

# Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы

УДК 621.396; 621.8

## ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗМЕЩЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ РЭС НА ОСНОВЕ МНОГОУРОВНЕВОЙ ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

*А.К. Гришко*

Пензенский государственный университет  
Россия, 440026, г. Пенза, ул. Красная, 40

E-mail: alexey-grishko@rambler.ru

*При проектировании печатного узла одной из важных задач, от которой зависит надежность и работоспособность изделия, является оптимальное размещение элементов на заданной площади. При этом необходимо учитывать целый комплекс взаимосвязанных параметров, таких как устойчивость элемента к механическим нагрузкам, тепловыделение, электромагнитная совместимость. В отличие от задачи трассировки межэлементных соединений, для которой существуют известные, апробированные решения, для задачи размещения элементов нет решений, которые учитывали бы комплекс вышеуказанных параметров. В работе рассматривается модель комплексного учета внешних воздействий на элементы конструкций радиоэлектронных средств для задачи определения оптимальной компоновки элементов на печатном узле. Предлагается многослойная геоинформационная модель, учитывающая тепловые, механические и СВЧ-воздействия. Описывается алгоритм, позволяющий получить оптимальную по выбранным критериям компоновку печатного узла.*

**Ключевые слова:** печатный узел, оптимизация, механические воздействия, тепловые воздействия, СВЧ, математическое моделирование.

Темпы развития современной техники, особенно для ответственных применений, вынуждают разработчиков проектировать и производить РЭС в достаточно короткие сроки. При этом для РЭС, использующихся на подвижных объектах, необходимо проводить большой комплекс испытаний при различных видах воздействий (удары, вибрации, нагрев и многое другое) [1]. На это уходят большие ресурсы, как материальные, так и временные, что сказывается на сроках разработки и конечной цене изделия.

Наиболее эффективно применение средств информационного взаимодействия на начальных этапах разработки [2, 3], когда происходит выбор альтернативных вариантов исполнения изделия, подбор параметров конструкции и т. п. В этом случае существенно возрастает значение проектных исследований, причем важную роль играет совершенство методов анализа.

---

*Алексей Константинович Гришко (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Конструирование и производство радиоэлектронной аппаратуры».*

При проектировании печатного узла одной из важных задач, от которой зависит надежность и работоспособность изделия, является оптимальное размещение элементов на заданной площади. При этом конструктор должен учитывать целый комплекс взаимосвязанных параметров, таких как устойчивость элемента к механическим нагрузкам, тепловыделение, электромагнитная совместимость. В отличие от задачи трассировки межэлементных соединений, для которой существуют известные, апробированные решения, для задачи размещения элементов нет решений, которые учитывали бы комплекс вышеуказанных параметров.

Следует отметить, что в ряде случаев размещение элементов на плате уже определяется параметрами конструктива вышестоящего уровня (расположение разъемов, радиаторов, антенных модулей и т. д.). При этом оставшиеся элементы также могут и должны быть размещены на плате оптимальным образом для получения максимальной надежности печатного узла.

Математическое моделирование позволяет проводить исследование на ранних этапах проектирования [4] и дает хороший эффект, поскольку появляется возможность проведения проектных исследований без использования макетов и опытных образцов, возможность использования аппарата имитации для воспроизведения на ЭВМ функционирования проектируемых объектов с помощью системы математических моделей.

### **Постановка задачи и цели**

В данной работе предлагается концептуальная модель изделия, на основе которой создается методика оптимального размещения элементов на печатном узле.

По результатам анализа было выявлено 3 группы факторов, которые необходимо учесть при построении концептуальной модели. Это механические параметры, тепловые параметры и параметры электромагнитной совместимости.

Так как печатный узел устанавливается внутри блока с различными видами креплений (четырёхточечное, пятиточечное и др.), то необходимо оценить предварительную картину механических воздействий на печатный узел. Для этого проводится анализ блока с применением средств САЕ и определяются воздействия в точках крепления печатного узла. Далее проводится анализ пластины без элементов и получение резонансных частот данной пластины.

Для этапа теплового анализа печатного узла проводится построение внутриблочного теплового поля с учетом допустимых по техническому заданию воздействий, в том числе термоударов [5, 6]. Эта предварительная картина используется для дальнейшей оптимизации размещения элементов.

В методике предлагается ввести этап предварительного анализа, который позволяет оценить начальные условия и необходимость более глубокого моделирования с применением различных методов оптимизации, в частности градиентной [7, 9].

К числу основных функций, реализуемых в процессе проектирования с помощью модели, относятся оптимизации объекта проектирования, например узла на печатной плате. Решение подобных задач вызывает серьезные математические и технические трудности, связанные с большой размерностью задач и отсутствием аналитических зависимостей. Но можно использовать некоторые факторы, упрощающие постановку задачи и определяющие системный подход к решению поставленной проблемы.

В задачах проектирования РЭС во многих случаях нет необходимости поиска глобального оптимума: во-первых, вектор переменных проектирования, доставляющий глобальный минимум функционалу, может соответствовать неоправданному с технической точки зрения решению; во-вторых, в ряде случаев глобальный минимум может иметь узкий «овраг», в результате чего возникает опасность неустойчивого состояния объекта при отклонении переменных проектирования.

В большинстве практических случаев конструктор обычно не располагает широким выбором вариантов. При проектировании нестационарных РЭС часто применяется система базовых несущих конструкций, определенная нормативно-технической документацией соответствующей отрасли. Поэтому в данном случае исходный вариант конструкции, как правило, известен и оптимизация сводится к выбору или улучшению некоторых ее параметров [1, 8].

Задача оптимального проектирования сводится к нахождению вектора переменных проектирования  $\{b\}$  из множества допустимых векторов, доставляющего экстремум функционалу при заданном векторе возмущений  $\{\xi\}$  и заданных ограничениях [4, 8, 9]. В общем случае целевая функция (функционал) должна охватывать все сферы жизненного цикла изделия [2, 4]. Для электронной аппаратуры выбор целевой функции осложняется тем, что не всегда очевидна взаимосвязь между многими важными параметрами конструкции. Для оценки эффективности конструкции РЭС необходимы конкретные целевые функции, пригодные для широкого класса конструкций.

Выбор целевой функции можно обосновать следующими положениями. Во-первых, в каждой задаче оптимизации должна быть только одна целевая функция. Корректность задачи не нарушается при введении ограничений на отдельные компоненты целевой функции [9, 10]. Во-вторых, общую композицию целевой функции следует выбирать аддитивной, принимая гипотезу о линейном характере взаимосвязи ее компонентов (стоимости материалов и выполненных работ).

Учитывая, что все основные показатели производства имеют денежное выражение, стоимость объекта в целом можно выбирать в качестве основного компонента целевой функции.

Во многих задачах оптимального проектирования нестационарной аппаратуры в качестве целевой функции выбирается масса конструкции.

Выбор ограничений определяется техническими требованиями, условиями эксплуатации, предельными параметрами применяемых материалов.

В условия задачи должны быть включены ограничения на размеры, предельные значения потенциальных функций (перемещений, температуры), ускорений (перегрузок), функций потока (деформаций, напряжений).

В число условий включаются также уравнения состояния моделей следующего вида:  $F(u, \dot{u}, \ddot{u}, \xi) = 0$  или  $F(T, \dot{T}, b, \xi) = 0$ , где  $u$  – перемещение,  $T$  – температура.

Система уравнений состояния является основой для моделирования физических процессов, по результатам которого производится проверка ограничений и выбор новых значений переменных проектирования.

В большинстве практических случаев задача сводится к улучшению параметров конструкции по сравнению с базовым вариантом. Целенаправленный поиск путей улучшения параметров осуществляется посредством моделирования.

