1465G02X155.Y-90.625I-30.625J0  
 N1470G01X-65.  
 N1475G02X-95.625Y-60.I0J30.625  
 N1480G01Y60.  
 N1485G02X-65.Y90.625I30.625J0  
 N1490G01X46.6  
 N1495Y102.625  
 N1500G00Z3.  
 N1505G90G54X43.4Y102.625  
 N1510Z-4.85  
 N1515G01Z-9.8F400.  
 N1520Y90.625  
 N1525X155.F1069.521  
 N1530G02X185.625Y60.I0J-30.625  
 N1535G01Y-60.  
 N1540G02X155.Y-90.625I-30.625J0  
 N1545G01X-65.  
 N1550G02X-95.625Y-60.I0J30.625  
 N1555G01Y60.  
 N1560G02X-65.Y90.625I30.625J0  
 N1565G01X46.6  
 N1570Y102.625  
 N1575G00Z3.  
 N1580G90G54X43.4Y102.625  
 N1585Z-6.8  
 N1590G01Z-11.75F400.  
 N1595Y90.625  
 N1600X155.F1069.521  
 N1605G02X185.625Y60.I0J-30.625  
 N1610G01Y-60.  
 N1615G02X155.Y-90.625I-30.625J0  
 N1620G01X-65.  
 N1625G02X-95.625Y-60.I0J30.625  
 N1630G01Y60.  
 N1635G02X-65.Y90.625I30.625J0  
 N1640G01X46.6  
 N1645Y102.625  
 N1650G00Z3.  
 N1655G90G54X43.4Y102.625  
 N1660Z-8.75  
 N1665G01Z-12.F400.  
 N1670Y90.625  
 N1675X155.F1069.521  
 N1680G02X185.625Y60.I0J-30.625  
 N1685G01Y-60.  
 N1690G02X155.Y-90.625I-30.625J0  
 N1695G01X-65.  
 N1700G02X-95.625Y-60.I0J30.625  
 N1705G01Y60.  
 N1710G02X-65.Y90.625I30.625J0  
 N1715G01X46.6  
 N1720Y102.625  
 N1725G00Z3.  
 N1730G90G54X43.4Y94.5  
 N1735G01Z-2.F400.  
 N1740Y82.5  
 N1745X155.F1069.521  
 N1750G02X177.5Y60.I0J-22.5  
 N1755G01Y-60.  
 N1760G02X155.Y-82.5I-22.5J0  
 N1765G01X-65.  
 N1770G02X-87.5Y-60.I0J22.5  
 N1775G01Y60.  
 N1780G02X-65.Y82.5I22.5J0  
 N1785G01X46.6  
 N1790Y94.5  
 N1795G00Z3.  
 N1800G90G54X43.4Y94.5  
 N1805Z1.  
 N1810G01Z-3.95F400.  
 N1815Y82.5  
 N1820X155.F1069.521  
 N1825G02X177.5Y60.I0J-22.5  
 N1830G01Y-60.  
 N1835G02X155.Y-82.5I-22.5J0  
 N1840G01X-65.  
 N1845G02X-87.5Y-60.I0J22.5  
 N1850G01Y60.  
 N1855G02X-65.Y82.5I22.5J0  
 N1860G01X46.6  
 N1865Y94.5  
 N1870G00Z3.  
 N1875G90G54X43.4Y94.5  
 N1880Z-.95  
 N1885G01Z-5.9F400.  
 N1890Y82.5  
 N1895X155.F1069.521  
 N1900G02X177.5Y60.I0J-22.5  
 N1905G01Y-60.  
 N1910G02X155.Y-82.5I-22.5J0  
 N1915G01X-65.  
 N1920G02X-87.5Y-60.I0J22.5  
 N1925G01Y60.  
 N1930G02X-65.Y82.5I22.5J0  
 N1935G01X46.6  
 N1940Y94.5  
 N1945G00Z3.  
 N1950G90G54X43.4Y94.5  
 N1955Z-2.9  
 N1960G01Z-7.85F400.  
 N1965Y82.5  
 N1970X155.F1069.521  
 N1975G02X177.5Y60.I0J-22.5  
 N1980G01Y-60.  
 N1985G02X155.Y-82.5I-22.5J0  
 N1990G01X-65.  
 N1995G02X-87.5Y-60.I0J22.5  
 N2000G01Y60.  
 N2005G02X-65.Y82.5I22.5J0  
 N2010G01X46.6  
 N2015Y94.5  
 N2020G00Z3.  
 N2025G90G54X43.4Y94.5  
 N2030Z-4.85  
 N2035G01Z-9.8F400.  
 N2040Y82.5  
 N2045X155.F1069.521  
 N2050G02X177.5Y60.I0J-22.5  
 N2055G01Y-60.  
 N2060G02X155.Y-82.5I-22.5J0  
 N2065G01X-65.  
 N2070G02X-87.5Y-60.I0J22.5  
 N2075G01Y60.  
 N2080G02X-65.Y82.5I22.5J0  
 N2085G01X46.6  
 N2090Y94.5  
 N2095G00Z3.  
 N2100G90G54X43.4Y94.5  
 N2105Z-6.8  
 N2110G01Z-11.75F400.  
 N2115Y82.5  
 N2120X155.F1069.521  
 N2125G02X177.5Y60.I0J-22.5  
 N2130G01Y-60.  
 N2135G02X155.Y-82.5I-22.5J0  
 N2140G01X-65.  
 N2145G02X-87.5Y-60.I0J22.5  
 N2150G01Y60.  
 N2155G02X-65.Y82.5I22.5J0  
 N2160G01X46.6  
 N2165Y94.5  
 N2170G00Z3.  
 N2175G90G54X43.4Y94.5  
 N2180Z-8.75  
 N2185G01Z-12.F400.  
 N2190Y82.5  
 N2195X155.F1069.521  
 N2200G02X177.5Y60.I0J-22.5  
 N2205G01Y-60.  
 N2210G02X155.Y-82.5I-22.5J0  
 N2215G01X-65.  
 N2220G02X-87.5Y-60.I0J22.5  
 N2225G01Y60.  
 N2230G02X-65.Y82.5I22.5J0  
 N2235G01X46.6  
 N2240Y94.5  
 N2245G00Z3.  
 N2250Z25.  
 N2255G90G54X46.6Y-106.5  
 N2260Z-9.  
 N2265G01Z-14.F1000.  
 N2270Y-95.5F802.141  
 N2275X-95.F1069.521  
 N2280G02X-120.5Y-70.I0J25.5  
 N2285G01Y70.  
 N2290G02X-95.Y95.5I25.5J0  
 N2295G01X185.  
 N2300G02X210.5Y70.I0J-25.5  
 N2305G01Y-70.  
 N2310G02X185.Y-95.5I-25.5J0  
 N2315G01X43.4  
 N2320Y-106.5  
 N2325G00Z-9.  
 N2330G90G54X46.6Y-106.5  
 N2335Z-11.  
 N2340G01Z-16.F1000.  
 N2345Y-95.5F802.141  
 N2350X-95.F1069.521  
 N2355G02X-120.5Y-70.I0J25.5  
 N2360G01Y70.  
 N2365G02X-95.Y95.5I25.5J0  
 N2370G01X185.  
 N2375G02X210.5Y70.I0J-25.5  
 N2380G01Y-70.  
 N2385G02X185.Y-95.5I-25.5J0  
 N2390G01X43.4  
 N2395Y-106.5  
 N2400G00Z-9.  
 N2405G90G54X46.6Y-106.5  
 N2410Z-13.  
 N2415G01Z-18.F1000.  
 N2420Y-95.5F802.141  
 N2425X-95.F1069.521  
 N2430G02X-120.5Y-70.I0J25.5  
 N2435G01Y70.  
 N2440G02X-95.Y95.5I25.5J0  
 N2445G01X185.  
 N2450G02X210.5Y70.I0J-25.5  
 N2455G01Y-70.  
 N2460G02X185.Y-95.5I-25.5J0  
 N2465G01X43.4  
 N2470Y-106.5

N2475G00Z-9.  
 N2480G90G54X46.6Y-106.5  
 N2485Z-15.  
 N2490G01Z-20.F1000.  
 N2495Y-95.5F802.141  
 N2500X-95.F1069.521  
 N2505G02X-120.5Y-70.I0J25.5  
 N2510G01Y70.  
 N2515G02X-95.Y95.5I25.5J0  
 N2520G01X185.  
 N2525G02X210.5Y70.I0J-25.5  
 N2530G01Y-70.  
 N2535G02X185.Y-95.5I-25.5J0  
 N2540G01X43.4  
 N2545Y-106.5  
 N2550G00Z-9.  
 N2555G90G54X46.6Y-106.5  
 N2560Z-17.  
 N2565G01Z-22.F1000.  
 N2570Y-95.5F802.141  
 N2575X-95.F1069.521  
 N2580G02X-120.5Y-70.I0J25.5  
 N2585G01Y70.  
 N2590G02X-95.Y95.5I25.5J0  
 N2595G01X185.  
 N2600G02X210.5Y70.I0J-25.5  
 N2605G01Y-70.  
 N2610G02X185.Y-95.5I-25.5J0  
 N2615G01X43.4  
 N2620Y-106.5  
 N2625G00Z-9.  
 N2630G90G54X46.6Y-106.5  
 N2635Z-19.  
 N2640G01Z-24.F1000.  
 N2645Y-95.5F802.141  
 N2650X-95.F1069.521  
 N2655G02X-120.5Y-70.I0J25.5  
 N2660G01Y70.  
 N2665G02X-95.Y95.5I25.5J0  
 N2670G01X185.  
 N2675G02X210.5Y70.I0J-25.5  
 N2680G01Y-70.  
 N2685G02X185.Y-95.5I-25.5J0  
 N2690G01X43.4  
 N2695Y-106.5  
 N2700G00Z-9.  
 N2705Z25.  
 N2710G90G54X15.586Y-30.202  
 N2715Z3.  
 N2720G01Z-2.F1000.  
 N2725X35.586F802.141  
 N2730Y42.F1069.521  
 N2735X15.586  
 N2740G00Z3.  
 N2745G90G54X15.586Y-30.202  
 N2750Z1.  
 N2755G01Z-4.F1000.  
 N2760X35.586F802.141  
 N2765Y42.F1069.521  
 N2770X15.586  
 N2775G00Z3.  
 N2780G90G54X15.586Y-30.202  
 N2785Z-1.  
 N2790G01Z-6.F1000.  
 N2795X35.586F802.141  
 N2800Y42.F1069.521  
 N2805X15.586  
 N2810G00Z3.  
 N2815G90G54X15.586Y-30.202  
 N2820Z-3.  
 N2825G01Z-8.F1000.  
 N2830X35.586F802.141  
 N2835Y42.F1069.521  
 N2840X15.586  
 N2845G00Z3.  
 N2850G90G54X15.586Y-30.202  
 N2855Z-5.  
 N2860G01Z-10.F1000.  
 N2865X35.586F802.141  
 N2870Y42.F1069.521  
 N2875X15.586  
 N2880G00Z3.  
 N2885G90G54X15.586Y-30.202  
 N2890Z-7.  
 N2895G01Z-12.F1000.  
 N2900X35.586F802.141  
 N2905Y42.F1069.521  
 N2910X15.586  
 N2915G00Z3.  
 N2920G90G54X30.586Y-30.202  
 N2925G01Z-2.F1000.  
 N2930X50.586F802.141  
 N2935Y42.F1069.521  
 N2940X30.586  
 N2945G00Z3.  
 N2950G90G54X30.586Y-30.202  
 N2955Z1.  
 N2960G01Z-4.F1000.  
 N2965X50.586F802.141  
 N2970Y42.F1069.521  
 N2975X30.586  
 N2980G00Z3.  
 N2985G90G54X30.586Y-30.202  
 N2990Z-1.  
 N2995G01Z-6.F1000.  
 N3000X50.586F802.141  
 N3005Y42.F1069.521  
 N3010X30.586  
 N3015G00Z3.  
 N3020G90G54X30.586Y-30.202  
 N3025Z-3.  
 N3030G01Z-8.F1000.  
 N3035X50.586F802.141  
 N3040Y42.F1069.521  
 N3045X30.586  
 N3050G00Z3.  
 N3055G90G54X30.586Y-30.202  
 N3060Z-5.  
 N3065G01Z-10.F1000.  
 N3070X50.586F802.141  
 N3075Y42.F1069.521  
 N3080X30.586  
 N3085G00Z3.  
 N3090G90G54X30.586Y-30.202  
 N3095Z-7.  
 N3100G01Z-12.F1000.  
 N3105X50.586F802.141  
 N3110Y42.F1069.521  
 N3115X30.586  
 N3120G00Z3.  
 N3125G90G54X45.586Y-30.202  
 N3130G01Z-2.F1000.  
 N3135X65.586F802.141  
 N3140Y42.F1069.521  
 N3145X45.586  
 N3150G00Z3.  
 N3155G90G54X45.586Y-30.202  
 N3160Z1.  
 N3165G01Z-4.F1000.  
 N3170X65.586F802.141  
 N3175Y42.F1069.521  
 N3180X45.586  
 N3185G00Z3.  
 N3190G90G54X45.586Y-30.202  
 N3195Z-1.  
 N3200G01Z-6.F1000.  
 N3205X65.586F802.141  
 N3210Y42.F1069.521  
 N3215X45.586  
 N3220G00Z3.  
 N3225G90G54X45.586Y-30.202  
 N3230Z-3.  
 N3235G01Z-8.F1000.  
 N3240X65.586F802.141  
 N3245Y42.F1069.521  
 N3250X45.586  
 N3255G00Z3.  
 N3260G90G54X45.586Y-30.202  
 N3265Z-5.  
 N3270G01Z-10.F1000.  
 N3275X65.586F802.141  
 N3280Y42.F1069.521  
 N3285X45.586  
 N3290G00Z3.  
 N3295G90G54X45.586Y-30.202  
 N3300Z-7.  
 N3305G01Z-12.F1000.  
 N3310X65.586F802.141  
 N3315Y42.F1069.521  
 N3320X45.586  
 N3325G00Z3.  
 N3330G90G54X60.586Y-30.202  
 N3335G01Z-2.F1000.  
 N3340X80.586F802.141  
 N3345Y42.F1069.521  
 N3350X60.586  
 N3355G00Z3.  
 N3360G90G54X60.586Y-30.202  
 N3365Z1.  
 N3370G01Z-4.F1000.  
 N3375X80.586F802.141  
 N3380Y42.F1069.521  
 N3385X60.586  
 N3390G00Z3.  
 N3395G90G54X60.586Y-30.202  
 N3400Z-1.  
 N3405G01Z-6.F1000.  
 N3410X80.586F802.141  
 N3415Y42.F1069.521  
 N3420X60.586  
 N3425G00Z3.  
 N3430G90G54X60.586Y-30.202  
 N3435Z-3.  
 N3440G01Z-8.F1000.  
 N3445X80.586F802.141  
 N3450Y42.F1069.521  
 N3455X60.586  
 N3460G00Z3.  
 N3465G90G54X60.586Y-30.202  
 N3470Z-5.  
 N3475G01Z-10.F1000.  
 N3480X80.586F802.141  
 N3485Y42.F1069.521  
 N3490X60.586  
 N3495G00Z3.  
 N3500G90G54X60.586Y-30.202  
 N3505Z-7.  
 N3510G01Z-12.F1000.  
 N3515X80.586F802.141  
 N3520Y42.F1069.521  
 N3525X60.586  
 N3530G00Z3.  
 N3535Z25.  
 N3540S1671  
 N3545G90G54X103.056Y9.75  
 N3550Z2.5  
 N3555G01X102.326Z2.462F300.80  
 3  
 N3560X101.771Y9.397Z2.427  
 N3565X101.211Y9.05Z2.393  
 N3570X100.648Y8.709Z2.358  
 N3575X100.081Y8.374Z2.324  
 N3580X99.51Y8.046Z2.289  
 N3585X98.936Y7.724Z2.255  
 N3590X98.358Y7.409Z2.22  
 N3595X97.777Y7.099Z2.186  
 N3600X97.193Y6.796Z2.151  
 N3605X96.605Y6.5Z2.117  
 N3610X97.216Y6.192Z2.081  
 N3615X97.824Y5.876Z2.045  
 N3620X98.428Y5.554Z2.009  
 N3625X99.028Y5.225Z1.973  
 N3630X99.625Y4.889Z1.937  
 N3635X100.217Y4.546Z1.901  
 N3640X100.806Y4.196Z1.866  
 N3645X101.39Y3.84Z1.83  
 N3650X101.971Y3.477Z1.794  
 N3655X102.547Y3.107Z1.758  
 N3660X103.119Y2.731Z1.722  
 N3665X103.687Y2.348Z1.686

N3670X104.25Y1.959Z1.65  
 N3675Y9.75Z1.242  
 N3680X102.326Z1.141  
 N3685X101.771Y9.397Z1.107  
 N3690X101.211Y9.05Z1.072  
 N3695X100.648Y8.709Z1.038  
 N3700X100.081Y8.374Z1.003  
 N3705X99.51Y8.046Z.969  
 N3710X98.936Y7.724Z.934  
 N3715X98.358Y7.409Z.9  
 N3720X97.777Y7.099Z.865  
 N3725X97.193Y6.796Z.831  
 N3730X96.605Y6.5Z.796  
 N3735X97.216Y6.192Z.76  
 N3740X97.824Y5.876Z.724  
 N3745X98.428Y5.554Z.689  
 N3750X99.028Y5.225Z.653  
 N3755X99.625Y4.889Z.617  
 N3760X100.217Y4.546Z.581  
 N3765X100.806Y4.196Z.545  
 N3770X101.39Y3.84Z.509  
 N3775X101.971Y3.477Z.473  
 N3780X102.547Y3.107Z.437  
 N3785X103.119Y2.731Z.401  
 N3790X103.687Y2.348Z.366  
 N3795X104.25Y1.959Z.33  
 N3800Y9.75Z-.079  
 N3805X102.326Z-.179  
 N3810X101.771Y9.397Z-.214  
 N3815X101.211Y9.05Z-.248  
 N3820X100.648Y8.709Z-.283  
 N3825X100.081Y8.374Z-.317  
 N3830X99.51Y8.046Z-.352  
 N3835X98.936Y7.724Z-.386  
 N3840X98.358Y7.409Z-.421  
 N3845X97.777Y7.099Z-.455  
 N3850X97.193Y6.796Z-.49  
 N3855X96.605Y6.5Z-.524  
 N3860X97.216Y6.192Z-.56  
 N3865X97.824Y5.876Z-.596  
 N3870X98.428Y5.554Z-.632  
 N3875X99.028Y5.225Z-.668  
 N3880X99.625Y4.889Z-.704  
 N3885X100.217Y4.546Z-.74  
 N3890X100.806Y4.196Z-.776  
 N3895X101.39Y3.84Z-.811  
 N3900X101.971Y3.477Z-.847  
 N3905X102.547Y3.107Z-.883  
 N3910X103.119Y2.731Z-.919  
 N3915X103.687Y2.348Z-.955  
 N3920X104.25Y1.959Z-.991  
 N3925Y9.75Z-1.399  
 N3930X102.326Z-1.5  
 N3935G02X96.605Y6.5I-  
 32.326J50.25F601.606  
 N3940X104.25Y1.959I-26.605J-  
 53.5  
 N3945G01Y9.75  
 N3950X102.326  
 N3955Y24.75  
 N3960X97.568  
 N3965G02X43.083Y24.25I-  
 27.568J35.25  
 N3970G01X-29.25  
 N3975Y-24.25  
 N3980X31.464  
 N3985G02X50.074Y-  
 6.931I38.536J-22.75  
 N3990G01X43.395Y6.5  
 N3995G02X38.464Y9.25I26.605J5  
 3.5  
 N4000G01X-14.25  
 N4005Y-9.25  
 N4010X23.686  
 N4015G02X43.395Y6.5I46.314J-  
 37.75  
 N4020G01X50.074Y-6.931  
 N4025G02X108.827Y-  
 24.75I19.926J-40.069  
 N4030G01X119.25  
 N4035Y24.75  
 N4040X102.326  
 N4045Y39.75  
 N4050X91.794  
 N4055G02X48.681Y39.25I-  
 21.794J20.25  
 N4060G01X-40.442  
 N4065G02X-44.25Y35.875I-  
 23.558J22.75  
 N4070G01Y-35.875  
 N4075G02X-40.442Y-39.25I-  
 19.75J-26.125  
 N4080G01X41.277  
 N4085G02X98.853Y-  
 39.75I28.723J-7.75  
 N4090G01X130.655  
 N4095G02X134.25Y-  
 36.505I23.345J-22.25  
 N4100G01Y36.505  
 N4105G02X130.655Y39.75I19.75J  
 25.495  
 N4110G01X102.326  
 N4115Y54.75  
 N4120X83.784  
 N4125G02X56.417Y54.25I-  
 13.784J5.25  
 N4130G01X-48.031  
 N4135G02X-59.25Y44.897I-  
 15.969J7.75  
 N4140G01Y-44.897  
 N4145G02X-48.031Y-54.25I-  
 4.75J-17.103  
 N4150G01X55.25  
 N4155Y-47.  
 N4160G02X84.75I14.75J0  
 N4165G01Y-54.75  
 N4170X138.348  
 N4175G02X149.25Y-  
 45.417I15.652J-7.25  
 N4180G01Y45.417  
 N4185G02X138.348Y54.75I4.75J1  
 6.583  
 N4190G01X102.326  
 N4195G00Z2.5  
 N4200G90G54X103.056Y9.75  
 N4205Z1.  
 N4210G01X102.326Z.962F300.803  
 N4215X101.771Y9.397Z.927  
 N4220X101.211Y9.05Z.893  
 N4225X100.648Y8.709Z.858  
 N4230X100.081Y8.374Z.824  
 N4235X99.51Y8.046Z.789  
 N4240X98.936Y7.724Z.755  
 N4245X98.358Y7.409Z.72  
 N4250X97.777Y7.099Z.686  
 N4255X97.193Y6.796Z.651  
 N4260X96.605Y6.5Z.617  
 N4265X97.216Y6.192Z.581  
 N4270X97.824Y5.876Z.545  
 N4275X98.428Y5.554Z.509  
 N4280X99.028Y5.225Z.473  
 N4285X99.625Y4.889Z.437  
 N4290X100.217Y4.546Z.401  
 N4295X100.806Y4.196Z.366  
 N4300X101.39Y3.84Z.33  
 N4305X101.971Y3.477Z.294  
 N4310X102.547Y3.107Z.258  
 N4315X103.119Y2.731Z.222  
 N4320X103.687Y2.348Z.186  
 N4325X104.25Y1.959Z.15  
 N4330Y9.75Z-.258  
 N4335X102.326Z-.359  
 N4340X101.771Y9.397Z-.393  
 N4345X101.211Y9.05Z-.428  
 N4350X100.648Y8.709Z-.462  
 N4355X100.081Y8.374Z-.497  
 N4360X99.51Y8.046Z-.531  
 N4365X98.936Y7.724Z-.566  
 N4370X98.358Y7.409Z-.6  
 N4375X97.777Y7.099Z-.635  
 N4380X97.193Y6.796Z-.669  
 N4385X96.605Y6.5Z-.704  
 N4390X97.216Y6.192Z-.74  
 N4395X97.824Y5.876Z-.776  
 N4400X98.428Y5.554Z-.811  
 N4405X99.028Y5.225Z-.847  
 N4410X99.625Y4.889Z-.883  
 N4415X100.217Y4.546Z-.919  
 N4420X100.806Y4.196Z-.955  
 N4425X101.39Y3.84Z-.991  
 N4430X101.971Y3.477Z-1.027  
 N4435X102.547Y3.107Z-1.063  
 N4440X103.119Y2.731Z-1.099  
 N4445X103.687Y2.348Z-1.134  
 N4450X104.25Y1.959Z-1.17  
 N4455Y9.75Z-1.579  
 N4460X102.326Z-1.679  
 N4465X101.771Y9.397Z-1.714  
 N4470X101.211Y9.05Z-1.748  
 N4475X100.648Y8.709Z-1.783  
 N4480X100.081Y8.374Z-1.817  
 N4485X99.51Y8.046Z-1.852  
 N4490X98.936Y7.724Z-1.886  
 N4495X98.358Y7.409Z-1.921  
 N4500X97.777Y7.099Z-1.955  
 N4505X97.193Y6.796Z-1.99  
 N4510X96.605Y6.5Z-2.024  
 N4515X97.216Y6.192Z-2.06  
 N4520X97.824Y5.876Z-2.096  
 N4525X98.428Y5.554Z-2.132  
 N4530X99.028Y5.225Z-2.168  
 N4535X99.625Y4.889Z-2.204  
 N4540X100.217Y4.546Z-2.24  
 N4545X100.806Y4.196Z-2.276  
 N4550X101.39Y3.84Z-2.311  
 N4555X101.971Y3.477Z-2.347  
 N4560X102.547Y3.107Z-2.383  
 N4565X103.119Y2.731Z-2.419  
 N4570X103.687Y2.348Z-2.455  
 N4575X104.25Y1.959Z-2.491  
 N4580Y9.75Z-2.899  
 N4585X102.326Z-3.  
 N4590G02X96.605Y6.5I-  
 32.326J50.25F601.606  
 N4595X104.25Y1.959I-26.605J-  
 53.5  
 N4600G01Y9.75  
 N4605X102.326  
 N4610Y24.75  
 N4615X97.568  
 N4620G02X43.083Y24.25I-  
 27.568J35.25  
 N4625G01X-29.25  
 N4630Y-24.25  
 N4635X31.464  
 N4640G02X50.074Y-  
 6.931I38.536J-22.75  
 N4645G01X43.395Y6.5  
 N4650G02X38.464Y9.25I26.605J5  
 3.5  
 N4655G01X-14.25  
 N4660Y-9.25  
 N4665X23.686  
 N4670G02X43.395Y6.5I46.314J-  
 37.75  
 N4675G01X50.074Y-6.931  
 N4680G02X108.827Y-  
 24.75I19.926J-40.069  
 N4685G01X119.25  
 N4690Y24.75  
 N4695X102.326  
 N4700Y39.75  
 N4705X91.794  
 N4710G02X48.681Y39.25I-  
 21.794J20.25  
 N4715G01X-40.442  
 N4720G02X-44.25Y35.875I-  
 23.558J22.75  
 N4725G01Y-35.875

N4730G02X-40.442Y-39.25I-19.75J-26.125  
 N4735G01X41.277  
 N4740G02X98.853Y-39.75I28.723J-7.75  
 N4745G01X130.655  
 N4750G02X134.25Y-36.505I23.345J-22.25  
 N4755G01Y36.505  
 N4760G02X130.655Y39.75I19.75J25.495  
 N4765G01X102.326  
 N4770Y54.75  
 N4775X83.784  
 N4780G02X56.417Y54.25I-13.784J5.25  
 N4785G01X-48.031  
 N4790G02X-59.25Y44.897I-15.969J7.75  
 N4795G01Y-44.897  
 N4800G02X-48.031Y-54.25I-4.75J-17.103  
 N4805G01X55.25  
 N4810Y-47.  
 N4815G02X84.75I14.75J0  
 N4820G01Y-54.75  
 N4825X138.348  
 N4830G02X149.25Y-45.417I15.652J-7.25  
 N4835G01Y45.417  
 N4840G02X138.348Y54.75I4.75J16.583  
 N4845G01X102.326  
 N4850G00Z2.5  
 N4855G90G54X103.056Y9.75  
 N4860Z-.5  
 N4865G01X102.326Z-.538F300.803  
 N4870X101.771Y9.397Z-.573  
 N4875X101.211Y9.05Z-.607  
 N4880X100.648Y8.709Z-.642  
 N4885X100.081Y8.374Z-.676  
 N4890X99.51Y8.046Z-.711  
 N4895X98.936Y7.724Z-.745  
 N4900X98.358Y7.409Z-.78  
 N4905X97.777Y7.099Z-.814  
 N4910X97.193Y6.796Z-.849  
 N4915X96.605Y6.5Z-.883  
 N4920X97.216Y6.192Z-.919  
 N4925X97.824Y5.876Z-.955  
 N4930X98.428Y5.554Z-.991  
 N4935X99.028Y5.225Z-1.027  
 N4940X99.625Y4.889Z-1.063  
 N4945X100.217Y4.546Z-1.099  
 N4950X100.806Y4.196Z-1.134  
 N4955X101.39Y3.84Z-1.17  
 N4960X101.971Y3.477Z-1.206  
 N4965X102.547Y3.107Z-1.242  
 N4970X103.119Y2.731Z-1.278  
 N4975X103.687Y2.348Z-1.314  
 N4980X104.25Y1.959Z-1.35  
 N4985Y9.75Z-1.758  
 N4990X102.326Z-1.859  
 N4995X101.771Y9.397Z-1.893  
 N5000X101.211Y9.05Z-1.928  
 N5005X100.648Y8.709Z-1.962  
 N5010X100.081Y8.374Z-1.997  
 N5015X99.51Y8.046Z-2.031  
 N5020X98.936Y7.724Z-2.066  
 N5025X98.358Y7.409Z-2.1  
 N5030X97.777Y7.099Z-2.135  
 N5035X97.193Y6.796Z-2.169  
 N5040X96.605Y6.5Z-2.204  
 N5045X97.216Y6.192Z-2.24  
 N5050X97.824Y5.876Z-2.276  
 N5055X98.428Y5.554Z-2.311  
 N5060X99.028Y5.225Z-2.347  
 N5065X99.625Y4.889Z-2.383  
 N5070X100.217Y4.546Z-2.419  
 N5075X100.806Y4.196Z-2.455  
 N5080X101.39Y3.84Z-2.491  
 N5085X101.971Y3.477Z-2.527  
 N5090X102.547Y3.107Z-2.563  
 N5095X103.119Y2.731Z-2.599  
 N5100X103.687Y2.348Z-2.634  
 N5105X104.25Y1.959Z-2.67  
 N5110Y9.75Z-3.079  
 N5115X102.326Z-3.179  
 N5120X101.771Y9.397Z-3.214  
 N5125X101.211Y9.05Z-3.248  
 N5130X100.648Y8.709Z-3.283  
 N5135X100.081Y8.374Z-3.317  
 N5140X99.51Y8.046Z-3.352  
 N5145X98.936Y7.724Z-3.386  
 N5150X98.358Y7.409Z-3.421  
 N5155X97.777Y7.099Z-3.455  
 N5160X97.193Y6.796Z-3.49  
 N5165X96.605Y6.5Z-3.524  
 N5170X97.216Y6.192Z-3.56  
 N5175X97.824Y5.876Z-3.596  
 N5180X98.428Y5.554Z-3.632  
 N5185X99.028Y5.225Z-3.668  
 N5190X99.625Y4.889Z-3.704  
 N5195X100.217Y4.546Z-3.74  
 N5200X100.806Y4.196Z-3.776  
 N5205X101.39Y3.84Z-3.811  
 N5210X101.971Y3.477Z-3.847  
 N5215X102.547Y3.107Z-3.883  
 N5220X103.119Y2.731Z-3.919  
 N5225X103.687Y2.348Z-3.955  
 N5230X104.25Y1.959Z-3.991  
 N5235Y9.75Z-4.399  
 N5240X102.326Z-4.5  
 N5245G02X96.605Y6.5I-32.326J50.25F601.606  
 N5250X104.25Y1.959I-26.605J-53.5  
 N5255G01Y9.75  
 N5260X102.326  
 N5265Y24.75  
 N5270X97.568  
 N5275G02X43.083Y24.25I-27.568J35.25  
 N5280G01X-29.25  
 N5285Y-24.25  
 N5290X31.464  
 N5295G02X50.074Y-6.931I38.536J-22.75  
 N5300G01X43.395Y6.5  
 N5305G02X38.464Y9.25I26.605J53.5  
 N5310G01X-14.25  
 N5315Y-9.25  
 N5320X23.686  
 N5325G02X43.395Y6.5I46.314J-37.75  
 N5330G01X50.074Y-6.931  
 N5335G02X108.827Y-24.75I19.926J-40.069  
 N5340G01X119.25  
 N5345Y24.75  
 N5350X102.326  
 N5355Y39.75  
 N5360X91.794  
 N5365G02X48.681Y39.25I-21.794J20.25  
 N5370G01X-40.442  
 N5375G02X-44.25Y35.875I-23.558J22.75  
 N5380G01Y-35.875  
 N5385G02X-40.442Y-39.25I-19.75J-26.125  
 N5390G01X41.277  
 N5395G02X98.853Y-39.75I28.723J-7.75  
 N5400G01X130.655  
 N5405G02X134.25Y-36.505I23.345J-22.25  
 N5410G01Y36.505  
 N5415G02X130.655Y39.75I19.75J25.495  
 N5420G01X102.326  
 N5425Y54.75  
 N5430X83.784  
 N5435G02X56.417Y54.25I-13.784J5.25  
 N5440G01X-48.031  
 N5445G02X-59.25Y44.897I-15.969J7.75  
 N5450G01Y-44.897  
 N5455G02X-48.031Y-54.25I-4.75J-17.103  
 N5460G01X55.25  
 N5465Y-47.  