### **Описание предмета исследования**

В общем объеме разнообразной РЭА конструкционные модули первого уровня (печатные узлы, микросборки) составляют не менее 70–85 % структурных элементов. Следует отметить, что защиту от внешних механических и климатических дестабилизирующих факторов осуществляют конструкции второго и третьего уровня, оборудованные системами виброизоляции и поддержания необходимого температурного режима. Но несмотря на это на элементы конструкции первого уровня действуют передаваемые через амортизаторы вибрационные и ударные нагрузки, и необходимо выяснить, какие из этих элементов могут выйти из строя под действием этих факторов. Поэтому можно считать, что именно они и должны рассматриваться как основные объекты, для которых в первую очередь и необходимо определять их функциональные характеристики и решать задачу комплексного моделирования.

Предметом исследования является комплексная модель печатного узла, учитывающая результаты теплового, механического и электромагнитного моделирования. Модель используется для получения рекомендаций по оптимальной компоновке элементов на печатном узле с учетом динамического критерия оптимальности.

### **Полученные результаты**

В результате исследований предложена комплексная модель печатного узла, объединяющая результаты теплового, механического и высокочастотного моделирования.

На основе такой многоуровневой модели разработана методология автоинтерактивного процесса компоновки печатного узла РЭС на ранних этапах проектирования, позволяющая на основе разработанных программных комплексов по расчету механических, тепловых и СВЧ-характеристик проводить обоснованный и целенаправленный синтез конструкций печатного узла, отвечающий требованиям ТЗ по механическим и тепловым ограничениям [11, 12].

Центральным звеном методологии являются разработанные методики расчета механических, тепловых и СВЧ-характеристик печатных узлов РЭС, позволяющие получить температурное поле печатного узла, поле перемещений (собственная форма), напряжений и ускорений, излучаемую СВЧ-мощность [2].

Алгоритм компоновки узла состоит в следующем.

1-й этап. На основе технического задания, эскизов, спецификации и перечня элементов готовятся исходные данные (подготовка геометрической модели).

2-й этап. Предварительный механический анализ печатной платы. Выполняется механический анализ пластины без элементов для определения резонансных частот и рекомендуемого варианта закрепления [11].

3-й этап. Предварительный тепловой анализ внутриблочного теплового поля. На его основе производится определение зон для расположения наиболее критичных к температуре элементов [5].

4-й этап. Предварительный тепловой анализ внутриблочного электромагнитного поля с точки зрения возможности выполнения условий технического задания теплового поля [6, 13]. На его основе производится уточнение зон для расположения наиболее критичных к температуре элементов.

5-й этап. На основе автоматизированного анализа данных технического задания определяются приоритеты выполнения операции компоновки на основе

данных со 2-го по 4-й этапы. На его основе производится уточнение зон для расположения наиболее критичных к температуре элементов.

6-й этап. Оптимальное размещение элементов на основе многокритериальной оптимизации в последовательности, определенной на 5-м этапе.

7-й этап. Определение необходимости повторного выполнения оптимизации.

Данная методика позволяет получить в интерактивном варианте конструирования оптимальный вариант компоновки печатного узла вследствие целенаправленного учета механических, тепловых и СВЧ-характеристик.

Предложенная методика автоматизированного определения приоритетов при решении задачи оптимизации позволяет гибко управлять процессом оптимизации в соответствии с требованиями технического задания и конкретными конструктивными ограничениями.

### **Заключение**

Цель комплексного учета внешних воздействий на элементы конструкций радиоэлектронных средств – многокритериальное принятие решений в условиях риска на основе интеграции мультиагентного, имитационного, эволюционного моделирования и численных методов для плохо обусловленных систем линейных уравнений большой размерности с целью учета влияния внешних факторов на работу РЭС.

Для решения данной проблемы требуется создание математической модели проблемы принятия управленческих решений на основе интеграции методов мультиагентного, имитационного, эволюционного моделирования и численных методов.

Далее задача оптимального проектирования сводится к оптимизации модели, т. е. к выбору таких ее параметров, которые обеспечили бы минимум стоимости или массы проектируемого изделия при заданных условиях и ограничениях.

В большинстве практических случаев задача сводится к улучшению параметров конструкции по сравнению с базовым вариантом. Целенаправленный поиск путей улучшения параметров осуществляется посредством моделирования.

Рассматриваемая схема взаимодействия моделей позволяет более эффективно и рационально организовать проектные работы, что в конечном счете направлено на повышение качества изделий.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Системный анализ параметров и показателей качества многоуровневых конструкций радиоэлектронных средств / *А.К. Гришко, Н.К. Юрков, Д.В. Артамонов, В.А. Канайкин* // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2014. – № 2 (26). – С. 77–84.
2. Методология управления качеством сложных систем / *А.К. Гришко, Н.К. Юрков, И.И. Кочегаров* // Надежность и качество: Труды международного симпозиума. – Пенза, 2014. – Т. 2. – С. 377–379.
3. *Гришко А.К.* Информационная поддержка изделий на этапах жизненного цикла – основа системной работы по качеству // Надежность и качество: Труды международного симпозиума. – Пенза, 2010. – Т. 1. – С. 281–283.
4. *Гришко А.К.* Управление принятием решений на этапах проектирования сложных изделий на основе межмодельного взаимодействия: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Пенза, 2004.
5. Анализ моделей тепловых режимов в многоуровневых конструктивно-функциональных модулях радиоэлектронных систем специального назначения / *А.К. Гришко, В.Я. Баннов* // Надежность и качество: Труды международного симпозиума. – Пенза, 2013. – Т. 1. – С. 180–181.
6. К вопросу реализации метода автоматизированного выбора системы охлаждения / *Н.В. Горячев, И.И. Кочегаров, Н.К. Юрков* // Алгоритмы, методы и системы обработки данных. – Муром, 2013. – № 3 (25). – С. 16-20.

7. Динамическая оптимизация управления структурными элементами сложных систем / А.К. Гришко, Н.К. Юрков, Т.В. Жаикова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – Пенза, 2015. – № 4 (26). – С. 134-141.
8. Гришко А.К. Динамический анализ и синтез оптимальной системы управления радиоэлектронными средствами // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – Пенза, 2015. – № 4 (26). – С. 141–147.
9. Гришко А.К. Алгоритм управления в сложных технических системах с учетом ограничений // Надежность и качество: Труды международного симпозиума. – Пенза, 2014. – Т. 2. – С. 379–381.
10. Гришко А.К. Адаптивная фильтрация в задачах синтеза оптимальных систем принятия решений и управления // Надежность и качество: Труды международного симпозиума. – Пенза, 2009. – Т. 1. – С. 221–222.
11. Программный пакет моделирования механических параметров печатных плат / И.И. Кочегаров, Г.В. Таньков // Надежность и качество: Труды международного симпозиума. – Пенза, 2011. – Т. 2. – С. 334–337.
12. Структурные компоненты геоинформационных систем и их основные области применения / А.К. Гришко, А.С. Зорькин, В.Я. Баннов, В.А. Трусов // Надежность и качество: Труды международного симпозиума. – Пенза, 2010. – Т. 1. – С. 287–288.
13. Алгоритм пространственно-параметрического синтеза электро монтажа радиоэлектронных средств / А.К. Гришко, П.Г. Андреев, В.Я. Баннов // Надежность и качество: Труды международного симпозиума. – Пенза, 2015. – Т. 1. – С. 181–182.