 N5470G02X84.75I14.75J0  
 N5475G01Y-54.75  
 N5480X138.348  
 N5485G02X149.25Y-45.417I15.652J-7.25  
 N5490G01Y45.417  
 N5495G02X138.348Y54.75I4.75J16.583  
 N5500G01X102.326  
 N5505G00Z2.5  
 N5510G90G54X103.056Y9.75  
 N5515Z-.5  
 N5520G01X102.326Z-2.038F300.803  
 N5525X101.771Y9.397Z-2.073  
 N5530X101.211Y9.05Z-2.107  
 N5535X100.648Y8.709Z-2.142  
 N5540X100.081Y8.374Z-2.176  
 N5545X99.51Y8.046Z-2.211  
 N5550X98.936Y7.724Z-2.245  
 N5555X98.358Y7.409Z-2.28  
 N5560X97.777Y7.099Z-2.314  
 N5565X97.193Y6.796Z-2.349  
 N5570X96.605Y6.5Z-2.383  
 N5575X97.216Y6.192Z-2.419  
 N5580X97.824Y5.876Z-2.455  
 N5585X98.428Y5.554Z-2.491  
 N5590X99.028Y5.225Z-2.527  
 N5595X99.625Y4.889Z-2.563  
 N5600X100.217Y4.546Z-2.599  
 N5605X100.806Y4.196Z-2.634  
 N5610X101.39Y3.84Z-2.67  
 N5615X101.971Y3.477Z-2.706  
 N5620X102.547Y3.107Z-2.742  
 N5625X103.119Y2.731Z-2.778  
 N5630X103.687Y2.348Z-2.814  
 N5635X104.25Y1.959Z-2.85  
 N5640Y9.75Z-3.258  
 N5645X102.326Z-3.359  
 N5650X101.771Y9.397Z-3.393  
 N5655X101.211Y9.05Z-3.428  
 N5660X100.648Y8.709Z-3.462  
 N5665X100.081Y8.374Z-3.497  
 N5670X99.51Y8.046Z-3.531  
 N5675X98.936Y7.724Z-3.566  
 N5680X98.358Y7.409Z-3.6  
 N5685X97.777Y7.099Z-3.635  
 N5690X97.193Y6.796Z-3.669  
 N5695X96.605Y6.5Z-3.704  
 N5700X97.216Y6.192Z-3.74  
 N5705X97.824Y5.876Z-3.776  
 N5710X98.428Y5.554Z-3.811  
 N5715X99.028Y5.225Z-3.847  
 N5720X99.625Y4.889Z-3.883  
 N5725X100.217Y4.546Z-3.919  
 N5730X100.806Y4.196Z-3.955  
 N5735X101.39Y3.84Z-3.991  
 N5740X101.971Y3.477Z-4.027  
 N5745X102.547Y3.107Z-4.063  
 N5750X103.119Y2.731Z-4.099  
 N5755X103.687Y2.348Z-4.134  
 N5760X104.25Y1.959Z-4.17  
 N5765Y9.75Z-4.579  
 N5770X102.326Z-4.679  
 N5775X101.771Y9.397Z-4.714

N5780X101.211Y9.05Z-4.748  
 N5785X100.648Y8.709Z-4.783  
 N5790X100.081Y8.374Z-4.817  
 N5795X99.51Y8.046Z-4.852  
 N5800X98.936Y7.724Z-4.886  
 N5805X98.358Y7.409Z-4.921  
 N5810X97.777Y7.099Z-4.955  
 N5815X97.193Y6.796Z-4.99  
 N5820X96.605Y6.5Z-5.024  
 N5825X97.216Y6.192Z-5.06  
 N5830X97.824Y5.876Z-5.096  
 N5835X98.428Y5.554Z-5.132  
 N5840X99.028Y5.225Z-5.168  
 N5845X99.625Y4.889Z-5.204  
 N5850X100.217Y4.546Z-5.24  
 N5855X100.806Y4.196Z-5.276  
 N5860X101.39Y3.84Z-5.311  
 N5865X101.971Y3.477Z-5.347  
 N5870X102.547Y3.107Z-5.383  
 N5875X103.119Y2.731Z-5.419  
 N5880X103.687Y2.348Z-5.455  
 N5885X104.25Y1.959Z-5.491  
 N5890Y9.75Z-5.899  
 N5895X102.326Z-6.  
 N5900G02X96.605Y6.5I-  
 32.326J50.25F601.606  
 N5905X104.25Y1.959I-26.605J-  
 53.5  
 N5910G01Y9.75  
 N5915X102.326  
 N5920Y24.75  
 N5925X97.568  
 N5930G02X43.083Y24.25I-  
 27.568J35.25  
 N5935G01X-29.25  
 N5940Y-24.25  
 N5945X31.464  
 N5950G02X50.074Y-  
 6.931I38.536J-22.75  
 N5955G01X43.395Y6.5  
 N5960G02X38.464Y9.25I26.605J5  
 3.5  
 N5965G01X-14.25  
 N5970Y-9.25  
 N5975X23.686  
 N5980G02X43.395Y6.5I46.314J-  
 37.75  
 N5985G01X50.074Y-6.931  
 N5990G02X108.827Y-  
 24.75I19.926J-40.069  
 N5995G01X119.25  
 N6000Y24.75  
 N6005X102.326  
 N6010Y39.75  
 N6015X91.794  
 N6020G02X48.681Y39.25I-  
 21.794J20.25  
 N6025G01X-40.442  
 N6030G02X-44.25Y35.875I-  
 23.558J22.75  
 N6035G01Y-35.875  
 N6040G02X-40.442Y-39.25I-  
 19.75J-26.125  
 N6045G01X41.277  
 N6050G02X98.853Y-  
 39.75I28.723J-7.75  
 N6055G01X130.655  
 N6060G02X134.25Y-  
 36.505I23.345J-22.25  
 N6065G01Y36.505  
 N6070G02X130.655Y39.75I19.75J  
 25.495  
 N6075G01X102.326  
 N6080Y54.75  
 N6085X83.784  
 N6090G02X56.417Y54.25I-  
 13.784J5.25  
 N6095G01X-48.031  
 N6100G02X-59.25Y44.897I-  
 15.969J7.75  
 N6105G01Y-44.897  
 N6110G02X-48.031Y-54.25I-  
 4.75J-17.103  
 N6115G01X55.25  
 N6120Y-47.  
 N6125G02X84.75I14.75J0  
 N6130G01Y-54.75  
 N6135X138.348  
 N6140G02X149.25Y-  
 45.417I15.652J-7.25  
 N6145G01Y45.417  
 N6150G02X138.348Y54.75I4.75J1  
 6.583  
 N6155G01X102.326  
 N6160G00Z2.5  
 N6165G90G54X103.056Y9.75  
 N6170Z-3.5  
 N6175G01X102.326Z-  
 3.538F300.803  
 N6180X101.771Y9.397Z-3.573  
 N6185X101.211Y9.05Z-3.607  
 N6190X100.648Y8.709Z-3.642  
 N6195X100.081Y8.374Z-3.676  
 N6200X99.51Y8.046Z-3.711  
 N6205X98.936Y7.724Z-3.745  
 N6210X98.358Y7.409Z-3.78  
 N6215X97.777Y7.099Z-3.814  
 N6220X97.193Y6.796Z-3.849  
 N6225X96.605Y6.5Z-3.883  
 N6230X97.216Y6.192Z-3.919  
 N6235X97.824Y5.876Z-3.955  
 N6240X98.428Y5.554Z-3.991  
 N6245X99.028Y5.225Z-4.027  
 N6250X99.625Y4.889Z-4.063  
 N6255X100.217Y4.546Z-4.099  
 N6260X100.806Y4.196Z-4.134  
 N6265X101.39Y3.84Z-4.17  
 N6270X101.971Y3.477Z-4.206  
 N6275X102.547Y3.107Z-4.242  
 N6280X103.119Y2.731Z-4.278  
 N6285X103.687Y2.348Z-4.314  
 N6290X104.25Y1.959Z-4.35  
 N6295Y9.75Z-4.758  
 N6300X102.326Z-4.859  
 N6305X101.771Y9.397Z-4.893  
 N6310X101.211Y9.05Z-4.928  
 N6315X100.648Y8.709Z-4.962  
 N6320X100.081Y8.374Z-4.997  
 N6325X99.51Y8.046Z-5.031  
 N6330X98.936Y7.724Z-5.066  
 N6335X98.358Y7.409Z-5.1  
 N6340X97.777Y7.099Z-5.135  
 N6345X97.193Y6.796Z-5.169  
 N6350X96.605Y6.5Z-5.204  
 N6355X97.216Y6.192Z-5.24  
 N6360X97.824Y5.876Z-5.276  
 N6365X98.428Y5.554Z-5.311  
 N6370X99.028Y5.225Z-5.347  
 N6375X99.625Y4.889Z-5.383  
 N6380X100.217Y4.546Z-5.419  
 N6385X100.806Y4.196Z-5.455  
 N6390X101.39Y3.84Z-5.491  
 N6395X101.971Y3.477Z-5.527  
 N6400X102.547Y3.107Z-5.563  
 N6405X103.119Y2.731Z-5.599  
 N6410X103.687Y2.348Z-5.634  
 N6415X104.25Y1.959Z-5.67  
 N6420Y9.75Z-6.079  
 N6425X102.326Z-6.179  
 N6430X101.771Y9.397Z-6.214  
 N6435X101.211Y9.05Z-6.248  
 N6440X100.648Y8.709Z-6.283  
 N6445X100.081Y8.374Z-6.317  
 N6450X99.51Y8.046Z-6.352  
 N6455X98.936Y7.724Z-6.386  
 N6460X98.358Y7.409Z-6.421  
 N6465X97.777Y7.099Z-6.455  
 N6470X97.193Y6.796Z-6.49  
 N6475X96.605Y6.5Z-6.524  
 N6480X97.216Y6.192Z-6.56  
 N6485X97.824Y5.876Z-6.596  
 N6490X98.428Y5.554Z-6.632  
 N6495X99.028Y5.225Z-6.668  
 N6500X99.625Y4.889Z-6.704  
 N6505X100.217Y4.546Z-6.74  
 N6510X100.806Y4.196Z-6.776  
 N6515X101.39Y3.84Z-6.811  
 N6520X101.971Y3.477Z-6.847  
 N6525X102.547Y3.107Z-6.883  
 N6530X103.119Y2.731Z-6.919  
 N6535X103.687Y2.348Z-6.955  
 N6540X104.25Y1.959Z-6.991  
 N6545Y9.75Z-7.399  
 N6550X102.326Z-7.5  
 N6555G02X96.605Y6.5I-  
 32.326J50.25F601.606  
 N6560X104.25Y1.959I-26.605J-  
 53.5  
 N6565G01Y9.75  
 N6570X102.326  
 N6575Y24.75  
 N6580X97.568  
 N6585G02X43.083Y24.25I-  
 27.568J35.25  
 N6590G01X-29.25  
 N6595Y-24.25  
 N6600X31.464  
 N6605G02X50.074Y-  
 6.931I38.536J-22.75  
 N6610G01X43.395Y6.5  
 N6615G02X38.464Y9.25I26.605J5  
 3.5  
 N6620G01X-14.25  
 N6625Y-9.25  
 N6630X23.686  
 N6635G02X43.395Y6.5I46.314J-  
 37.75  
 N6640G01X50.074Y-6.931  
 N6645G02X108.827Y-  
 24.75I19.926J-40.069  
 N6650G01X119.25  
 N6655Y24.75  
 N6660X102.326  
 N6665Y39.75  
 N6670X91.794  
 N6675G02X48.681Y39.25I-  
 21.794J20.25  
 N6680G01X-40.442  
 N6685G02X-44.25Y35.875I-  
 23.558J22.75  
 N6690G01Y-35.875  
 N6695G02X-40.442Y-39.25I-  
 19.75J-26.125  
 N6700G01X41.277  
 N6705G02X98.853Y-  
 39.75I28.723J-7.75  
 N6710G01X130.655  
 N6715G02X134.25Y-  
 36.505I23.345J-22.25  
 N6720G01Y36.505  
 N6725G02X130.655Y39.75I19.75J  
 25.495  
 N6730G01X102.326  
 N6735Y54.75  
 N6740X83.784  
 N6745G02X56.417Y54.25I-  
 13.784J5.25  
 N6750G01X-48.031  
 N6755G02X-59.25Y44.897I-  
 15.969J7.75  
 N6760G01Y-44.897  
 N6765G02X-48.031Y-54.25I-  
 4.75J-17.103  
 N6770G01X55.25  
 N6775Y-47.  
 N6780G02X84.75I14.75J0  
 N6785G01Y-54.75  
 N6790X138.348  
 N6795G02X149.25Y-  
 45.417I15.652J-7.25

N6800G01Y45.417  
 N6805G02X138.348Y54.75I4.75J1  
 6.583  
 N6810G01X102.326  
 N6815G00Z2.5  
 N6820G90G54X103.056Y9.75  
 N6825Z-5.  
 N6830G01X102.326Z-  
 5.038F300.803  
 N6835X101.771Y9.397Z-5.073  
 N6840X101.211Y9.05Z-5.107  
 N6845X100.648Y8.709Z-5.142  
 N6850X100.081Y8.374Z-5.176  
 N6855X99.51Y8.046Z-5.211  
 N6860X98.936Y7.724Z-5.245  
 N6865X98.358Y7.409Z-5.28  
 N6870X97.777Y7.099Z-5.314  
 N6875X97.193Y6.796Z-5.349  
 N6880X96.605Y6.5Z-5.383  
 N6885X97.216Y6.192Z-5.419  
 N6890X97.824Y5.876Z-5.455  
 N6895X98.428Y5.554Z-5.491  
 N6900X99.028Y5.225Z-5.527  
 N6905X99.625Y4.889Z-5.563  
 N6910X100.217Y4.546Z-5.599  
 N6915X100.806Y4.196Z-5.634  
 N6920X101.39Y3.84Z-5.67  
 N6925X101.971Y3.477Z-5.706  
 N6930X102.547Y3.107Z-5.742  
 N6935X103.119Y2.731Z-5.778  
 N6940X103.687Y2.348Z-5.814  
 N6945X104.25Y1.959Z-5.85  
 N6950Y9.75Z-6.258  
 N6955X102.326Z-6.359  
 N6960X101.771Y9.397Z-6.393  
 N6965X101.211Y9.05Z-6.428  
 N6970X100.648Y8.709Z-6.462  
 N6975X100.081Y8.374Z-6.497  
 N6980X99.51Y8.046Z-6.531  
 N6985X98.936Y7.724Z-6.566  
 N6990X98.358Y7.409Z-6.6  
 N6995X97.777Y7.099Z-6.635  
 N7000X97.193Y6.796Z-6.669  
 N7005X96.605Y6.5Z-6.704  
 N7010X97.216Y6.192Z-6.74  
 N7015X97.824Y5.876Z-6.776  
 N7020X98.428Y5.554Z-6.811  
 N7025X99.028Y5.225Z-6.847  
 N7030X99.625Y4.889Z-6.883  
 N7035X100.217Y4.546Z-6.919  
 N7040X100.806Y4.196Z-6.955  
 N7045X101.39Y3.84Z-6.991  
 N7050X101.971Y3.477Z-7.027  
 N7055X102.547Y3.107Z-7.063  
 N7060X103.119Y2.731Z-7.099  
 N7065X103.687Y2.348Z-7.134  
 N7070X104.25Y1.959Z-7.17  
 N7075Y9.75Z-7.579  
 N7080X102.326Z-7.679  
 N7085X101.771Y9.397Z-7.714  
 N7090X101.211Y9.05Z-7.748  
 N7095X100.648Y8.709Z-7.783  
 N7100X100.081Y8.374Z-7.817  
 N7105X99.51Y8.046Z-7.852  
 N7110X98.936Y7.724Z-7.886  
 N7115X98.358Y7.409Z-7.921  
 N7120X97.777Y7.099Z-7.955  
 N7125X97.193Y6.796Z-7.99  
 N7130X96.605Y6.5Z-8.024  
 N7135X97.216Y6.192Z-8.06  
 N7140X97.824Y5.876Z-8.096  
 N7145X98.428Y5.554Z-8.132  
 N7150X99.028Y5.225Z-8.168  
 N7155X99.625Y4.889Z-8.204  
 N7160X100.217Y4.546Z-8.24  
 N7165X100.806Y4.196Z-8.276  
 N7170X101.39Y3.84Z-8.311  
 N7175X101.971Y3.477Z-8.347  
 N7180X102.547Y3.107Z-8.383  
 N7185X103.119Y2.731Z-8.419  
 N7190X103.687Y2.348Z-8.455  
 N7195X104.25Y1.959Z-8.491  
 N7200Y9.75Z-8.899  
 N7205X102.326Z-9.  
 N7210G02X96.605Y6.5I-  
 32.326J50.25F601.606  
 N7215X104.25Y1.959I-26.605J-  
 53.5  
 N7220G01Y9.75  
 N7225X102.326  
 N7230Y24.75  
 N7235X97.568  
 N7240G02X43.083Y24.25I-  
 27.568J35.25  
 N7245G01X-29.25  
 N7250Y-24.25  
 N7255X31.464  
 N7260G02X50.074Y-  
 6.931I38.536J-22.75  
 N7265G01X43.395Y6.5  
 N7270G02X38.464Y9.25I26.605J5  
 3.5  
 N7275G01X-14.25  
 N7280Y-9.25  
 N7285X23.686  
 N7290G02X43.395Y6.5I46.314J-  
 37.75  
 N7295G01X50.074Y-6.931  
 N7300G02X108.827Y-  
 24.75I19.926J-40.069  
 N7305G01X119.25  
 N7310Y24.75  
 N7315X102.326  
 N7320Y39.75  
 N7325X91.794  
 N7330G02X48.681Y39.25I-  
 21.794J20.25  
 N7335G01X-40.442  
 N7340G02X-44.25Y35.875I-  
 23.558J22.75  
 N7345G01Y-35.875  
 N7350G02X-40.442Y-39.25I-  
 19.75J-26.125  
 N7355G01X41.277  
 N7360G02X98.853Y-  
 39.75I28.723J-7.75  
 N7365G01X130.655  
 N7370G02X134.25Y-  
 36.505I23.345J-22.25  
 N7375G01Y36.505  
 N7380G02X130.655Y39.75I19.75J  
 25.495  
 N7385G01X102.326  
 N7390Y54.75  
 N7395X83.784  
 N7400G02X56.417Y54.25I-  
 13.784J5.25  
 N7405G01X-48.031  
 N7410G02X-59.25Y44.897I-  
 15.969J7.75  
 N7415G01Y-44.897  
 N7420G02X-48.031Y-54.25I-  
 4.75J-17.103  
 N7425G01X55.25  
 N7430Y-47.  
 N7435G02X84.75I14.75J0  
 N7440G01Y-54.75  
 N7445X138.348  
 N7450G02X149.25Y-  
 45.417I15.652J-7.25  
 N7455G01Y45.417  
 N7460G02X138.348Y54.75I4.75J1  
 6.583  
 N7465G01X102.326  
 N7470G00Z2.5  
 N7475G90G54X103.056Y9.75  
 N7480Z-6.5  
 N7485G01X102.326Z-  
 6.538F300.803  
 N7490X101.771Y9.397Z-6.573  
 N7495X101.211Y9.05Z-6.607  
 N7500X100.648Y8.709Z-6.642  
 N7505X100.081Y8.374Z-6.676  
 N7510X99.51Y8.046Z-6.711  
 N7515X98.936Y7.724Z-6.745  
 N7520X98.358Y7.409Z-6.78  
 N7525X97.777Y7.099Z-6.814  
 N7530X97.193Y6.796Z-6.849  
 N7535X96.605Y6.5Z-6.883  
 N7540X97.216Y6.192Z-6.919  
 N7545X97.824Y5.876Z-6.955  
 N7550X98.428Y5.554Z-6.991  
 N7555X99.028Y5.225Z-7.027  
 N7560X99.625Y4.889Z-7.063  
 N7565X100.217Y4.546Z-7.099  
 N7570X100.806Y4.196Z-7.134  
 N7575X101.39Y3.84Z-7.17  
 N7580X101.971Y3.477Z-7.206  
 N7585X102.547Y3.107Z-7.242  
 N7590X103.119Y2.731Z-7.278  
 N7595X103.687Y2.348Z-7.314  
 N7600X104.25Y1.959Z-7.35  
 N7605Y9.75Z-7.758  
 N7610X102.326Z-7.859  
 N7615X101.771Y9.397Z-7.893  
 N7620X101.211Y9.05Z-7.928  
 N7625X100.648Y8.709Z-7.962  
 N7630X100.081Y8.374Z-7.997  
 N7635X99.51Y8.046Z-8.031  
 N7640X98.936Y7.724Z-8.066  
 N7645X98.358Y7.409Z-8.1  
 N7650X97.777Y7.099Z-8.135  
 N7655X97.193Y6.796Z-8.169  
 N7660X96.605Y6.5Z-8.204  
 N7665X97.216Y6.192Z-8.24  
 N7670X97.824Y5.876Z-8.276  
 N7675X98.428Y5.554Z-8.311  
 N7680X99.028Y5.225Z-8.347  
 N7685X99.625Y4.889Z-8.383  
 N7690X100.217Y4.546Z-8.419  
 N7695X100.806Y4.196Z-8.455  
 N7700X101.39Y3.84Z-8.491  
 N7705X101.971Y3.477Z-8.527  
 N7710X102.547Y3.107Z-8.563  
 N7715X103.119Y2.731Z-8.599  
 N7720X103.687Y2.348Z-8.634  
 N7725X104.25Y1.959Z-8.67  
 N7730Y9.75Z-9.079  
 N7735X102.326Z-9.179  
 N7740X101.771Y9.397Z-9.214  
 N7745X101.211Y9.05Z-9.248  
 N7750X100.648Y8.709Z-9.283  
 N7755X100.081Y8.374Z-9.317  
 N7760X99.51Y8.046Z-9.352  
 N7765X98.936Y7.724Z-9.386  
 N7770X98.358Y7.409Z-9.421  
 N7775X97.777Y7.099Z-9.455  
 N7780X97.193Y6.796Z-9.49  
 N7785X96.605Y6.5Z-9.524  
 N7790X97.216Y6.192Z-9.56  
 N7795X97.824Y5.876Z-9.596  
 N7800X98.428Y5.554Z-9.632  
 N7805X99.028Y5.225Z-9.668  
 N7810X99.625Y4.889Z-9.704  
 N7815X100.217Y4.546Z-9.74  
 N7820X100.806Y4.196Z-9.776  
 N7825X101.39Y3.84Z-9.811  
 N7830X101.971Y3.477Z-9.847  
 N7835X102.547Y3.107Z-9.883  
 N7840X103.119Y2.731Z-9.919  
 N7845X103.687Y2.348Z-9.955  
 N7850X104.25Y1.959Z-9.991  
 N7855Y9.75Z-10.399  
 N7860X102.326Z-10.5  
 N7865G02X96.605Y6.5I-  
 32.326J50.25F601.606  
 N7870X104.25Y1.959I-26.605J-  
 53.5  
 N7875G01Y9.75  
 N7880X102.326

N7885Y24.75  
 N7890X97.568  
 N7895G02X43.083Y24.25I-  
 27.568J35.25  
 N7900G01X-29.25  
 N7905Y-24.25  
 N7910X31.464  
 N7915G02X50.074Y-  
 6.931I38.536J-22.75  
 N7920G01X43.395Y6.5  
 N7925G02X38.464Y9.25I26.605J5  
 3.5  
 N7930G01X-14.25  
 N7935Y-9.25  
 N7940X23.686  
 N7945G02X43.395Y6.5I46.314J-  
 37.75  
 N7950G01X50.074Y-6.931  
 N7955G02X108.827Y-  
 24.75I19.926J-40.069  
 N7960G01X119.25  
 N7965Y24.75  
 N7970X102.326  
 N7975Y39.75  
 N7980X91.794  
 N7985G02X48.681Y39.25I-  
 21.794J20.25  
 N7990G01X-40.442  
 N7995G02X-44.25Y35.875I-  
 23.558J22.75  
 N8000G01Y-35.875  
 N8005G02X-40.442Y-39.25I-  
 19.75J-26.125  
 N8010G01X41.277  
 N8015G02X98.853Y-  
 39.75I28.723J-7.75  
 N8020G01X130.655  
 N8025G02X134.25Y-  
 36.505I23.345J-22.25  
 N8030G01Y36.505  
 N8035G02X130.655Y39.75I19.75J  
 25.495  
 N8040G01X102.326  
 N8045Y54.75  
 N8050X83.784  
 N8055G02X56.417Y54.25I-  
 13.784J5.25  
 N8060G01X-48.031  
 N8065G02X-59.25Y44.897I-  
 15.969J7.75  
 N8070G01Y-44.897  
 N8075G02X-48.031Y-54.25I-  
 4.75J-17.103  
 N8080G01X55.25  
 N8085Y-47.  
 N8090G02X84.75I14.75J0  
 N8095G01Y-54.75  
 N8100X138.348  
 N8105G02X149.25Y-  
 45.417I15.652J-7.25  
 N8110G01Y45.417  
 N8115G02X138.348Y54.75I4.75J1  
 6.583  
 N8120G01X102.326  
 N8125G00Z2.5  
 N8130G90G54X103.056Y9.75  
 N8135Z-8.  
 N8140G01X102.326Z-  
 8.038F300.803  
 N8145X101.771Y9.397Z-8.073  
 N8150X101.211Y9.05Z-8.107  
 N8155X100.648Y8.709Z-8.142  
 N8160X100.081Y8.374Z-8.176  
 N8165X99.51Y8.046Z-8.211  
 N8170X98.936Y7.724Z-8.245  
 N8175X98.358Y7.409Z-8.28  
 N8180X97.777Y7.099Z-8.314  
 N8185X97.193Y6.796Z-8.349  
 N8190X96.605Y6.5Z-8.383  
 N8195X97.216Y6.192Z-8.419  
 N8200X97.824Y5.876Z-8.455  
 N8205X98.428Y5.554Z-8.491  
 N8210X99.028Y5.225Z-8.527  
 N8215X99.625Y4.889Z-8.563  
 N8220X100.217Y4.546Z-8.599  
 N8225X100.806Y4.196Z-8.634  
 N8230X101.39Y3.84Z-8.67  
 N8235X101.971Y3.477Z-8.706  
 N8240X102.547Y3.107Z-8.742  
 N8245X103.119Y2.731Z-8.778  
 N8250X103.687Y2.348Z-8.814  
 N8255X104.25Y1.959Z-8.85  
 N8260Y9.75Z-9.258  
 N8265X102.326Z-9.359  
 N8270X101.771Y9.397Z-9.393  
 N8275X101.211Y9.05Z-9.428  
 N8280X100.648Y8.709Z-9.462  
 N8285X100.081Y8.374Z-9.497  
 N8290X99.51Y8.046Z-9.531  
 N8295X98.936Y7.724Z-9.566  
 N8300X98.358Y7.409Z-9.6  
 N8305X97.777Y7.099Z-9.635  
 N8310X97.193Y6.796Z-9.669  
 N8315X96.605Y6.5Z-9.704  
 N8320X97.216Y6.192Z-9.74  
 N8325X97.824Y5.876Z-9.776  
 N8330X98.428Y5.554Z-9.811  
 N8335X99.028Y5.225Z-9.847  
 N8340X99.625Y4.889Z-9.883  
 N8345X100.217Y4.546Z-9.919  
 N8350X100.806Y4.196Z-9.955  
 N8355X101.39Y3.84Z-9.991  
 N8360X101.971Y3.477Z-10.027  
 N8365X102.547Y3.107Z-10.063  
 N8370X103.119Y2.731Z-10.099  
 N8375X103.687Y2.348Z-10.134  
 N8380X104.25Y1.959Z-10.17  
 N8385Y9.75Z-10.579  
 N8390X102.326Z-10.679  
 N8395X101.771Y9.397Z-10.714  
 N8400X101.211Y9.05Z-10.748  
 N8405X100.648Y8.709Z-10.783  
 N8410X100.081Y8.374Z-10.817  
 N8415X99.51Y8.046Z-10.852  
 N8420X98.936Y7.724Z-10.886  
 N8425X98.358Y7.409Z-10.921  
 N8430X97.777Y7.099Z-10.955  
 N8435X97.193Y6.796Z-10.99  
 N8440X96.605Y6.5Z-11.024  
 N8445X97.216Y6.192Z-11.06  
 N8450X97.824Y5.876Z-11.096  
 N8455X98.428Y5.554Z-11.132  
 N8460X99.028Y5.225Z-11.168  
 N8465X99.625Y4.889Z-11.204  
 N8470X100.217Y4.546Z-11.24  
 N8475X100.806Y4.196Z-11.276  
 N8480X101.39Y3.84Z-11.311  
 N8485X101.971Y3.477Z-11.347  
 N8490X102.547Y3.107Z-11.383  
 N8495X103.119Y2.731Z-11.419  
 N8500X103.687Y2.348Z-11.455  
 N8505X104.25Y1.959Z-11.491  
 N8510Y9.75Z-11.899  
 N8515X102.326Z-12.  
 N8520G02X96.605Y6.5I-  
 32.326J50.25F601.606  
 N8525X104.25Y1.959I-26.605J-  
 53.5  
 N8530G01Y9.75  
 N8535X102.326  
 N8540Y24.75  
 N8545X97.568  
 N8550G02X43.083Y24.25I-  
 27.568J35.25  
 N8555G01X-29.25  
 N8560Y-24.25  
 N8565X31.464  
 N8570G02X50.074Y-  
 6.931I38.536J-22.75  
 N8575G01X43.395Y6.5  
 N8580G02X38.464Y9.25I26.605J5  
 3.5  
 N8585G01X-14.25  
 N8590Y-9.25  
 N8595X23.686  
 N8600G02X43.395Y6.5I46.314J-  
 37.75  
 N8605G01X50.074Y-6.931  
 N8610G02X108.827Y-  
 24.75I19.926J-40.069  
 N8615G01X119.25  
 N8620Y24.75  
 N8625X102.326  
 N8630Y39.75  
 N8635X91.794  
 N8640G02X48.681Y39.25I-  
 21.794J20.25  
 N8645G01X-40.442  
 N8650G02X-44.25Y35.875I-  
 23.558J22.75  
 N8655G01Y-35.875  
 N8660G02X-40.442Y-39.25I-  
 19.75J-26.125  
 N8665G01X41.277  
 N8670G02X98.853Y-  
 39.75I28.723J-7.75  
 N8675G01X130.655  
 N8680G02X134.25Y-  
 36.505I23.345J-22.25  
 N8685G01Y36.505  
 N8690G02X130.655Y39.75I19.75J  
 25.495  
 N8695G01X102.326  
 N8700Y54.75  
 N8705X83.784  
 N8710G02X56.417Y54.25I-  
 13.784J5.25  
 N8715G01X-48.031  
 N8720G02X-59.25Y44.897I-  
 15.969J7.75  
 N8725G01Y-44.897  
 N8730G02X-48.031Y-54.25I-  
 4.75J-17.103  
 N8735G01X55.25  
 N8740Y-47.  