*Статья поступила в редакцию 25 июня 2015 г.*

## **OPTIMIZING THE PLACEMENT ELEMENTS OF RES BASED MULTILEVEL GEOINFORMATION MODEL**

**A.K. Grishko**

Penza State University  
40, Krasnaya st., Penza, 440026, Russian Federation

*When designing the board assembly is one of the important tasks on which depends the reliability and performance of the product is the optimal placement of elements in a given area. It should take into account a set of interrelated parameters such as resistance element to mechanical stress, heat, electromagnetic compatibility. Unlike the task trace interconnections, for which there are well-known, proven solutions to the problem of locating elements are no solutions that address the complex above parameters. This paper considers the model of integrating external impacts on the structural components of radio electronic equipment for the problem of determining the optimal layout of elements on the printing unit. Proposed multi-layered GIS model that takes into account the thermal, mechanical and microwave exposure. An algorithm that allows you to get the optimum layout for the selected criteria board assembly.*

**Keywords:** board assembly, optimization, mechanical effects, thermal effects, microwave, mathematical modeling.

---

*Aleksey K. Grishko (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.*

УДК 62-251

## УЧЕТ АНИЗОТРОПИИ УПРУГИХ СВОЙСТВ ПЕРЕДНЕЙ ОПОРЫ ШПИНДЕЛЬНОГО УЗЛА ТОКАРНОГО СТАНКА ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ ПРИБОРОВ

*А.Ф. Денисенко, М.В. Якимов*

Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244

*Представлены результаты исследований влияния отклонений формы посадочных поверхностей вала и расточки в корпусе опоры переднего подшипника шпиндельного узла на ее упругие характеристики. Предлагаются способ и методика контроля жесткости шпиндельных узлов токарных станков с использованием нагрузочного устройства, позволяющего определять статическую радиальную жесткость шпиндельного узла при изменении направления вектора нагрузки. Построенный с использованием предлагаемого способа и методики годограф упругих деформаций передней опоры шпинделя подтвердил наличие существенной анизотропии жесткости опоры шпиндельного узла. Полученные результаты позволили выявить доминирующий фактор при формировании упругих деформаций опоры. Представленные способ и методика контроля жесткости шпиндельных узлов металлорежущих станков, а также нагрузочное приспособление с возможностью изменений направления вектора силы показали свою работоспособность, эффективность, а также достаточную простоту реализации, что наиболее благоприятно для использования в производственных условиях при обработке деталей приборов.*

**Ключевые слова:** детали, прибор, токарный станок, шпиндельный узел, упругие свойства, анизотропия упругих свойств, нагрузочное устройство, метод конечных элементов, годограф деформаций.

Эксплуатационные характеристики приборов, имеющих высокоточные механические узлы (механизмы фокусировки объективов оптических приборов, винтовые механизмы точной установки, планетарные и волновые передачи, микроманипуляторы и др.), могут быть обеспечены только при условии изготовления деталей этих узлов с повышенными требованиями к точности.

Использование для этой цели металлообрабатывающего оборудования, обеспечивающего необходимые выходные характеристики, проверяемые традиционными методами, часто не дает ожидаемого результата. Как правило, это связано с нестабильностью выходных характеристик при эксплуатации станка.

Жесткость металлорежущего станка оказывает решающее влияние на основные выходные показатели – точность и производительность, в том числе на качество обработанной поверхности, виброустойчивость, стойкость инструмента, долговечность конструкций.

Основная роль жесткости проявляется в формировании упругих перемещений в зоне резания.

Особая роль здесь принадлежит жесткости шпиндельного узла как системы

---

*Александр Федорович Денисенко (д.т.н., проф.), заведующий кафедрой «Автоматизированные станочные и инструментальные системы».*

*Михаил Владимирович Якимов, старший преподаватель кафедры «Автоматизированные станочные и инструментальные системы».*

станка, непосредственно связанной с заготовкой [1].

В связи с этим обеспечение постоянства жесткости шпиндельных узлов в различных радиальных направлениях является дополнительным фактором получения требуемой точности при обработке деталей приборов.

При этом ожидаемые значения жесткости не могут быть постоянными по целому ряду причин, определяемых работой подшипников качения (переменное количество зон контакта, воспринимающих нагрузку; смещение их относительно неподвижного кольца; перераспределение давления в зонах контакта и т. д.) и условиями их сборки (отклонения формы посадочных поверхностей вала и расточки корпуса опоры).

Считая, что деформация опоры  $\Delta_{опоры}$  определяется только контактными деформациями, можно записать следующее выражение:

$$\Delta_{опоры} = \Delta_{НК} + \Delta_{БК} + \Delta_{ТК},$$

где  $\Delta_{НК}$  – деформация в контакте наружного кольца и расточки корпуса;

$\Delta_{БК}$  – деформация в контакте внутреннего кольца и вала;

$\Delta_{ТК}$  – деформация в контакте тел качения с наружным и внутренним кольцом.

Величины  $\Delta_{НК}$ ,  $\Delta_{БК}$  и  $\Delta_{ТК}$  зависят от точности изготовления подшипника, корпуса, шпинделя и качества сборки опоры в целом. Также стоит отметить, что точность изготовления подшипника существенно выше точности сопрягаемых поверхностей.

Для исследования анизотропии упругих свойств передней опоры шпиндельного узла токарного станка предлагается использовать нагрузочное устройство, позволяющее определять статическую радиальную жесткость шпиндельного узла при изменении направления вектора нагрузки, представляющее собой цилиндрическую оправку с коническим хвостовиком, устанавливаемым в переходной втулке и в конусном отверстии пиноли задней бабки (рис. 1). Угловое положение упора нагрузочного устройства соответствует направлению действия силы.

Принцип работы устройства заключается в создании радиальной нагрузки на шпиндель, вызванной упругой деформацией оправки при скольжении упора нагрузочного устройства по внутренней конической поверхности шпинделя (см. рис. 1).

Величину относительных перемещений шпинделя в корпусе шпиндельной бабки контролируют посредством индикатора, установленного на корпусе шпиндельной бабки.

Оправка предварительно тарируется, что позволяет оценивать создаваемую радиальную нагрузку по изгибу оправки, контролируемому индикатором, закрепленным на ней.

Размеры оправки определяются моделированием методом конечных элементов в зависимости от внутреннего конуса переднего конца шпинделя и требуемых радиальных нагрузок.

Исследования анизотропии упругих свойств передней опоры шпиндельного узла проводились на токарном станке с оперативным управлением «Вектор» производства Средневолжского станкостроительного завода (г. Самара). Для создания диапазона действующих на шпиндель радиальных нагрузок от 1250 до 2500 Н, что соответствует полустатическому тчению, максимальная длина перемещения пиноли составила 120 мм.



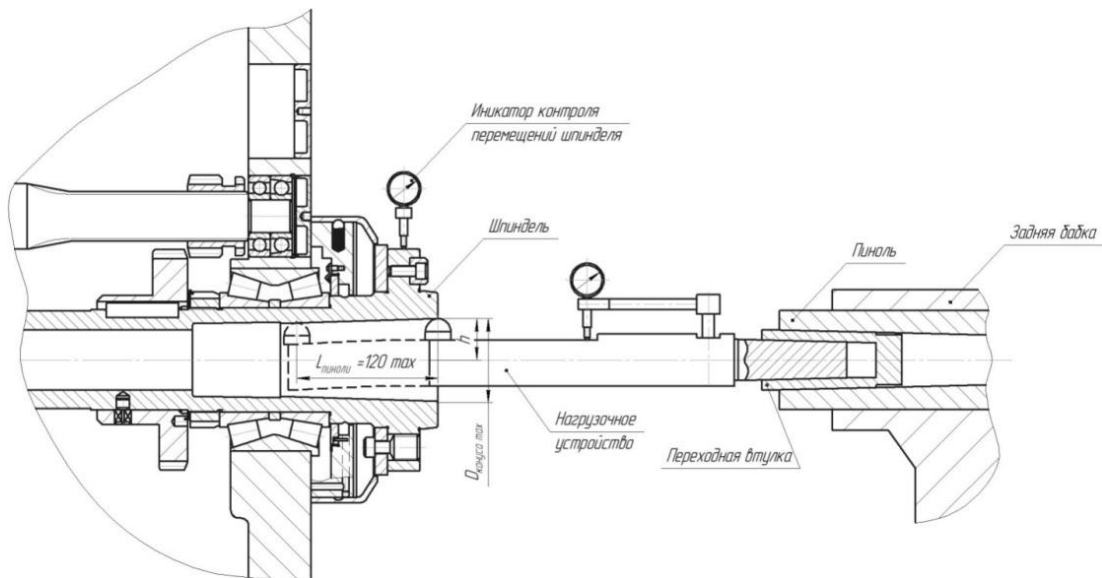


Рис. 1. Измерительная схема

Для эксперимента было выбрано восемь положений оправки: направление действия силы изменялось посредством поворота нагрузочного устройства в переходной втулке на угол  $45^\circ$ .