 N8745G02X84.75I14.75J0  
 N8750G01Y-54.75  
 N8755X138.348  
 N8760G02X149.25Y-  
 45.417I15.652J-7.25  
 N8765G01Y45.417  
 N8770G02X138.348Y54.75I4.75J1  
 6.583  
 N8775G01X102.326  
 N8780G00Z2.5  
 N8785G90G54X98.58Y5.471  
 N8790Z-9.5  
 N8795G01X99.164Y5.149Z-  
 9.535F300.803  
 N8800X99.745Y4.82Z-9.57  
 N8805X100.322Y4.484Z-9.605  
 N8810X100.895Y4.143Z-9.64  
 N8815X101.464Y3.794Z-9.675  
 N8820X102.029Y3.44Z-9.71  
 N8825X102.591Y3.079Z-9.745  
 N8830X103.148Y2.712Z-9.78  
 N8835X103.701Y2.339Z-9.815  
 N8840X104.25Y1.959Z-9.85  
 N8845Y9.75Z-10.258  
 N8850X102.326Z-10.359  
 N8855X101.771Y9.397Z-10.393  
 N8860X101.211Y9.05Z-10.428  
 N8865X100.648Y8.709Z-10.462  
 N8870X100.081Y8.374Z-10.497  
 N8875X99.51Y8.046Z-10.531  
 N8880X98.936Y7.724Z-10.566  
 N8885X98.358Y7.409Z-10.6  
 N8890X97.777Y7.099Z-10.635  
 N8895X97.193Y6.796Z-10.669  
 N8900X96.605Y6.5Z-10.704

N8905X97.216Y6.192Z-10.74  
 N8910X97.824Y5.876Z-10.776  
 N8915X98.428Y5.554Z-10.811  
 N8920X99.028Y5.225Z-10.847  
 N8925X99.625Y4.889Z-10.883  
 N8930X100.217Y4.546Z-10.919  
 N8935X100.806Y4.196Z-10.955  
 N8940X101.39Y3.84Z-10.991  
 N8945X101.971Y3.477Z-11.027  
 N8950X102.547Y3.107Z-11.063  
 N8955X103.119Y2.731Z-11.099  
 N8960X103.687Y2.348Z-11.134  
 N8965X104.25Y1.959Z-11.17  
 N8970Y9.75Z-11.579  
 N8975X102.326Z-11.679  
 N8980X101.771Y9.397Z-11.714  
 N8985X101.211Y9.05Z-11.748  
 N8990X100.648Y8.709Z-11.783  
 N8995X100.081Y8.374Z-11.817  
 N9000X99.51Y8.046Z-11.852  
 N9005X98.936Y7.724Z-11.886  
 N9010X98.358Y7.409Z-11.921  
 N9015X97.777Y7.099Z-11.955  
 N9020X97.193Y6.796Z-11.99  
 N9025X96.605Y6.5Z-12.024  
 N9030X97.216Y6.192Z-12.06  
 N9035X97.824Y5.876Z-12.096  
 N9040X98.428Y5.554Z-12.132  
 N9045X99.028Y5.225Z-12.168  
 N9050X99.625Y4.889Z-12.204  
 N9055X100.217Y4.546Z-12.24  
 N9060X100.806Y4.196Z-12.276  
 N9065X101.39Y3.84Z-12.311  
 N9070X101.971Y3.477Z-12.347  
 N9075X102.547Y3.107Z-12.383  
 N9080X103.119Y2.731Z-12.419  
 N9085X103.687Y2.348Z-12.455  
 N9090X104.25Y1.959Z-12.491  
 N9095Y9.75Z-12.899  
 N9100X102.326Z-13.  
 N9105G02X96.605Y6.5I-  
 32.326J50.25F601.606  
 N9110X104.25Y1.959I-26.605J-  
 53.5  
 N9115G01Y9.75  
 N9120X102.326  
 N9125Y24.75  
 N9130X97.568  
 N9135G02X43.083Y24.25I-  
 27.568J35.25  
 N9140G01X-29.25  
 N9145Y-24.25  
 N9150X31.464  
 N9155G02X50.074Y-  
 6.931I38.536J-22.75  
 N9160G01X43.395Y6.5  
 N9165G02X38.464Y9.25I26.605J5  
 3.5  
 N9170G01X-14.25  
 N9175Y-9.25  
 N9180X23.686  
 N9185G02X43.395Y6.5I46.314J-  
 37.75  
 N9190G01X50.074Y-6.931  
 N9195G02X108.827Y-  
 24.75I19.926J-40.069  
 N9200G01X119.25  
 N9205Y24.75  
 N9210X102.326  
 N9215Y39.75  
 N9220X91.794  
 N9225G02X48.681Y39.25I-  
 21.794J20.25  
 N9230G01X-40.442  
 N9235G02X-44.25Y35.875I-  
 23.558J22.75  
 N9240G01Y-35.875  
 N9245G02X-40.442Y-39.25I-  
 19.75J-26.125  
 N9250G01X41.277  
 N9255G02X98.853Y-  
 39.75I28.723J-7.75  
 N9260G01X130.655  
 N9265G02X134.25Y-  
 36.505I23.345J-22.25  
 N9270G01Y36.505  
 N9275G02X130.655Y39.75I19.75J  
 25.495  
 N9280G01X102.326  
 N9285Y54.75  
 N9290X83.784  
 N9295G02X56.417Y54.25I-  
 13.784J5.25  
 N9300G01X-48.031  
 N9305G02X-59.25Y44.897I-  
 15.969J7.75  
 N9310G01Y-44.897  
 N9315G02X-48.031Y-54.25I-  
 4.75J-17.103  
 N9320G01X55.25  
 N9325Y-47.  
 N9330G02X84.75I14.75J0  
 N9335G01Y-54.75  
 N9340X138.348  
 N9345G02X149.25Y-  
 45.417I15.652J-7.25  
 N9350G01Y45.417  
 N9355G02X138.348Y54.75I4.75J1  
 6.583  
 N9360G01X102.326  
 N9365G00Z2.5  
 N9370G90G54X103.056Y9.75  
 N9375Z-10.5  
 N9380G01X102.326Z-  
 10.538F300.803  
 N9385X101.771Y9.397Z-10.573  
 N9390X101.211Y9.05Z-10.607  
 N9395X100.648Y8.709Z-10.642  
 N9400X100.081Y8.374Z-10.676  
 N9405X99.51Y8.046Z-10.711  
 N9410X98.936Y7.724Z-10.745  
 N9415X98.358Y7.409Z-10.78  
 N9420X97.777Y7.099Z-10.814  
 N9425X97.193Y6.796Z-10.849  
 N9430X96.605Y6.5Z-10.883  
 N9435X97.216Y6.192Z-10.919  
 N9440X97.824Y5.876Z-10.955  
 N9445X98.428Y5.554Z-10.991  
 N9450X99.028Y5.225Z-11.027  
 N9455X99.625Y4.889Z-11.063  
 N9460X100.217Y4.546Z-11.099  
 N9465X100.806Y4.196Z-11.134  
 N9470X101.39Y3.84Z-11.17  
 N9475X101.971Y3.477Z-11.206  
 N9480X102.547Y3.107Z-11.242  
 N9485X103.119Y2.731Z-11.278  
 N9490X103.687Y2.348Z-11.314  
 N9495X104.25Y1.959Z-11.35  
 N9500Y9.75Z-11.758  
 N9505X102.326Z-11.859  
 N9510X101.771Y9.397Z-11.893  
 N9515X101.211Y9.05Z-11.928  
 N9520X100.648Y8.709Z-11.962  
 N9525X100.081Y8.374Z-11.997  
 N9530X99.51Y8.046Z-12.031  
 N9535X98.936Y7.724Z-12.066  
 N9540X98.358Y7.409Z-12.1  
 N9545X97.777Y7.099Z-12.135  
 N9550X97.193Y6.796Z-12.169  
 N9555X96.605Y6.5Z-12.204  
 N9560X97.216Y6.192Z-12.24  
 N9565X97.824Y5.876Z-12.276  
 N9570X98.428Y5.554Z-12.311  
 N9575X99.028Y5.225Z-12.347  
 N9580X99.625Y4.889Z-12.383  
 N9585X100.217Y4.546Z-12.419  
 N9590X100.806Y4.196Z-12.455  
 N9595X101.39Y3.84Z-12.491  
 N9600X101.971Y3.477Z-12.527  
 N9605X102.547Y3.107Z-12.563  
 N9610X103.119Y2.731Z-12.599  
 N9615X103.687Y2.348Z-12.634  
 N9620X104.25Y1.959Z-12.67  
 N9625Y9.75Z-13.079  
 N9630X102.326Z-13.179  
 N9635X101.771Y9.397Z-13.214  
 N9640X101.211Y9.05Z-13.248  
 N9645X100.648Y8.709Z-13.283  
 N9650X100.081Y8.374Z-13.317  
 N9655X99.51Y8.046Z-13.352  
 N9660X98.936Y7.724Z-13.386  
 N9665X98.358Y7.409Z-13.421  
 N9670X97.777Y7.099Z-13.455  
 N9675X97.193Y6.796Z-13.49  
 N9680X96.605Y6.5Z-13.524  
 N9685X97.216Y6.192Z-13.56  
 N9690X97.824Y5.876Z-13.596  
 N9695X98.428Y5.554Z-13.632  
 N9700X99.028Y5.225Z-13.668  
 N9705X99.625Y4.889Z-13.704  
 N9710X100.217Y4.546Z-13.74  
 N9715X100.806Y4.196Z-13.776  
 N9720X101.39Y3.84Z-13.811  
 N9725X101.971Y3.477Z-13.847  
 N9730X102.547Y3.107Z-13.883  
 N9735X103.119Y2.731Z-13.919  
 N9740X103.687Y2.348Z-13.955  
 N9745X104.25Y1.959Z-13.991  
 N9750Y9.75Z-14.399  
 N9755X102.326Z-14.5  
 N9760G02X96.605Y6.5I-  
 32.326J50.25F601.606  
 N9765X104.25Y1.959I-26.605J-  
 53.5  
 N9770G01Y9.75  
 N9775X102.326  
 N9780Y24.75  
 N9785X97.568  
 N9790G02X84.135Y17.541I-  
 27.568J35.25  
 N9795X7.285Y24.25I-  
 36.052J30.542  
 N9800G01X-7.285  
 N9805G02X-29.25Y4.749I-  
 40.799J23.833  
 N9810G01Y-4.749  
 N9815G02X-7.285Y-24.25I-  
 18.833J-43.334  
 N9820G01X7.285  
 N9825G02X18.074Y-  
 11.586I40.799J-23.833  
 N9830G01X8.548Y0  
 N9835G02X0Y8.548I39.536J48.08  
 3  
 N9840X-8.548Y0I-48.083J39.536  
 N9845X0Y-8.548I-39.536J-  
 48.083  
 N9850X8.548Y0I48.083J-39.536  
 N9855G01X18.074Y-11.586  
 N9860G02X62.085Y-  
 2.956I30.009J-36.497  
 N9865X108.827Y-24.75I7.915J-  
 44.044  
 N9870G01X119.25  
 N9875Y24.75  
 N9880X102.326  
 N9885Y39.75  
 N9890X91.794  
 N9895G02X75.259Y30.719I-  
 21.794J20.25  
 N9900X17.067Y39.25I-  
 27.176J17.365  
 N9905G01X-17.067  
 N9910G02X-44.25Y16.062I-  
 31.017J8.833  
 N9915G01Y-16.062  
 N9920G02X-17.067Y-39.25I-  
 3.833J-32.021  
 N9925G01X17.067

N9930G02X61.147Y-  
 18.598I31.017J-8.833  
 N9935X98.853Y-39.75I8.853J-  
 28.402  
 N9940G01X130.655  
 N9945G02X134.25Y-  
 36.505I23.345J-22.25  
 N9950G01Y36.505  
 N9955G02X130.655Y39.75I19.75J  
 25.495  
 N9960G01X102.326  
 N9965Y54.75  
 N9970X83.784  
 N9975G02X65.213Y46.048I-  
 13.784J5.25  
 N9980X31.973Y54.25I-  
 17.13J2.035  
 N9985G01X-31.973  
 N9990G02X-59.25Y34.935I-  
 16.11J-6.167  
 N9995G01Y-34.935  
 N5G02X-31.973Y-54.25I11.167J-  
 13.148  
 N10G01X31.973  
 N15G02X60.291Y-  
 35.896I16.11J6.167  
 N20X84.75Y-47.I9.709J-11.104  
 N25G01Y-54.75  
 N30X138.348  
 N35G02X149.25Y-  
 45.417I15.652J-7.25  
 N40G01Y45.417  
 N45G02X138.348Y54.75I4.75J16.  
 583  
 N50G01X102.326  
 N55G00Z2.5  
 N60G90G54X98.58Y5.471  
 N65Z-12.  
 N70G01X99.164Y5.149Z-  
 12.035F300.803  
 N75X99.745Y4.82Z-12.07  
 N80X100.322Y4.484Z-12.105  
 N85X100.895Y4.143Z-12.14  
 N90X101.464Y3.794Z-12.175  
 N95X102.029Y3.44Z-12.21  
 N100X102.591Y3.079Z-12.245  
 N105X103.148Y2.712Z-12.28  
 N110X103.701Y2.339Z-12.315  
 N115X104.25Y1.959Z-12.35  
 N120Y9.75Z-12.758  
 N125X102.326Z-12.859  
 N130X101.771Y9.397Z-12.893  
 N135X101.211Y9.05Z-12.928  
 N140X100.648Y8.709Z-12.962  
 N145X100.081Y8.374Z-12.997  
 N150X99.51Y8.046Z-13.031  
 N155X98.936Y7.724Z-13.066  
 N160X98.358Y7.409Z-13.1  
 N165X97.777Y7.099Z-13.135  
 N170X97.193Y6.796Z-13.169  
 N175X96.605Y6.5Z-13.204  
 N180X97.216Y6.192Z-13.24  
 N185X97.824Y5.876Z-13.276  
 N190X98.428Y5.554Z-13.311  
 N195X99.028Y5.225Z-13.347  
 N200X99.625Y4.889Z-13.383  
 N205X100.217Y4.546Z-13.419  
 N210X100.806Y4.196Z-13.455  
 N215X101.39Y3.84Z-13.491  
 N220X101.971Y3.477Z-13.527  
 N225X102.547Y3.107Z-13.563  
 N230X103.119Y2.731Z-13.599  
 N235X103.687Y2.348Z-13.634  
 N240X104.25Y1.959Z-13.67  
 N245Y9.75Z-14.079  
 N250X102.326Z-14.179  
 N255X101.771Y9.397Z-14.214  
 N260X101.211Y9.05Z-14.248  
 N265X100.648Y8.709Z-14.283  
 N270X100.081Y8.374Z-14.317  
 N275X99.51Y8.046Z-14.352  
 N280X98.936Y7.724Z-14.386  
 N285X98.358Y7.409Z-14.421  
 N290X97.777Y7.099Z-14.455  
 N295X97.193Y6.796Z-14.49  
 N300X96.605Y6.5Z-14.524  
 N305X97.216Y6.192Z-14.56  
 N310X97.824Y5.876Z-14.596  
 N315X98.428Y5.554Z-14.632  
 N320X99.028Y5.225Z-14.668  
 N325X99.625Y4.889Z-14.704  
 N330X100.217Y4.546Z-14.74  
 N335X100.806Y4.196Z-14.776  
 N340X101.39Y3.84Z-14.811  
 N345X101.971Y3.477Z-14.847  
 N350X102.547Y3.107Z-14.883  
 N355X103.119Y2.731Z-14.919  
 N360X103.687Y2.348Z-14.955  
 N365X104.25Y1.959Z-14.991  
 N370Y9.75Z-15.399  
 N375X102.326Z-15.5  
 N380G02X96.605Y6.5I-  
 32.326J50.25F601.606  
 N385X104.25Y1.959I-26.605J-  
 53.5  
 N390G01Y9.75  
 N395X102.326  
 N400Y24.75  
 N405X97.568  
 N410G02X84.135Y17.541I-  
 27.568J35.25  
 N415X7.285Y24.25I-  
 36.052J30.542  
 N420G01X-7.285  
 N425G02X-29.25Y4.749I-  
 40.799J23.833  
 N430G01Y-4.749  
 N435G02X-7.285Y-24.25I-  
 18.833J-43.334  
 N440G01X7.285  
 N445G02X18.074Y-  
 11.586I40.799J-23.833  
 N450G01X8.548Y0  
 N455G02X0Y8.548I39.536J48.083  
 N460X-8.548Y0I-48.083J39.536  
 N465X0Y-8.548I-39.536J-48.083  
 N470X8.548Y0I48.083J-39.536  
 N475G01X18.074Y-11.586  
 N480G02X62.085Y-  
 2.956I30.009J-36.497  
 N485X108.827Y-24.75I7.915J-  
 44.044  
 N490G01X119.25  
 N495Y24.75  
 N500X102.326  
 N505Y39.75  
 N510X91.794  
 N515G02X75.259Y30.719I-  
 21.794J20.25  
 N520X17.067Y39.25I-  
 27.176J17.365  
 N525G01X-17.067  
 N530G02X-44.25Y16.062I-  
 31.017J8.833  
 N535G01Y-16.062  
 N540G02X-17.067Y-39.25I-  
 3.833J-32.021  
 N545G01X17.067  
 N550G02X61.147Y-  
 18.598I31.017J-8.833  
 N555X98.853Y-39.75I8.853J-  
 28.402  
 N560G01X130.655  
 N565G02X134.25Y-  
 36.505I23.345J-22.25  
 N570G01Y36.505  
 N575G02X130.655Y39.75I19.75J2  
 5.495  
 N580G01X102.326  
 N585Y54.75  
 N590X83.784  
 N595G02X65.213Y46.048I-  
 13.784J5.25  
 N600X31.973Y54.25I-  
 17.13J2.035  
 N605G01X-31.973  
 N610G02X-59.25Y34.935I-  
 16.11J-6.167  
 N615G01Y-34.935  
 N620G02X-31.973Y-  
 54.25I11.167J-13.148  
 N625G01X31.973  
 N630G02X60.291Y-  
 35.896I16.11J6.167  
 N635X84.75Y-47.I9.709J-11.104  
 N640G01Y-54.75  
 N645X138.348  
 N650G02X149.25Y-  
 45.417I15.652J-7.25  
 N655G01Y45.417  
 N660G02X138.348Y54.75I4.75J16  
 .583  
 N665G01X102.326  
 N670G00Z2.5  
 N675G90G54X103.056Y9.75  
 N680Z-13.  