Нагружение шпинделя осуществлялось шагами по 250 Н с записью значений радиальных перемещений шпинделя. Каждое нагружение повторялось от 3 до 6 раз. Итоговое значение принималось как среднее арифметическое полученных значений.

По результатам эксперимента строился годограф упругих перемещений шпинделя.

То обстоятельство, что радиальная нагрузка, нагружающая шпиндель по данной методике, прикладывается практически в месте установки переднего подшипника (см. рис. 1), позволяет считать, что фиксируемые упругие перемещения  $\Delta_{\text{экспер.}}$  при экспериментах складываются из деформаций тела шпинделя  $\Delta_{\text{шп}}$  и деформаций передней опоры  $\Delta_{\text{пер.оп}}$ , а деформацией задней опоры  $\Delta_{\text{зад.оп}}$  можно пренебречь.

Таким образом, для оценки  $\Delta_{\text{пер.оп}}$  полученные экспериментальные данные  $\Delta_{\text{экспер.}}$  корректировались на величину  $\Delta_{\text{шп}}$ , значения которых были получены расчетом упругих деформаций тела шпинделя методом конечных элементов [2].

При этом шпиндель представлялся как балка на двух жестких опорах. Условия проведения численного моделирования были аналогичны условиям натурального эксперимента. Сила прикладывалась в точке, место положения которой изменялось в соответствии с перемещением пиноли в натурном эксперименте. Результаты конечно-элементного моделирования представлены в табл. 1.

Упругие деформации тела шпинделя

Сила, Н	Перемещение шпинделя, мкм
1250	0,4475
1500	0,4875
1750	0,5350
2000	0,5475
2250	0,5425
2500	0,5250

С использованием полученных методом конечных элементов значений перемещений шпинделя как балки на жестких опорах и экспериментальных данных были вычислены значения деформации передней опоры (табл. 2).

Таблица 2

Деформация опоры ШУ, мкм

Сила, Н	Положение оправки							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1250	0,2	0,2	0,9	1,2	1,7	2,6	3,3	0,1
1500	0,6	0,8	1,4	1,5	2,3	2,5	3,8	0,7
1750	1,3	0,9	1,8	1,5	3,0	2,7	3,9	0,8
2000	1,8	1,0	2,1	1,6	3,2	2,7	3,9	0,9
2250	2,0	1,1	2,1	1,7	3,5	2,7	3,9	1,1
2500	2,3	1,2	2,3	1,9	3,8	2,7	4,1	1,2

На основании данных табл. 2 построены графики и годографы деформаций опоры шпиндельного узла при действии нагрузки в восьми направлениях (рис. 2 и 3).

Анализ результатов показал, что изменение жесткости шпиндельной опоры имеет место при изменении не только величины нагрузки, но и направления приложения нагрузки, то есть экспериментально подтверждена анизотропия жесткости опоры шпиндельного узла [3].

Важным вопросом является выявление доминирующего фактора при формировании упругих деформаций опоры.

Величины деформации опоры имеют существенный разброс, определяемый соотношением величин упругих контактных деформаций элементов опоры ( $\Delta_{HK}$ ,  $\Delta_{BK}$  и  $\Delta_{TK}$ ), которое меняется по мере поворота внутреннего кольца, сепаратора и вращения шариков. Все это приводит к существенной анизотропии радиальной жесткости опоры.

Для наружного кольца характерно статичное состояние, и соответственно податливость контактного соединения кольца с корпусом  $\Delta_{HK}$  не связана с вращением шпинделя. В то же время стоит отметить, что колебания жесткости, вызванные составляющими  $\Delta_{BK}$  и  $\Delta_{TK}$ , будут существенно зависеть от углового положения шпинделя.

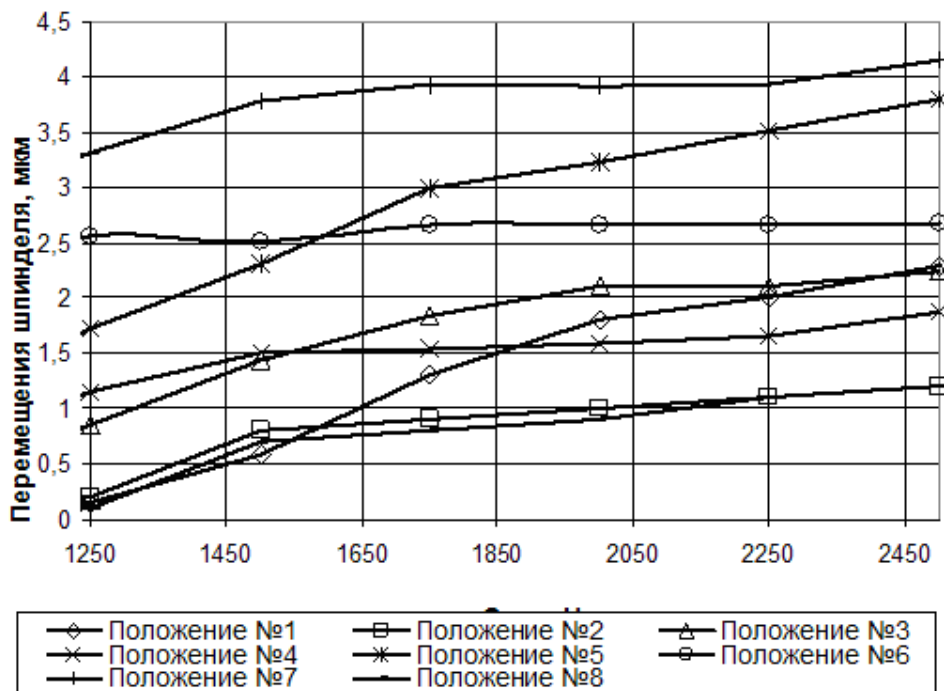


Рис. 2. Графики деформации опоры ШУ

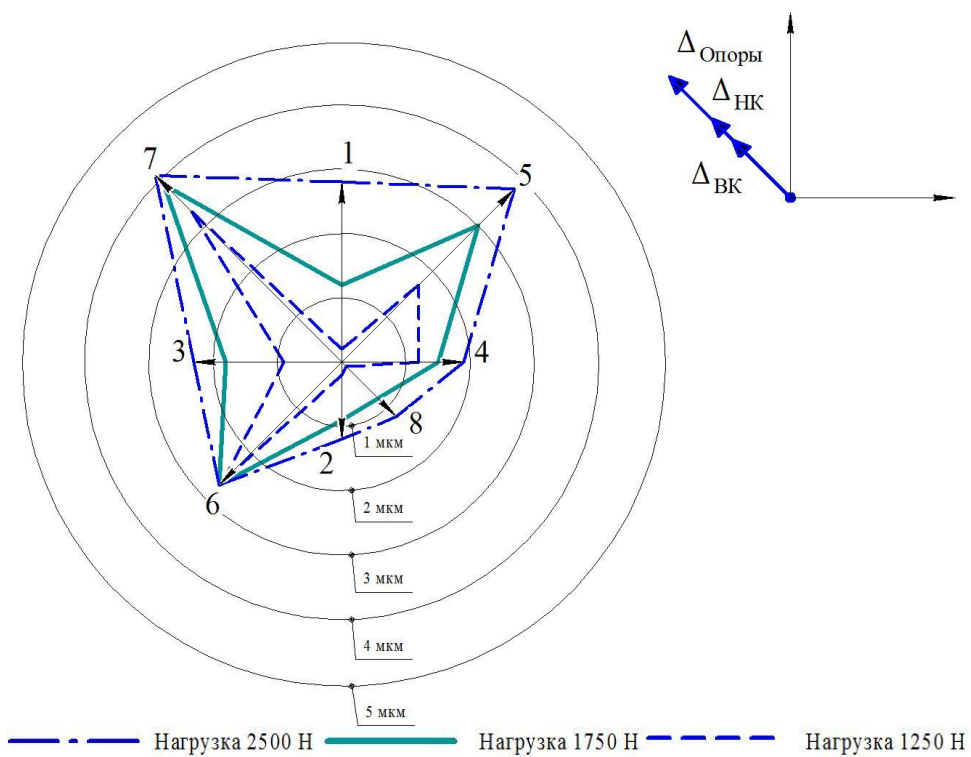


Рис. 3. Радиографы деформации опоры шпиндельного узла

Таким образом, в случае, если податливость опоры в рассматриваемом направлении не меняется при изменении углового положения шпинделя, можно говорить о превалирующем влиянии контактного соединения наружного кольца и корпуса.

С целью определения степени влияния деформаций элементов опоры были проведены эксперименты, в которых угловое положение шпинделя изменялось относительно исходного (произвольно выбранного) на  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $270^\circ$ ,  $360^\circ$  и  $720^\circ$ .

Годографы деформаций опоры шпиндельного узла при повороте шпинделя приведены на рис. 4 и 5.

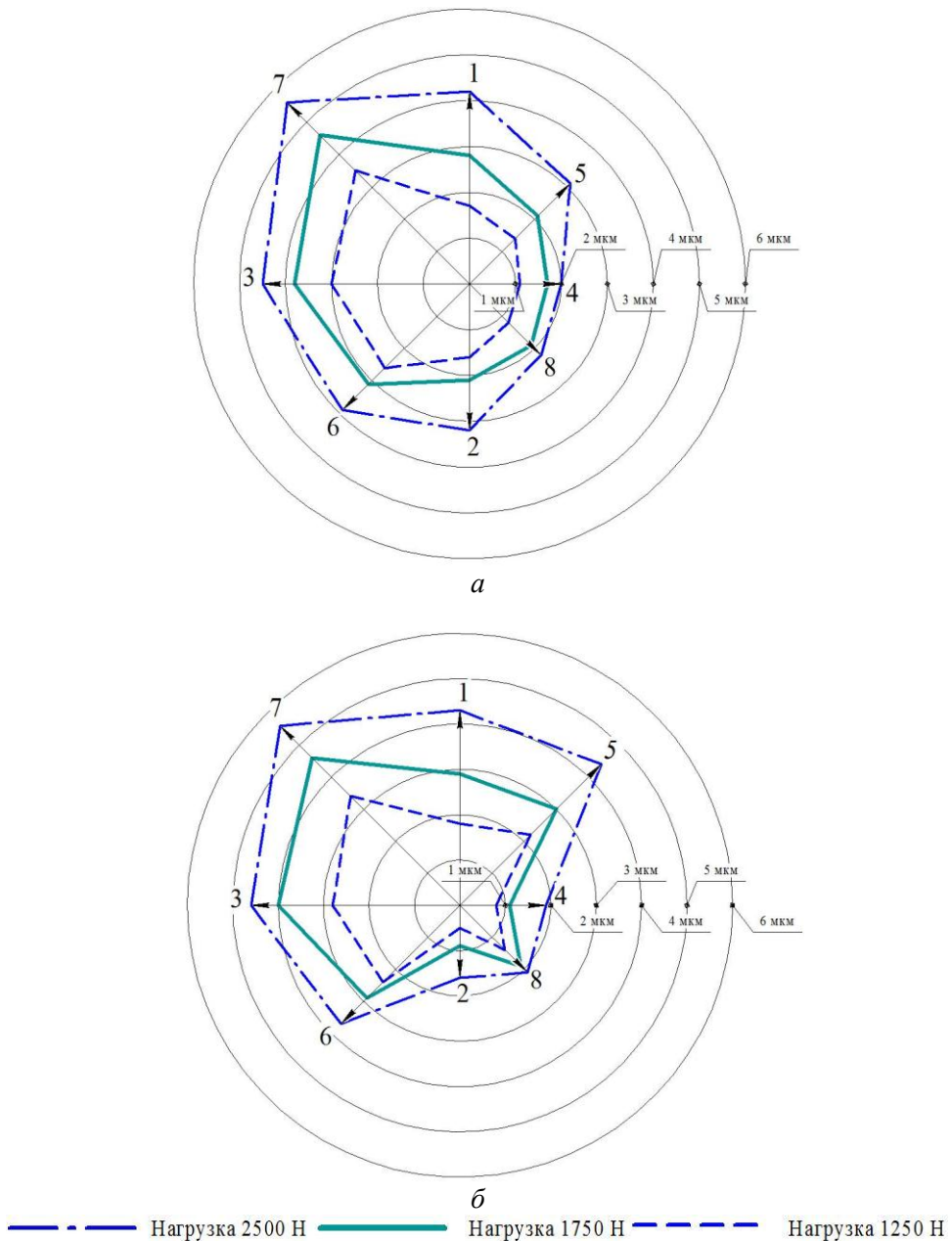
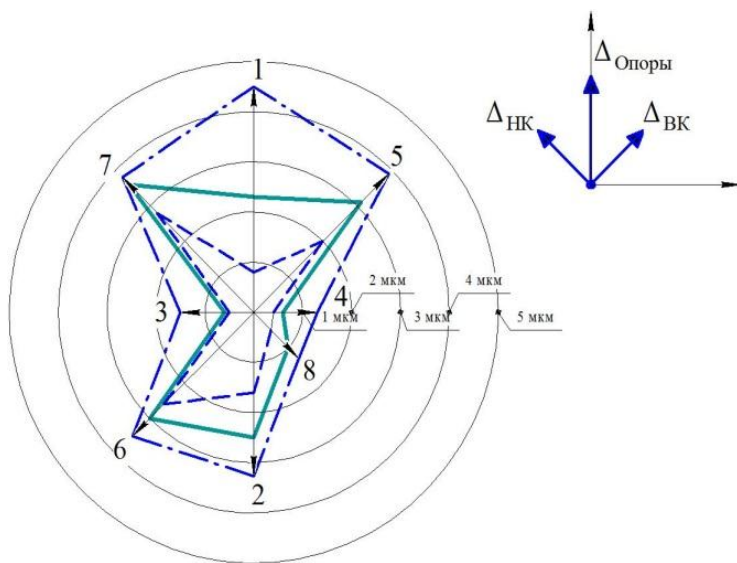
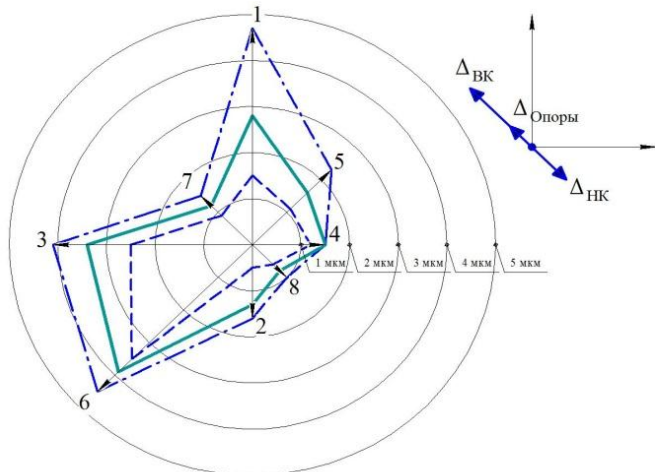