 N685G01X102.326Z-  
 13.038F300.803  
 N690X101.771Y9.397Z-13.073  
 N695X101.211Y9.05Z-13.107  
 N700X100.648Y8.709Z-13.142  
 N705X100.081Y8.374Z-13.176  
 N710X99.51Y8.046Z-13.211  
 N715X98.936Y7.724Z-13.245  
 N720X98.358Y7.409Z-13.28  
 N725X97.777Y7.099Z-13.314  
 N730X97.193Y6.796Z-13.349  
 N735X96.605Y6.5Z-13.383  
 N740X97.216Y6.192Z-13.419  
 N745X97.824Y5.876Z-13.455  
 N750X98.428Y5.554Z-13.491  
 N755X99.028Y5.225Z-13.527  
 N760X99.625Y4.889Z-13.563  
 N765X100.217Y4.546Z-13.599  
 N770X100.806Y4.196Z-13.634  
 N775X101.39Y3.84Z-13.67  
 N780X101.971Y3.477Z-13.706  
 N785X102.547Y3.107Z-13.742  
 N790X103.119Y2.731Z-13.778  
 N795X103.687Y2.348Z-13.814  
 N800X104.25Y1.959Z-13.85  
 N805Y9.75Z-14.258  
 N810X102.326Z-14.359  
 N815X101.771Y9.397Z-14.393  
 N820X101.211Y9.05Z-14.428  
 N825X100.648Y8.709Z-14.462  
 N830X100.081Y8.374Z-14.497  
 N835X99.51Y8.046Z-14.531  
 N840X98.936Y7.724Z-14.566  
 N845X98.358Y7.409Z-14.6  
 N850X97.777Y7.099Z-14.635  
 N855X97.193Y6.796Z-14.669  
 N860X96.605Y6.5Z-14.704  
 N865X97.216Y6.192Z-14.74  
 N870X97.824Y5.876Z-14.776  
 N875X98.428Y5.554Z-14.811  
 N880X99.028Y5.225Z-14.847  
 N885X99.625Y4.889Z-14.883  
 N890X100.217Y4.546Z-14.919  
 N895X100.806Y4.196Z-14.955  
 N900X101.39Y3.84Z-14.991  
 N905X101.971Y3.477Z-15.027  
 N910X102.547Y3.107Z-15.063  
 N915X103.119Y2.731Z-15.099  
 N920X103.687Y2.348Z-15.134  
 N925X104.25Y1.959Z-15.17  
 N930Y9.75Z-15.579  
 N935X102.326Z-15.679  
 N940X101.771Y9.397Z-15.714  
 N945X101.211Y9.05Z-15.748

N950X100.648Y8.709Z-15.783  
 N955X100.081Y8.374Z-15.817  
 N960X99.51Y8.046Z-15.852  
 N965X98.936Y7.724Z-15.886  
 N970X98.358Y7.409Z-15.921  
 N975X97.777Y7.099Z-15.955  
 N980X97.193Y6.796Z-15.99  
 N985X96.605Y6.5Z-16.024  
 N990X97.216Y6.192Z-16.06  
 N995X97.824Y5.876Z-16.096  
 N1000X98.428Y5.554Z-16.132  
 N1005X99.028Y5.225Z-16.168  
 N1010X99.625Y4.889Z-16.204  
 N1015X100.217Y4.546Z-16.24  
 N1020X100.806Y4.196Z-16.276  
 N1025X101.39Y3.84Z-16.311  
 N1030X101.971Y3.477Z-16.347  
 N1035X102.547Y3.107Z-16.383  
 N1040X103.119Y2.731Z-16.419  
 N1045X103.687Y2.348Z-16.455  
 N1050X104.25Y1.959Z-16.491  
 N1055Y9.75Z-16.899  
 N1060X102.326Z-17.  
 N1065G02X96.605Y6.5I-  
 32.326J50.25F601.606  
 N1070X104.25Y1.959I-26.605J-  
 53.5  
 N1075G01Y9.75  
 N1080X102.326  
 N1085Y24.75  
 N1090X97.568  
 N1095G02X84.479Y17.657I-  
 27.568J35.25  
 N1100G01X81.494Y14.672  
 N1105G02X7.285Y24.25I-  
 33.411J33.411  
 N1110G01X-7.285  
 N1115G02X-29.25Y4.749I-  
 40.799J23.833  
 N1120G01Y-4.749  
 N1125G02X-7.285Y-24.25I-  
 18.833J-43.334  
 N1130G01X7.285  
 N1135G02X18.074Y-  
 11.586I40.799J-23.833  
 N1140G01X8.548Y0  
 N1145G02X0Y8.548I39.536J48.08  
 3  
 N1150X-8.548Y0I-48.083J39.536  
 N1155X0Y-8.548I-39.536J-  
 48.083  
 N1160X8.548Y0I48.083J-39.536  
 N1165G01X18.074Y-11.586  
 N1170G02X62.085Y-  
 2.956I30.009J-36.497  
 N1175X108.827Y-24.75I7.915J-  
 44.044  
 N1180G01X119.25  
 N1185Y24.75  
 N1190X102.326  
 N1195Y39.75  
 N1200X91.794  
 N1205G02X76.6Y30.991I-  
 21.794J20.25  
 N1210G01X70.887Y25.279  
 N1215G02X17.067Y39.25I-  
 22.804J22.804  
 N1220G01X-17.067  
 N1225G02X-44.25Y16.062I-  
 31.017J8.833  
 N1230G01Y-16.062  
 N1235G02X-17.067Y-39.25I-  
 3.833J-32.021  
 N1240G01X17.067  
 N1245G02X61.147Y-  
 18.598I31.017J-8.833  
 N1250X98.853Y-39.75I8.853J-  
 28.402  
 N1255G01X130.655  
 N1260G02X134.25Y-  
 36.505I23.345J-22.25  
 N1265G01Y36.505  
 N1270G02X130.655Y39.75I19.75J  
 25.495  
 N1275G01X102.326  
 N1280Y54.75  
 N1285X83.784  
 N1290G02X69.649Y45.254I-  
 13.784J5.25  
 N1295G01X60.281Y35.886  
 N1300G02X31.973Y54.25I-  
 12.198J12.198  
 N1305G01X-31.973  
 N1310G02X-59.25Y34.935I-  
 16.11J-6.167  
 N1315G01Y-34.935  
 N1320G02X-31.973Y-  
 54.25I11.167J-13.148  
 N1325G01X31.973  
 N1330G02X60.281Y-  
 35.886I16.11J6.167  
 N1335G01X60.291Y-35.896  
 N1340G02X84.75Y-47.I9.709J-  
 11.104  
 N1345G01Y-54.75  
 N1350X138.348  
 N1355G02X149.25Y-  
 45.417I15.652J-7.25  
 N1360G01Y45.417  
 N1365G02X138.348Y54.75I4.75J1  
 6.583  
 N1370G01X102.326  
 N1375G00Z2.5  
 N1380G90G54X104.25Y4.827  
 N1385Z-14.5  
 N1390G01Y9.75Z-14.758F300.803  
 N1395X102.326Z-14.859  
 N1400X101.771Y9.397Z-14.893  
 N1405X101.211Y9.05Z-14.928  
 N1410X100.648Y8.709Z-14.962  
 N1415X100.081Y8.374Z-14.997  
 N1420X99.51Y8.046Z-15.031  
 N1425X98.936Y7.724Z-15.066  
 N1430X98.358Y7.409Z-15.1  
 N1435X97.777Y7.099Z-15.135  
 N1440X97.193Y6.796Z-15.169  
 N1445X96.605Y6.5Z-15.204  
 N1450X97.216Y6.192Z-15.24  
 N1455X97.824Y5.876Z-15.276  
 N1460X98.428Y5.554Z-15.311  
 N1465X99.028Y5.225Z-15.347  
 N1470X99.625Y4.889Z-15.383  
 N1475X100.217Y4.546Z-15.419  
 N1480X100.806Y4.196Z-15.455  
 N1485X101.39Y3.84Z-15.491  
 N1490X101.971Y3.477Z-15.527  
 N1495X102.547Y3.107Z-15.563  
 N1500X103.119Y2.731Z-15.599  
 N1505X103.687Y2.348Z-15.634  
 N1510X104.25Y1.959Z-15.67  
 N1515Y9.75Z-16.079  
 N1520X102.326Z-16.179  
 N1525X101.771Y9.397Z-16.214  
 N1530X101.211Y9.05Z-16.248  
 N1535X100.648Y8.709Z-16.283  
 N1540X100.081Y8.374Z-16.317  
 N1545X99.51Y8.046Z-16.352  
 N1550X98.936Y7.724Z-16.386  
 N1555X98.358Y7.409Z-16.421  
 N1560X97.777Y7.099Z-16.455  
 N1565X97.193Y6.796Z-16.49  
 N1570X96.605Y6.5Z-16.524  
 N1575X97.216Y6.192Z-16.56  
 N1580X97.824Y5.876Z-16.596  
 N1585X98.428Y5.554Z-16.632  
 N1590X99.028Y5.225Z-16.668  
 N1595X99.625Y4.889Z-16.704  
 N1600X100.217Y4.546Z-16.74  
 N1605X100.806Y4.196Z-16.776  
 N1610X101.39Y3.84Z-16.811  
 N1615X101.971Y3.477Z-16.847  
 N1620X102.547Y3.107Z-16.883  
 N1625X103.119Y2.731Z-16.919  
 N1630X103.687Y2.348Z-16.955  
 N1635X104.25Y1.959Z-16.991  
 N1640Y9.75Z-17.399  
 N1645X102.326Z-17.5  
 N1650G02X96.605Y6.5I-  
 32.326J50.25F601.606  
 N1655X104.25Y1.959I-26.605J-  
 53.5  
 N1660G01Y9.75  
 N1665X102.326  
 N1670Y24.75  
 N1675X97.568  
 N1680G02X84.479Y17.657I-  
 27.568J35.25  
 N1685G01X81.494Y14.672  
 N1690G02X7.285Y24.25I-  
 33.411J33.411  
 N1695G01X-7.285  
 N1700G02X-29.25Y4.749I-  
 40.799J23.833  
 N1705G01Y-4.749  
 N1710G02X-7.285Y-24.25I-  
 18.833J-43.334  
 N1715G01X7.285  
 N1720G02X18.074Y-  
 11.586I40.799J-23.833  
 N1725G01X8.548Y0  
 N1730G02X0Y8.548I39.536J48.08  
 3  
 N1735X-8.548Y0I-48.083J39.536  
 N1740X0Y-8.548I-39.536J-  
 48.083  
 N1745X8.548Y0I48.083J-39.536  
 N1750G01X18.074Y-11.586  
 N1755G02X62.085Y-  
 2.956I30.009J-36.497  
 N1760X108.827Y-24.75I7.915J-  
 44.044  
 N1765G01X119.25  
 N1770Y24.75  
 N1775X102.326  
 N1780Y39.75  
 N1785X91.794  
 N1790G02X76.6Y30.991I-  
 21.794J20.25  
 N1795G01X70.887Y25.279  
 N1800G02X17.067Y39.25I-  
 22.804J22.804  
 N1805G01X-17.067  
 N1810G02X-44.25Y16.062I-  
 31.017J8.833  
 N1815G01Y-16.062  
 N1820G02X-17.067Y-39.25I-  
 3.833J-32.021  
 N1825G01X17.067  
 N1830G02X61.147Y-  
 18.598I31.017J-8.833  
 N1835X98.853Y-39.75I8.853J-  
 28.402  
 N1840G01X130.655  
 N1845G02X134.25Y-  
 36.505I23.345J-22.25  
 N1850G01Y36.505  
 N1855G02X130.655Y39.75I19.75J  
 25.495  
 N1860G01X102.326  
 N1865Y54.75  
 N1870X83.784  
 N1875G02X69.649Y45.254I-  
 13.784J5.25  
 N1880G01X60.281Y35.886  
 N1885G02X31.973Y54.25I-  
 12.198J12.198  
 N1890G01X-31.973  
 N1895G02X-59.25Y34.935I-  
 16.11J-6.167

N1900G01Y-34.935  
 N1905G02X-31.973Y-  
 54.25I11.167J-13.148  
 N1910G01X31.973  
 N1915G02X60.281Y-  
 35.886I16.11J6.167  
 N1920G01X60.291Y-35.896  
 N1925G02X84.75Y-47.I9.709J-  
 11.104  
 N1930G01Y-54.75  
 N1935X138.348  
 N1940G02X149.25Y-  
 45.417I15.652J-7.25  
 N1945G01Y45.417  
 N1950G02X138.348Y54.75I4.75J1  
 6.583  
 N1955G01X102.326  
 N1960G00Z2.5  
 N1965G90G54X111.436Y-24.75  
 N1970Z-15.  
 N1975G01X119.25Z-  
 15.41F300.803  
 N1980Y24.75Z-18.004  
 N1985X100.24Z-19.  
 N1990G02X102.04Y-15.759I-  
 100.24J-24.75F601.606  
 N1995X108.827Y-24.75I-32.04J-  
 31.241  
 N2000G01X119.25  
 N2005Y24.75  
 N2010X100.24  
 N2015Y39.75  
 N2020X91.794  
 N2025G02X81.947Y32.754I-  
 21.794J20.25  
 N2030X85.555Y-21.641I-  
 81.947J-32.754  
 N2035X98.853Y-39.75I-15.555J-  
 25.359  
 N2040G01X130.655  
 N2045G02X134.25Y-  
 36.505I23.345J-22.25  
 N2050G01Y36.505  
 N2055G02X130.655Y39.75I19.75J  
 25.495  
 N2060G01X100.24  
 N2065Y54.75  
 N2070X83.784  
 N2075G02X69.649Y45.254I-  
 13.784J5.25  
 N2080G01X62.536Y38.141  
 N2085G02X65.403Y-32.985I-  
 62.536J-38.141  
 N2090X84.75Y-47.I4.597J-  
 14.015  
 N2095G01Y-54.75  
 N2100X138.348  
 N2105G02X149.25Y-  
 45.417I15.652J-7.25  
 N2110G01Y45.417  
 N2115G02X138.348Y54.75I4.75J1  
 6.583  
 N2120G01X100.24  
 N2125G00Z2.5  
 N2130G90G54X111.436Y-24.75  
 N2135Z-16.5  
 N2140G01X119.25Z-  
 16.91F300.803  
 N2145Y24.75Z-19.504  
 N2150X100.24Z-20.5  
 N2155G02X102.04Y-15.759I-  
 100.24J-24.75F601.606  
 N2160X108.827Y-24.75I-32.04J-  
 31.241  
 N2165G01X119.25  
 N2170Y24.75  
 N2175X100.24  
 N2180Y39.75  
 N2185X91.794  
 N2190G02X81.947Y32.754I-  
 21.794J20.25  
 N2195X85.555Y-21.641I-  
 81.947J-32.754  
 N2200X98.853Y-39.75I-15.555J-  
 25.359  
 N2205G01X130.655  
 N2210G02X134.25Y-  
 36.505I23.345J-22.25  
 N2215G01Y36.505  
 N2220G02X130.655Y39.75I19.75J  
 25.495  
 N2225G01X100.24  
 N2230Y54.75  
 N2235X83.784  
 N2240G02X69.649Y45.254I-  
 13.784J5.25  
 N2245G01X62.536Y38.141  
 N2250G02X65.403Y-32.985I-  
 62.536J-38.141  
 N2255X84.75Y-47.I4.597J-  
 14.015  
 N2260G01Y-54.75  
 N2265X138.348  
 N2270G02X149.25Y-  
 45.417I15.652J-7.25  
 N2275G01Y45.417  
 N2280G02X138.348Y54.75I4.75J1  
 6.583  
 N2285G01X100.24  
 N2290G00Z2.5  
 N2295G90G54X111.436Y-24.75  
 N2300Z-18.  