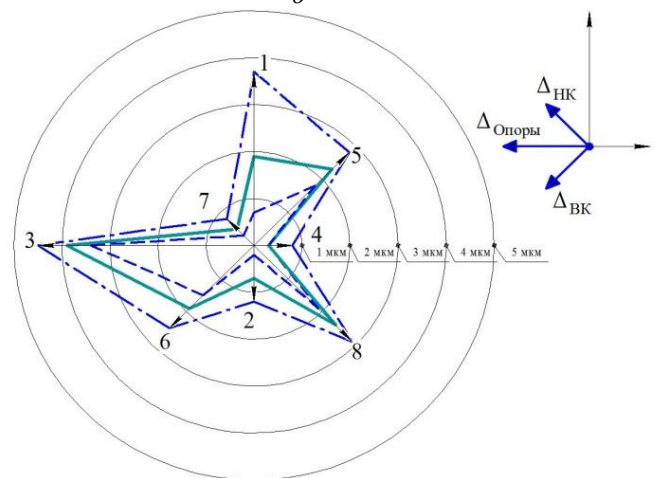
Рис. 4. Годографы деформации опоры шпиндельного узла:  
*a* – после поворота шпинделя на  $360^\circ$ ; *б* – после поворота шпинделя на  $720^\circ$



*a*



*б*



*в*

Рис. 5. Годографы деформации опоры шпиндельного узла: *a* – после поворота шпинделя на 90°; *б* – после поворота шпинделя на 180°; *в* – после поворота шпинделя на 270°

— — — — — Нагрузка 2500 Н — — — — — Нагрузка 1750 Н — — — — — Нагрузка 1250 Н

Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы.

Так как форма годографа практически не меняется при повороте шпинделя на полный оборот ( $360^\circ$  и  $720^\circ$ ) (см. рис. 3 и 4) и при указанных положениях значение  $\Delta_{TK}$  будет определяться сопряжением разных поверхностей (т. к. при повороте шпинделя шарики отстают от вращения внутреннего кольца подшипника), то можно считать, что доля  $\Delta_{TK}$  по сравнению с двумя другими составляющими ( $\Delta_{HK}$ ,  $\Delta_{BK}$ ) невелика.

Поскольку при повороте шпинделя в пределах  $360^\circ$  (рис. 5) не наблюдается закономерность в повороте исходного годографа, представленного на рис. 3, то можно считать, что отсутствует превалирующее влияние одной из составляющих ( $\Delta_{HK}$ ,  $\Delta_{BK}$ ) и годограф является результатом сложения двух величин одного порядка. Это объясняет форму годографов в пределах одного оборота. Если принять, что в исходном положении (см. рис. 3) направления максимальных упругих деформаций  $\Delta_{HK}$  и  $\Delta_{BK}$  совпадают и таким образом при формировании  $\Delta_{опоры}$  суммируются (см. рис. 3) в направлении 7, то при повороте шпинделя на  $90^\circ$  максимальный вектор упругих деформаций  $\Delta_{опоры}$  перемещается в направлении 1 (см. рис. 5, а). При повороте на  $180^\circ$  (см. рис. 5, б) разнонаправленность векторов  $\max \Delta_{HK}$  и  $\max \Delta_{BK}$  приводит к уменьшению вектора  $\Delta_{опоры}$  в направлении 1. При повороте на  $270^\circ$  направление вектора  $\Delta_{опоры}$  соответствует направлению 3, что подтверждается значительными упругими деформациями в этом направлении на рис. 5, в.

Таким образом, экспериментально подтверждено наличие анизотропии упругих свойств опор шпиндельного узла. При этом диапазон изменения упругих свойств опоры в зависимости от направления действия нагрузки составляет  $(\max \Delta_{опоры} / \min \Delta_{опоры}) = 2...3$ . Установлено, что упругие деформации в основном определяются деформациями в контакте «наружное кольцо – расточка корпуса» и контакте «внутреннее кольцо – вал».

Полученные результаты позволяют при разработке оборудования для приборостроения сформулировать ТУ на детали опор ШУ, обеспечивающих прецизионную точность обработки.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Денисенко А.Ф., Якимов М.В. Формирование точностных и жесткостных характеристик опор роторного узла при сборке // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2009. – Вып. 3(25). – С. 132-139.
2. Денисенко А.Ф., Якимов М.В. Разработка конечно-элементной модели для определения упругих характеристик шпиндельных узлов // СТИН. – 2011. – № 8. – С. 9-13.
3. Денисенко А.Ф., Якимов М.В. Моделирование опоры качения при конечно-элементном анализе шпиндельных узлов металлорежущих станков // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2012. – № 3(35). – С. 126-132.

Статья поступила в редакцию 8 апреля 2015 г.

## ELASTIC ANISOTROPY FRONT BEARING SPINDLE UNIT LATHES

**A.F. Denisenko, M.V. Yakimov**

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

*The paper presents the results of the investigation into the effect of the mounting-surface form deviations of the shaft and the hollow in the spindle-unit front-bearing housing on its elastic properties. A method and a technique of controlling the spindle-unit stiffness of lathes using a loading device allowing to determine the spindle-unit static radial stiffness when changing the load vector direction are offered. A spindle front-bearing elastic-deformations hodograph obtained by using the method and technique in question confirmed the presence of the bearing spindle-unit stiffness significant anisotropy. The results obtained revealed the dominant factor in the formation of the bearing elastic deformations. The presented method and technique of machine-tool spindle-unit stiffness control, as well as the loading device capable of changing the force vector direction have shown their efficiency, effectiveness, as well as sufficient ease of implementation which is most favorable for use under operational conditions in the manufacture of measuring-instrument parts.*

**Keywords:** *parts of measuring instruments, lathe spindle, the elastic properties, the anisotropy of the elastic properties, the load device, finite element method, the hodograph deformations.*

УДК 621.317

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНВЕРТИРОВАНИЯ ВХОДНОГО СИГНАЛА ДЛЯ СОКРАЩЕНИЯ ВРЕМЕНИ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГАРМОНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ\***

***В.С. Мелентьев, Е.Е. Ярославкина, Е.В. Павленко***

Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: vs\_mel@mail.ru

*Рассматривается новый метод измерения параметров (среднеквадратических значений напряжения и тока, активной и реактивной мощности) по мгновенным значениям гармонических сигналов, обеспечивающий сокращение времени измерения. В отличие от известных методов, основанных на формировании дополнительных сигналов напряжения, выявлении моментов переходов сигналов через ноль и сравнении их мгновенных значений, реализация метода позволяет исключить погрешности по модулю фазосдвигающих блоков. Предлагается структурная схема информационно-измерительной системы, реализующей метод. Приводятся результаты анализа погрешности системы, обусловленной отклонением реальных сигналов от гармонической модели. Полученные результаты позволяют выбирать соответствующие аппаратные средства в зависимости от предъявляемых требований по точности измерения.*

***Ключевые слова:*** гармонические сигналы, мгновенные значения, дополнительные сигналы, фазосдвигающие блоки, гармоническая модель, погрешность.