 N2305G01X119.25Z-  
 18.41F300.803  
 N2310Y24.75Z-21.004  
 N2315X100.24Z-22.  
 N2320G02X102.04Y-15.759I-  
 100.24J-24.75F601.606  
 N2325X108.827Y-24.75I-32.04J-  
 31.241  
 N2330G01X119.25  
 N2335Y24.75  
 N2340X100.24  
 N2345Y39.75  
 N2350X91.794  
 N2355G02X81.947Y32.754I-  
 21.794J20.25  
 N2360X85.555Y-21.641I-  
 81.947J-32.754  
 N2365X98.853Y-39.75I-15.555J-  
 25.359  
 N2370G01X130.655  
 N2375G02X134.25Y-  
 36.505I23.345J-22.25  
 N2380G01Y36.505  
 N2385G02X130.655Y39.75I19.75J  
 25.495  
 N2390G01X100.24  
 N2395Y54.75  
 N2400X83.784  
 N2405G02X69.649Y45.254I-  
 13.784J5.25  
 N2410G01X62.536Y38.141  
 N2415G02X65.403Y-32.985I-  
 62.536J-38.141  
 N2420X84.75Y-47.I4.597J-  
 14.015  
 N2425G01Y-54.75  
 N2430X138.348  
 N2435G02X149.25Y-  
 45.417I15.652J-7.25  
 N2440G01Y45.417  
 N2445G02X138.348Y54.75I4.75J1  
 6.583  
 N2450G01X100.24  
 N2455G00Z2.5  
 N2460G90G54X106.258Y-20.772  
 N2465Z-19.5  
 N2470G01X106.602Y-21.254Z-  
 19.531F300.803  
 N2475X106.939Y-21.74Z-19.562  
 N2480X107.27Y-22.231Z-19.593  
 N2485X107.595Y-22.727Z-19.624  
 N2490X107.913Y-23.226Z-19.655  
 N2495X108.224Y-23.73Z-19.686  
 N2500X108.529Y-24.238Z-19.717  
 N2505X108.827Y-24.75Z-19.748  
 N2510X114.859Z-20.064  
 N2515X114.933Y-24.161Z-20.096  
 N2520X115.014Y-23.573Z-20.127  
 N2525X115.103Y-22.986Z-20.158  
 N2530X115.2Y-22.401Z-20.189  
 N2535X115.305Y-21.817Z-20.22  
 N2540X115.417Y-21.234Z-20.251  
 N2545X115.537Y-20.653Z-20.282  
 N2550X115.653Y-20.073Z-20.313  
 N2555X115.8Y-19.495Z-20.344  
 N2560X115.944Y-18.919Z-20.375  
 N2565X116.094Y-18.345Z-20.407  
 N2570X116.253Y-17.773Z-20.438  
 N2575X116.419Y-17.203Z-20.469  
 N2580X116.592Y-16.636Z-20.5  
 N2585X116.773Y-16.07Z-20.531  
 N2590X116.962Y-15.508Z-20.562  
 N2595X117.158Y-14.947Z-20.593  
 N2600X117.361Y-14.39Z-20.624  
 N2605X117.572Y-13.835Z-20.655  
 N2610X117.79Y-13.283Z-20.687  
 N2615X118.015Y-12.734Z-20.718  
 N2620X118.248Y-12.188Z-20.749  
 N2625X118.488Y-11.645Z-20.78  
 N2630X118.735Y-11.105Z-20.811  
 N2635X118.989Y-10.569Z-20.842  
 N2640X119.25Y-10.036Z-20.873  
 N2645Y10.036Z-21.925  
 N2650X118.989Y10.569Z-21.956  
 N2655X118.735Y11.105Z-21.987  
 N2660X118.488Y11.645Z-22.018  
 N2665X118.248Y12.188Z-22.05  
 N2670X118.015Y12.734Z-22.081  
 N2675X117.79Y13.283Z-22.112  
 N2680X117.572Y13.835Z-22.143  
 N2685X117.361Y14.39Z-22.174  
 N2690X117.158Y14.947Z-22.205  
 N2695X116.962Y15.508Z-22.236  
 N2700X116.773Y16.07Z-22.267  
 N2705X116.592Y16.636Z-22.298  
 N2710X116.419Y17.203Z-22.329  
 N2715X116.253Y17.773Z-22.361  
 N2720X116.094Y18.345Z-22.392  
 N2725X115.944Y18.919Z-22.423  
 N2730X115.8Y19.495Z-22.454  
 N2735X115.665Y20.073Z-22.485  
 N2740X115.537Y20.653Z-22.516  
 N2745X115.417Y21.234Z-22.547  
 N2750X115.305Y21.817Z-22.578  
 N2755X115.2Y22.401Z-22.609  
 N2760X115.103Y22.986Z-22.641  
 N2765X115.014Y23.573Z-22.672  
 N2770X114.933Y24.161Z-22.703  
 N2775X114.859Y24.75Z-22.734  
 N2780X100.24Z-23.5  
 N2785G02X102.04Y-15.759I-  
 100.24J-24.75F601.606  
 N2790X108.827Y-24.75I-32.04J-  
 31.241  
 N2795G01X114.859  
 N2800G02X119.25Y-  
 10.036I44.441J-5.25  
 N2805G01Y10.036  
 N2810G02X114.859Y24.75I40.05J  
 19.964  
 N2815G01X100.24  
 N2820Y39.75  
 N2825X91.794  
 N2830G02X81.947Y32.754I-  
 21.794J20.25

N2835X85.555Y-21.641I-  
 81.947J-32.754  
 N2840X98.853Y-39.75I-15.555J-  
 25.359  
 N2845G01X130.655  
 N2850G02X131.054Y-  
 39.339I23.345J-22.25  
 N2855X134.25Y-  
 13.951I28.246J9.339  
 N2860G01Y13.951  
 N2865G02X131.054Y39.339I25.05  
 J16.049  
 N2870X130.655Y39.75I22.946J22  
 .661  
 N2875G01X100.24  
 N2880Y54.75  
 N2885X83.784  
 N2890G02X69.649Y45.254I-  
 13.784J5.25  
 N2895G01X62.536Y38.141  
 N2900G02X65.403Y-32.985I-  
 62.536J-38.141  
 N2905X84.75Y-47.14.597J-  
 14.015  
 N2910G01Y-54.75  
 N2915X138.348  
 N2920G02X149.25Y-  
 45.417I15.652J-7.25  
 N2925G01Y-40.796  
 N2930G02Y-19.204I10.05J10.796  
 N2935G01Y19.204  
 N2940G02Y40.796I10.05J10.796  
 N2945G01Y45.417  
 N2950G02X138.348Y54.75I4.75J1  
 6.583  
 N2955G01X100.24  
 N2960G00Z2.5  
 N2965G90G54X116.593Y-16.634  
 N2970Z-21.  
 N2975G01X116.774Y-16.069Z-  
 21.031F300.803  
 N2980X116.962Y-15.506Z-21.062  
 N2985X117.158Y-14.946Z-21.093  
 N2990X117.361Y-14.389Z-21.124  
 N2995X117.572Y-13.834Z-21.155  
 N3000X117.79Y-13.282Z-21.187  
 N3005X118.015Y-12.733Z-21.218  
 N3010X118.248Y-12.187Z-21.249  
 N3015X118.488Y-11.645Z-21.28  
 N3020X118.735Y-11.105Z-21.311  
 N3025X118.989Y-10.569Z-21.342  
 N3030X119.25Y-10.036Z-21.373  
 N3035Y10.036Z-22.425  
 N3040X118.989Y10.569Z-22.456  
 N3045X118.735Y11.105Z-22.487  
 N3050X118.488Y11.645Z-22.518  
 N3055X118.248Y12.188Z-22.55  
 N3060X118.015Y12.734Z-22.581  
 N3065X117.79Y13.283Z-22.612  
 N3070X117.572Y13.835Z-22.643  
 N3075X117.361Y14.39Z-22.674  
 N3080X117.158Y14.947Z-22.705  
 N3085X116.962Y15.508Z-22.736  
 N3090X116.773Y16.07Z-22.767  
 N3095X116.592Y16.636Z-22.798  
 N3100X116.419Y17.203Z-22.829  
 N3105X116.253Y17.773Z-22.861  
 N3110X116.094Y18.345Z-22.892  
 N3115X115.944Y18.919Z-22.923  
 N3120X115.8Y19.495Z-22.954  
 N3125X115.665Y20.073Z-22.985  
 N3130X115.537Y20.653Z-23.016  
 N3135X115.417Y21.234Z-23.047  
 N3140X115.305Y21.817Z-23.078  
 N3145X115.2Y22.401Z-23.109  
 N3150X115.103Y22.986Z-23.141  
 N3155X115.014Y23.573Z-23.172  
 N3160X114.933Y24.161Z-23.203  
 N3165X114.859Y24.75Z-23.234  
 N3170X100.24Z-24.  
 N3175G02X102.04Y-15.759I-  
 100.24J-24.75F601.606  
 N3180X108.827Y-24.75I-32.04J-  
 31.241  
 N3185G01X114.859  
 N3190G02X119.25Y-  
 10.036I44.441J-5.25  
 N3195G01Y10.036  
 N3200G02X114.859Y24.75I40.05J  
 19.964  
 N3205G01X100.24  
 N3210Y39.75  
 N3215X91.794  
 N3220G02X81.947Y32.754I-  
 21.794J20.25  
 N3225X85.555Y-21.641I-  
 81.947J-32.754  
 N3230X98.853Y-39.75I-15.555J-  
 25.359  
 N3235G01X130.655  
 N3240G02X131.054Y-  
 39.339I23.345J-22.25  
 N3245X134.25Y-  
 13.951I28.246J9.339  
 N3250G01Y13.951  
 N3255G02X131.054Y39.339I25.05  
 J16.049  
 N3260X130.655Y39.75I22.946J22  
 .661  
 N3265G01X100.24  
 N3270Y54.75  
 N3275X83.784  
 N3280G02X69.649Y45.254I-  
 13.784J5.25  
 N3285G01X62.536Y38.141  
 N3290G02X65.403Y-32.985I-  
 62.536J-38.141  
 N3295X84.75Y-47.14.597J-  
 14.015  
 N3300G01Y-54.75  
 N3305X138.348  
 N3310G02X149.25Y-  
 45.417I15.652J-7.25  
 N3315G01Y-40.796  
 N3320G02Y-19.204I10.05J10.796  
 N3325G01Y19.204  
 N3330G02Y40.796I10.05J10.796  
 N3335G01Y45.417  
 N3340G02X138.348Y54.75I4.75J1  
 6.583  
 N3345G01X100.24  
 N3350G00Z2.5  
 N3355G90G54X125.369Y-3.938  
 N3360Z-21.5  
 N3365G01X125.308Y-3.469Z-  
 21.525F300.803  
 N3370X125.256Y-2.999Z-21.55  
 N3375X125.21Y-2.529Z-21.574  
 N3380X125.173Y-2.057Z-21.599  
 N3385X125.143Y-1.585Z-21.624  
 N3390X125.121Y-1.113Z-21.649  
 N3395X125.107Y-.641Z-21.673  
 N3400X125.1Y-.168Z-21.698  
 N3405X125.102Y.305Z-21.723  
 N3410X125.11Y.778Z-21.748  
 N3415X125.127Y1.25Z-21.773  
 N3420X125.151Y1.722Z-21.797  
 N3425X125.183Y2.194Z-21.822  
 N3430X125.223Y2.665Z-21.847  
 N3435X125.27Y3.135Z-21.872  
 N3440X125.325Y3.605Z-21.896  
 N3445X125.388Y4.074Z-21.921  
 N3450X125.458Y4.541Z-21.946  
 N3455X125.536Y5.008Z-21.971  
 N3460X125.621Y5.473Z-21.996  
 N3465X125.714Y5.936Z-22.02  
 N3470X125.815Y6.398Z-22.045  
 N3475X125.923Y6.858Z-22.07  
 N3480X126.038Y7.317Z-22.095  
 N3485X126.161Y7.773Z-22.119  
 N3490X126.292Y8.228Z-22.144  
 N3495X126.429Y8.68Z-22.169  
 N3500X126.575Y9.13Z-22.194  
 N3505X126.727Y9.577Z-22.219  
 N3510X126.887Y10.022Z-22.243  
 N3515X127.054Y10.465Z-22.268  
 N3520X127.228Y10.904Z-22.293  
 N3525X127.409Y11.341Z-22.318  
 N3530X127.598Y11.774Z-22.342  
 N3535X127.793Y12.205Z-22.367  
 N3540X127.996Y12.632Z-22.392  
 N3545X128.205Y13.056Z-22.417  
 N3550X128.421Y13.476Z-22.442  
 N3555X128.645Y13.893Z-22.466  
 N3560X128.874Y14.306Z-22.491  
 N3565X129.111Y14.716Z-22.516  
 N3570X129.354Y15.121Z-22.541  
 N3575X129.604Y15.522Z-22.565  
 N3580X129.86Y15.92Z-22.59  
 N3585X130.123Y16.313Z-22.615  
 N3590X130.392Y16.701Z-22.64  
 N3595X130.668Y17.086Z-22.665  
 N3600X130.949Y17.465Z-22.689  
 N3605X131.237Y17.84Z-22.714  
 N3610X131.531Y18.211Z-22.739  
 N3615X131.831Y18.576Z-22.764  
 N3620X131.655Y19.007Z-22.788  
 N3625X131.487Y19.441Z-22.812  
 N3630X131.325Y19.877Z-22.837  
 N3635X131.17Y20.316Z-22.861  
 N3640X131.022Y20.757Z-22.886  
 N3645X130.881Y21.2Z-22.91  
 N3650X130.747Y21.645Z-22.934  
 N3655X130.62Y22.093Z-22.959  
 N3660X130.5Y22.542Z-22.983  
 N3665X130.387Y22.994Z-23.007  
 N3670X130.281Y23.447Z-23.032  
 N3675X130.182Y23.901Z-23.056  
 N3680X129.92Y24.29Z-23.081  
 N3685X129.664Y24.683Z-23.105  
 N3690X129.415Y25.08Z-23.13  
 N3695X129.172Y25.481Z-23.154  
 N3700X128.936Y25.886Z-23.179  
 N3705X128.706Y26.295Z-23.204  
 N3710X128.483Y26.707Z-23.228  
 N3715X128.266Y27.123Z-23.253  
 N3720X128.057Y27.543Z-23.277  
 N3725X127.854Y27.965Z-23.302  
 N3730X127.658Y28.391Z-23.327  
 N3735X127.469Y28.82Z-23.351  
 N3740X127.287Y29.252Z-23.376  
 N3745X127.112Y29.687Z-23.4  
 N3750X126.944Y30.125Z-23.425  
 N3755X126.783Y30.565Z-23.449  
 N3760X126.629Y31.008Z-23.474  
 N3765X126.482Y31.454Z-23.499  
 N3770X126.343Y31.901Z-23.523  
 N3775X126.211Y32.351Z-23.548  
 N3780X126.086Y32.803Z-23.572  
 N3785X125.968Y33.257Z-23.597  
 N3790X125.858Y33.713Z-23.621  
 N3795X125.755Y34.17Z-23.646  
 N3800X125.66Y34.629Z-23.671  
 N3805X125.572Y35.09Z-23.695  
 N3810X125.491Y35.552Z-23.72  
 N3815X125.418Y36.015Z-23.744  
 N3820X125.353Y36.479Z-23.769  
 N3825X125.295Y36.944Z-23.793  
 N3830X125.244Y37.41Z-23.818  
 N3835X125.201Y37.877Z-23.843  
 N3840X125.166Y38.345Z-23.867  
 N3845X125.138Y38.813Z-23.892  
 N3850X125.118Y39.281Z-23.916  
 N3855X125.105Y39.75Z-23.941  
 N3860X104.895Z-25.  