Использование аппроксимационных методов и систем измерения параметров гармонических и близких к гармоническим сигналов (среднеквадратических значений напряжения (СКЗН) и тока (СКЗТ), активной (АМ) и реактивной (РМ) мощности) по отдельным мгновенным значениям (МЗ), которые не связаны с периодом входного сигнала, позволяет значительно сократить время определения параметров за счет замены функциональных преобразований арифметическими операциями с МЗ [1].

Для реализации такого подхода возможно разделение мгновенных значений во времени и в пространстве [2]. Возможно также использование как временного, так и пространственного разделения.

Использование пространственного разделения требует формирования дополнительных сигналов, сдвинутых по фазе относительно входных, и в общем случае обеспечивает уменьшение времени определения параметров [3]. Для упрощения алгоритма измерения, а также сокращения аппаратных затрат в ка-

---

\* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 13-08-00173-а).

*Владимир Сергеевич Мелентьев (д.т.н., проф.), заведующий кафедрой «Информационно-измерительная техника».*

*Екатерина Евгеньевна Ярославкина (к.т.н.), доцент кафедры «Информационно-измерительная техника».*

*Елена Владиславовна Павленко, аспирант.*



честве дополнительных сигналов используют ортогональные составляющие входных.

Использование ортогональных составляющих входных сигналов может привести к достаточно большой частотной погрешности фазосдвигающего блока (ФБ), который осуществляет сдвиг входного сигнала на  $90^\circ$ . Изменение частоты в достаточно широких пределах может привести к тому, что угол сдвига фазы ФБ может отличаться от  $90^\circ$  [4].

Для исключения частотной погрешности находят применение методы измерения параметров гармонических сигналов (ГС), которые основаны на формировании дополнительных сигналов, сдвинутых относительно входных на угол  $\Delta\alpha$ , значение которого может быть выбрано произвольным образом, и определении параметров ГС с использованием МЗ входных и дополнительных сигналов [5].

При аппаратной реализации данных методов возможно возникновение погрешности по модулю ФБ, которая заключается в том, что амплитудные значения напряжения на входе и выходе фазосдвигающего блока будут отличаться [6].

В [7] предложен метод измерения параметров ГС, в котором используется формирование двух дополнительных сигналов напряжения: первого – инверсного входному и второго – сдвинутого относительно входного на произвольный угол  $\Delta\alpha$ . Реализация данного метода исключает погрешность по модулю ФБ.

Недостатком метода является большое время измерения, которое не может быть меньше четверти периода.

В [8] предложен метод измерения параметров ГС, который заключается в формировании двух дополнительных сигналов напряжения, сдвинутых по фазе на углы  $\Delta\alpha$  и  $2\Delta\alpha$  относительно входного, и сигнала, инверсного входному.

Однако при отклонении углов сдвига фазы ФБ, формирующих первый и второй дополнительные сигналы, может возникнуть существенная погрешность.

В статье рассматривается новый метод определения параметров ГС, исключая данный вид погрешности, поскольку используется формирование только одного дополнительного напряжения. Кроме того, реализация метода обеспечивает исключение погрешности по модулю ФБ и сокращение времени измерения.

Метод заключается в том, что в момент перехода дополнительного напряжения, сдвинутого по фазе относительно входного на угол  $\Delta\alpha$ , через ноль измеряют первые МЗ входного напряжения и тока; в момент равенства дополнительного напряжения и сигнала, инверсного входному, измеряют вторые мгновенные значения входного напряжения и тока. Параметры ГС определяют по полученным значениям.

Сущность метода показана на рис. 1.

Если напряжение и ток являются гармоническими  $u_1(t) = U_m \sin \omega t$  и  $i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi)$ , то дополнительное напряжение будет иметь вид  $u_2(t) = U_m \sin(\omega t + \Delta\alpha)$ , а инверсный сигнал -  $u_3(t) = -U_m \sin \omega t$ , где  $U_m$  – амплитудное значение напряжения;  $\omega$  – угловая частота;  $\varphi$  – угол сдвига фаз между напряжением и током.

В момент времени  $t_1$ , когда  $u_2(t)$  переходит через ноль, МЗ сигналов будут равны  $U_{11} = U_m \sin(-\Delta\alpha)$ ;  $I_1 = I_m \sin(\varphi - \Delta\alpha)$ .

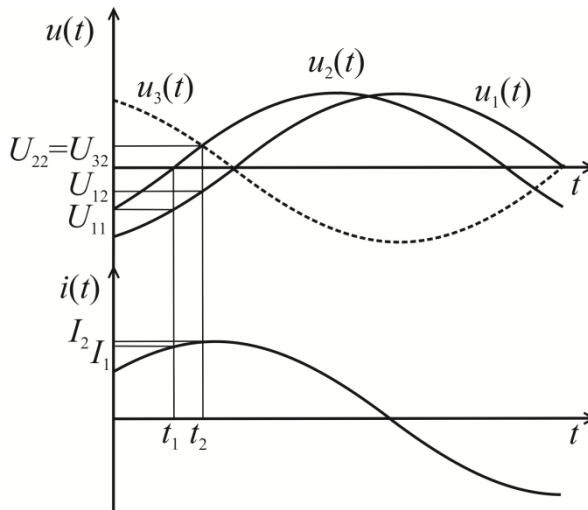


Рис. 1. Временные диаграммы, поясняющие метод

В момент времени  $t_2$ , когда  $U_{22} = U_{32}$ , МЗ сигналов примут вид:

$$U_{12} = U_m \sin \alpha_1; U_{22} = U_m \sin(\alpha_1 + \Delta\alpha); U_{32} = -U_m \sin \alpha_1; I_2 = I_m \sin(\alpha_1 + \varphi),$$

где  $\alpha_1$  – начальная фаза входного напряжения в момент времени  $t_2$ .

Равенство МЗ сигналов  $U_{22} = U_{32}$  будет выполняться, если  $-\alpha_1 = \alpha_1 + \Delta\alpha$

( $\Delta\alpha \neq 0$ ), то есть когда  $\Delta\alpha = 2\pi l - 2\alpha_1$  или  $\alpha_1 = \pi l - \frac{\Delta\alpha}{2}$ , где  $l = 0, 1$ .

$$\text{Отсюда } U_{12} = \pm U_m \sin \frac{\Delta\alpha}{2}, \text{ а } I_2 = \pm I_m \sin\left(\varphi - \frac{\Delta\alpha}{2}\right).$$

При использовании МЗ сигналов после преобразований можно получить выражения для определения основных параметров ГС:

– СКЗН и СКЗТ

$$U_{СКЗ} = \frac{\sqrt{2}U_{12}^2}{\sqrt{4U_{12}^2 - U_{11}^2}}; \quad (1)$$

$$I_{СКЗ} = \sqrt{\frac{2[U_{12}^2(I_1^2 + I_2^2) - I_1 I_2 U_{11} U_{12}]}{4U_{12}^2 - U_{11}^2}}; \quad (2)$$

– АМ и РМ

$$P = \frac{|U_{12}| \left[ |U_{11}| (I_2 U_{11} - I_1 U_{12}) - I_2 (4U_{12}^2 - U_{11}^2) \right]}{2(4U_{12}^2 - U_{11}^2)}; \quad (3)$$

$$Q = \frac{U_{12} (I_2 U_{11} - I_1 U_{12})}{\sqrt{4U_{12}^2 - U_{11}^2}}. \quad (4)$$

Метод можно реализовать с помощью следующей информационно-измерительной системы (ИИС) (рис. 2).