 N3865G02X96.756Y20.15I-  
 28.995J.55F601.606  
 N3870X97.678Y-19.15I-20.856J-  
 20.15

N3875X104.864Y-39.75I-  
21.778J-19.15  
N3880G01X125.136  
N3885G02X131.033Y-  
20.724I28.964J1.45  
N3890X131.831Y-  
18.576I28.267J-9.276  
N3895Y18.576I22.269J18.576  
N3900X130.182Y23.901I27.469J1  
1.424  
N3905X125.105Y39.75I23.918J16  
.399  
N3910G01X104.895  
N3915Y54.75  
N3920X83.784  
N3925G02X82.717Y52.528I-  
13.784J5.25  
N3930X67.078Y29.429I-6.817J-  
12.228  
N3935X72.005Y13.447I-67.078J-  
29.429  
N3940Y-13.447I3.895J-13.447  
N3945X68.263Y-26.567I-  
72.005J13.447  
N3950X84.75Y-49.148I7.637J-  
11.733  
N3955G01Y-54.75  
N3960X138.348  
N3965G02X143.971Y-  
47.965I15.652J-7.25  
N3970X144.696Y-  
27.928I10.129J9.665  
N3975X149.25Y-19.204I14.604J-  
2.072  
N3980G01Y-13.133  
N3985G02Y13.133I4.85J13.133  
N3990G01Y19.204  
N3995G02X144.55Y30.I10.05J10.  
796  
N4000G01Y30.063  
N4005G02X142.944Y48.759I9.55J  
10.237  
N4010X138.348Y54.75I11.056J13  
.241  
N4015G01X104.895  
N4020G00Z2.5  
N4025G90G54X128.182Y-13.009  
N4030Z-22.5  
N4035G01X127.97Y-12.578Z-  
22.525F300.803  
N4040X127.765Y-12.143Z-22.55  
N4045X127.567Y-11.705Z-22.576  
N4050X127.377Y-11.263Z-22.601  
N4055X127.194Y-10.819Z-22.626  
N4060X127.018Y-10.371Z-22.651  
N4065X126.85Y-9.921Z-22.676  
N4070X126.689Y-9.468Z-22.702  
N4075X126.536Y-9.012Z-22.727  
N4080X126.39Y-8.554Z-22.752  
N4085X126.252Y-8.093Z-22.777  
N4090X126.122Y-7.631Z-22.802  
N4095X125.999Y-7.166Z-22.828  
N4100X125.884Y-6.699Z-22.853  
N4105X125.777Y-6.23Z-22.878  
N4110X125.678Y-5.76Z-22.903  
N4115X125.586Y-5.288Z-22.928  
N4120X125.502Y-4.815Z-22.954  
N4125X125.427Y-4.34Z-22.979  
N4130X125.359Y-3.864Z-23.004  
N4135X125.298Y-3.387Z-23.029  
N4140X125.246Y-2.909Z-23.054  
N4145X125.202Y-2.431Z-23.079  
N4150X125.166Y-1.951Z-23.105  
N4155X125.137Y-1.471Z-23.13  
N4160X125.117Y-.991Z-23.155  
N4165X125.104Y-.51Z-23.18  
N4170X125.1Y-.03Z-23.205  
N4175X125.104Y.451Z-23.231  
N4180X125.115Y.932Z-23.256  
N4185X125.134Y1.412Z-23.281  
N4190X125.162Y1.892Z-23.306  
N4195X125.197Y2.371Z-23.331  
N4200X125.24Y2.85Z-23.357  
N4205X125.292Y3.328Z-23.382  
N4210X125.351Y3.805Z-23.407  
N4215X125.418Y4.281Z-23.432  
N4220X125.493Y4.756Z-23.457  
N4225X125.575Y5.23Z-23.483  
N4230X125.666Y5.702Z-23.508  
N4235X125.764Y6.172Z-23.533  
N4240X125.871Y6.641Z-23.558  
N4245X125.985Y7.108Z-23.583  
N4250X126.106Y7.573Z-23.609  
N4255X126.236Y8.036Z-23.634  
N4260X126.373Y8.497Z-23.659  
N4265X126.517Y8.956Z-23.684  
N4270X126.67Y9.412Z-23.709  
N4275X126.829Y9.865Z-23.735  
N4280X126.997Y10.316Z-23.76  
N4285X127.171Y10.764Z-23.785  
N4290X127.354Y11.209Z-23.81  
N4295X127.543Y11.65Z-23.835  
N4300X127.74Y12.089Z-23.861  
N4305X127.944Y12.524Z-23.886  
N4310X128.155Y12.956Z-23.911  
N4315X128.373Y13.384Z-23.936  
N4320X128.599Y13.809Z-23.961  
N4325X128.831Y14.23Z-23.986  
N4330X129.071Y14.647Z-24.012  
N4335X129.317Y15.06Z-24.037  
N4340X129.57Y15.468Z-24.062  
N4345X129.83Y15.873Z-24.087  
N4350X130.096Y16.273Z-24.112  
N4355X130.369Y16.669Z-24.138  
N4360X130.649Y17.06Z-24.163  
N4365X130.935Y17.446Z-24.188  
N4370X131.227Y17.828Z-24.213  
N4375X131.526Y18.205Z-24.238  
N4380X131.831Y18.576Z-24.264  
N4385X131.655Y19.007Z-24.288  
N4390X131.487Y19.441Z-24.312  
N4395X131.325Y19.877Z-24.337  
N4400X131.17Y20.316Z-24.361  
N4405X131.022Y20.757Z-24.386  
N4410X130.881Y21.2Z-24.41  
N4415X130.747Y21.645Z-24.434  
N4420X130.62Y22.093Z-24.459  
N4425X130.5Y22.542Z-24.483  
N4430X130.387Y22.994Z-24.507  
N4435X130.281Y23.447Z-24.532  
N4440X130.182Y23.901Z-24.556  
N4445X129.92Y24.29Z-24.581  
N4450X129.664Y24.683Z-24.605  
N4455X129.415Y25.08Z-24.63  
N4460X129.172Y25.481Z-24.654  
N4465X128.936Y25.886Z-24.679  
N4470X128.706Y26.295Z-24.704  
N4475X128.483Y26.707Z-24.728  
N4480X128.266Y27.123Z-24.753  
N4485X128.057Y27.543Z-24.777  
N4490X127.854Y27.965Z-24.802  
N4495X127.658Y28.391Z-24.827  
N4500X127.469Y28.82Z-24.851  
N4505X127.287Y29.252Z-24.876  
N4510X127.112Y29.687Z-24.9  
N4515X126.944Y30.125Z-24.925  
N4520X126.783Y30.565Z-24.949  
N4525X126.629Y31.008Z-24.974  
N4530X126.482Y31.454Z-24.999  
N4535X126.343Y31.901Z-25.023  
N4540X126.211Y32.35Z-25.048  
N4545X126.086Y32.803Z-25.072  
N4550X125.968Y33.257Z-25.097  
N4555X125.858Y33.713Z-25.121  
N4560X125.755Y34.17Z-25.146  
N4565X125.66Y34.629Z-25.171  
N4570X125.572Y35.09Z-25.195  
N4575X125.491Y35.552Z-25.22  
N4580X125.418Y36.015Z-25.244  
N4585X125.353Y36.479Z-25.269  
N4590X125.295Y36.944Z-25.293  
N4595X125.244Y37.41Z-25.318  
N4600X125.201Y37.877Z-25.343  
N4605X125.166Y38.345Z-25.367  
N4610X125.138Y38.813Z-25.392  
N4615X125.118Y39.281Z-25.416  
N4620X125.105Y39.75Z-25.441  
N4625X104.895Z-26.5  
N4630G02X97.4Y20.838I-  
28.995J.55F601.606  
N4635G01Y19.462  
N4640G02X97.678Y-19.15I-  
21.5J-19.462  
N4645X104.864Y-39.75I-  
21.778J-19.15  
N4650G01X125.136  
N4655G02X131.033Y-  
20.724I28.964J1.45  
N4660X131.831Y-  
18.576I28.267J-9.276  
N4665Y18.576I22.269J18.576  
N4670X130.182Y23.901I27.469J1  
1.424  
N4675X125.105Y39.75I23.918J16  
.399  
N4680G01X104.895  
N4685Y54.75  
N4690X84.75  
N4695Y51.148  
N4700G02X82.4Y27.9I-8.85J-  
10.848  
N4705G01Y12.4  
N4710G02Y-12.4I-6.5J-12.4  
N4715G01Y-25.9  
N4720G02X84.75Y-49.148I-6.5J-  
12.4  
N4725G01Y-54.75  
N4730X138.348  
N4735G02X143.971Y-  
47.965I15.652J-7.25  
N4740X144.696Y-  
27.928I10.129J9.665  
N4745X149.25Y-19.204I14.604J-  
2.072  
N4750G01Y-13.133  
N4755G02Y13.133I4.85J13.133  
N4760G01Y19.204  
N4765G02X144.55Y30.I10.05J10.  
796  
N4770G01Y30.063  
N4775G02X142.944Y48.759I9.55J  
10.237  
N4780X138.348Y54.75I11.056J13  
.241  
N4785G01X104.895  
N4790G00Z2.5  
N4795G90G54X128.182Y-13.009  
N4800Z-24.  
N4805G01X127.97Y-12.578Z-  
24.025F300.803  
N4810X127.765Y-12.143Z-24.05  
N4815X127.567Y-11.705Z-24.076  
N4820X127.377Y-11.263Z-24.101  
N4825X127.194Y-10.819Z-24.126  
N4830X127.018Y-10.371Z-24.151  
N4835X126.85Y-9.921Z-24.176  
N4840X126.689Y-9.468Z-24.202  
N4845X126.536Y-9.012Z-24.227  
N4850X126.39Y-8.554Z-24.252  
N4855X126.252Y-8.093Z-24.277  
N4860X126.122Y-7.631Z-24.302  
N4865X125.999Y-7.166Z-24.328  
N4870X125.884Y-6.699Z-24.353  
N4875X125.777Y-6.23Z-24.378  
N4880X125.678Y-5.76Z-24.403  
N4885X125.586Y-5.288Z-24.428  
N4890X125.502Y-4.815Z-24.454  
N4895X125.427Y-4.34Z-24.479  
N4900X125.359Y-3.864Z-24.504  
N4905X125.298Y-3.387Z-24.529

N4910X125.246Y-2.909Z-24.554  
N4915X125.202Y-2.431Z-24.579  
N4920X125.166Y-1.951Z-24.605  
N4925X125.137Y-1.471Z-24.63  
N4930X125.117Y-.991Z-24.655  
N4935X125.104Y-.51Z-24.68  
N4940X125.1Y-.03Z-24.705  
N4945X125.104Y.451Z-24.731  
N4950X125.115Y.932Z-24.756  
N4955X125.134Y1.412Z-24.781  
N4960X125.162Y1.892Z-24.806  
N4965X125.197Y2.371Z-24.831  
N4970X125.24Y2.85Z-24.857  
N4975X125.292Y3.328Z-24.882  
N4980X125.351Y3.805Z-24.907  
N4985X125.418Y4.281Z-24.932  
N4990X125.493Y4.756Z-24.957  
N4995X125.575Y5.23Z-24.983  
N5000X125.666Y5.702Z-25.008  
N5005X125.764Y6.172Z-25.033  
N5010X125.871Y6.641Z-25.058  
N5015X125.985Y7.108Z-25.083  
N5020X126.106Y7.573Z-25.109  
N5025X126.236Y8.036Z-25.134  
N5030X126.373Y8.497Z-25.159  
N5035X126.517Y8.956Z-25.184  
N5040X126.67Y9.412Z-25.209  
N5045X126.829Y9.865Z-25.235  
N5050X126.997Y10.316Z-25.26  
N5055X127.171Y10.764Z-25.285  
N5060X127.354Y11.209Z-25.31  
N5065X127.543Y11.65Z-25.335  
N5070X127.74Y12.089Z-25.361  
N5075X127.944Y12.524Z-25.386  
N5080X128.155Y12.956Z-25.411  
N5085X128.373Y13.384Z-25.436  
N5090X128.599Y13.809Z-25.461  
N5095X128.831Y14.23Z-25.486  
N5100X129.071Y14.647Z-25.512  
N5105X129.317Y15.06Z-25.537  
N5110X129.57Y15.468Z-25.562  
N5115X129.83Y15.873Z-25.587  
N5120X130.096Y16.273Z-25.612  
N5125X130.369Y16.669Z-25.638  
N5130X130.649Y17.06Z-25.663  
N5135X130.935Y17.446Z-25.688  
N5140X131.227Y17.828Z-25.713  
N5145X131.526Y18.205Z-25.738  
N5150X131.831Y18.576Z-25.764  
N5155X131.655Y19.007Z-25.788  
N5160X131.487Y19.441Z-25.812  
N5165X131.325Y19.877Z-25.837  
N5170X131.17Y20.316Z-25.861  
N5175X131.022Y20.757Z-25.886  
N5180X130.881Y21.2Z-25.91  
N5185X130.747Y21.645Z-25.934  
N5190X130.62Y22.093Z-25.959  
N5195X130.5Y22.542Z-25.983  
N5200X130.387Y22.994Z-26.007  
N5205X130.281Y23.447Z-26.032  
N5210X130.182Y23.901Z-26.056  
N5215X129.92Y24.29Z-26.081  
N5220X129.664Y24.683Z-26.105  
N5225X129.415Y25.08Z-26.13  
N5230X129.172Y25.481Z-26.154  
N5235X128.936Y25.886Z-26.179  
N5240X128.706Y26.295Z-26.204  
N5245X128.483Y26.707Z-26.228  
N5250X128.266Y27.123Z-26.253  
N5255X128.057Y27.543Z-26.277  
N5260X127.854Y27.965Z-26.302  
N5265X127.658Y28.391Z-26.327  
N5270X127.469Y28.82Z-26.351  
N5275X127.287Y29.252Z-26.376  
N5280X127.112Y29.687Z-26.4  
N5285X126.944Y30.125Z-26.425  
N5290X126.783Y30.565Z-26.449  
N5295X126.629Y31.008Z-26.474  
N5300X126.482Y31.454Z-26.499  
N5305X126.343Y31.901Z-26.523  
N5310X126.211Y32.351Z-26.548  
N5315X126.086Y32.803Z-26.572  
N5320X125.968Y33.257Z-26.597  
N5325X125.858Y33.713Z-26.621  
N5330X125.755Y34.17Z-26.646  
N5335X125.66Y34.629Z-26.671  
N5340X125.572Y35.09Z-26.695  
N5345X125.491Y35.552Z-26.72  
N5350X125.418Y36.015Z-26.744  
N5355X125.353Y36.479Z-26.769  
N5360X125.295Y36.944Z-26.793  
N5365X125.244Y37.41Z-26.818  
N5370X125.201Y37.877Z-26.843  
N5375X125.166Y38.345Z-26.867  
N5380X125.138Y38.813Z-26.892  
N5385X125.118Y39.281Z-26.916  
N5390X125.105Y39.75Z-26.941  
N5395X104.895Z-28.  
N5400G02X97.4Y20.838I-  
28.995J.55F601.606  
N5405G01Y19.462  
N5410G02X97.678Y-19.15I-  
21.5J-19.462  
N5415X104.864Y-39.75I-  
21.778J-19.15  
N5420G01X125.136  
N5425G02X131.033Y-  
20.724I28.964J1.45  
N5430X131.831Y-  
18.576I28.267J-9.276  
N5435Y18.576I22.269J18.576  
N5440X130.182Y23.901I27.469J1.  
424  
N5445X125.105Y39.75I23.918J16.  
399  
N5450G01X104.895  
N5455Y54.75  
N5460X84.75  
N5465Y51.148  
N5470G02X82.4Y27.9I-8.85J-  
10.848  
N5475G01Y12.4  
N5480G02Y-12.4I-6.5J-12.4  
N5485G01Y-25.9  
N5490G02X84.75Y-49.148I-6.5J-  
12.4  
N5495G01Y-54.75  
N5500X138.348  
N5505G02X143.971Y-  
47.965I15.652J-7.25  
N5510X144.696Y-  
27.928I10.129J9.665  
N5515X149.25Y-19.204I14.604J-  
2.072  
N5520G01Y-13.133  
N5525G02Y13.133I4.85J13.133  
N5530G01Y19.204  
N5535G02X144.55Y30.110.05J10.  
796  
N5540G01Y30.063  
N5545G02X142.944Y48.759I9.55J  
10.237