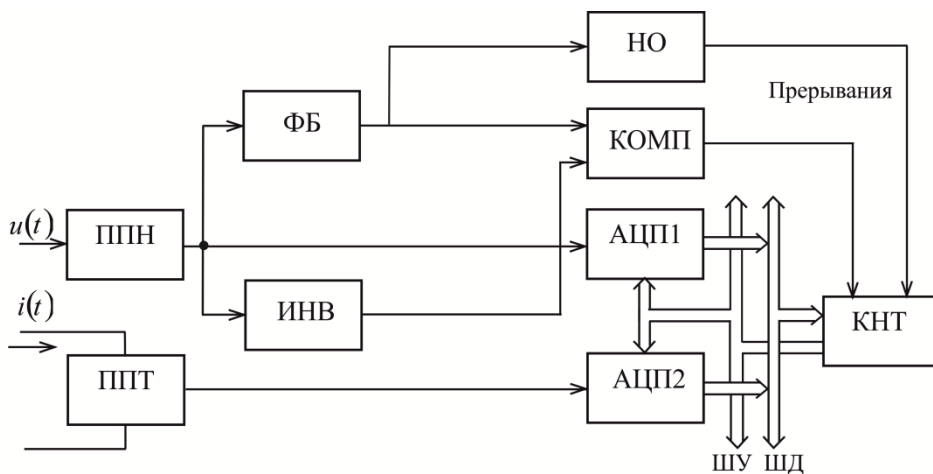


Рис. 2. Схема ИИС, реализующей метод

В состав ИИС входят: первичные преобразователи напряжения ППН и тока ППТ, аналого-цифровые преобразователи АЦП1 и АЦП2, компаратор КОМП, фазосдвигающий блок ФБ, производящий сдвиг напряжения на угол  $\Delta\alpha$ , инвертор ИНВ, контроллер КНТ, шины управления ШУ и данных ШД.

Анализ показывает, что в случае наличия погрешности по модулю фазосдвигающего блока дополнительное напряжение примет вид

$$u'_2(t) = U'_m \sin(\omega t + \Delta\alpha),$$

где  $U'_m$  – амплитудное значение напряжения на выходе ФБ.

В этом случае равенство МЗ сигналов напряжения произойдет в момент времени  $t'_2$ :

$$U'_{22} = U'_{32} = U'_m \sin(\alpha'_1 + \Delta\alpha).$$

Поскольку изначально считалось, что угол сдвига  $\Delta\alpha$  – произвольный, то это не приведет к погрешности, а сместит моменты равенства сигналов. Таким образом, метод и реализующая его ИИС инвариантны к погрешности по модулю ФБ.

Предлагаемый метод предназначен для измерения параметров сигналов с гармоническими моделями. При искажении формы реальных сигналов возникает методическая погрешность.

Для анализа данной погрешности можно воспользоваться известной методикой оценки погрешности результата измерения параметра как функции, аргументы которой заданы приближенно с погрешностью, соответствующей отклонению модели от реального сигнала. Погрешность вычисления значения функции, у которой аргументы заданы приближенно, может быть найдена с помощью дифференциала этой функции [1].

В случае, когда погрешности аргументов соответствуют наибольшему отклонению моделей от реальных сигналов, предельные значения абсолютных погрешностей измерения параметров согласно (1) – (4) примут вид:

$$\Delta U_{CK3} = \left( \left| \frac{\partial U_{CK3}}{\partial U_{11}} \right| + \left| \frac{\partial U_{CK3}}{\partial U_{12}} \right| \right) \Delta U_{\max}; \quad (5)$$

$$\Delta I_{CK3} = \left( \left| \frac{\partial I_{CK3}}{\partial U_{11}} \right| + \left| \frac{\partial I_{CK3}}{\partial U_{12}} \right| \right) \Delta U_{\max} + \left( \left| \frac{\partial I_{CK3}}{\partial I_1} \right| + \left| \frac{\partial I_{CK3}}{\partial I_2} \right| \right) \Delta I_{\max}; \quad (6)$$

$$\Delta P = \left( \left| \frac{\partial P}{\partial U_{11}} \right| + \left| \frac{\partial P}{\partial U_{12}} \right| \right) \Delta U_{\max} + \left( \left| \frac{\partial P}{\partial I_1} \right| + \left| \frac{\partial P}{\partial I_2} \right| \right) \Delta I_{\max}; \quad (7)$$

$$\Delta Q = \left( \left| \frac{\partial Q}{\partial U_{11}} \right| + \left| \frac{\partial Q}{\partial U_{12}} \right| \right) \Delta U_{\max} + \left( \left| \frac{\partial Q}{\partial I_1} \right| + \left| \frac{\partial Q}{\partial I_2} \right| \right) \Delta I_{\max}, \quad (8)$$

где  $\Delta U_{\max}$ ,  $\Delta I_{\max}$  – абсолютные погрешности аргументов, которые в предельном случае соответствуют максимальным отклонениям моделей от реальных сигналов.

В общем случае предельные абсолютные погрешности равны

$$\Delta U_{\max} = U_{1m} \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk} \quad \text{и} \quad \Delta I_{\max} = I_{1m} \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik},$$

где  $h_{uk} = \frac{U_{km}}{U_{1m}}$  и  $h_{ik} = \frac{I_{km}}{I_{1m}}$  – коэффициенты  $k$ -тых гармоник напряжения и тока;

$U_{1m}$  и  $I_{1m}$  – амплитуды первых гармоник сигналов;

$U_{km}$  и  $I_{km}$  – амплитуды  $k$ -тых гармоник напряжения и тока.

Используя (1) – (8), можно определить относительные погрешности измерения СКЗН и СКЗТ и приведенные погрешности измерения АМ и РМ:

$$\delta_{U_{CK3}} = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk} \left( \left| \cos \frac{\Delta\alpha}{2} \right| + 2 \left| \cos \Delta\alpha \right| \right)}{2 \left| \sin^3 \frac{\Delta\alpha}{2} \right| \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2}}; \quad (9)$$

$$\delta_{I_{CK3}} = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{ik} \left[ \left| \cos(\varphi - \Delta\alpha) \right| + \left| \cos \left( \varphi - \frac{\Delta\alpha}{2} \right) \right| \right]}{\left| \sin \frac{\Delta\alpha}{2} \right| \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2}} +$$

$$+ \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk} \left[ \left| \cos \left( \varphi - \frac{\Delta\alpha}{2} \right) \cos(\varphi - \Delta\alpha) \right| + 2 \left| \cos^2 \left( \varphi - \frac{\Delta\alpha}{2} \right) - \sin^2(\varphi - \Delta\alpha) \right| \right]}{2 \left| \sin^3 \frac{\Delta\alpha}{2} \right| \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2}}; \quad (10)$$

$$\gamma_P = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{ik} \left( \left| \cos \Delta\alpha \right| + \left| \cos \frac{\Delta\alpha}{2} \right| \right)}{\left| \sin \frac{\Delta\alpha}{2} \right| \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2} \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2}} + \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}}{2 \left| \sin^3 \frac{\Delta\alpha}{2} \right| \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2} \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2}} \times$$

$$\times \left[ \left| \cos\left(\varphi - \frac{\Delta\alpha}{2}\right) + \cos(\varphi - \Delta\alpha)\cos\frac{\Delta\alpha}{2} \right| + \left| \cos(\varphi - \Delta\alpha)(2 + \cos\Delta\alpha) + \cos\varphi(2 - \cos\Delta\alpha) \right| \right]; \quad (11)$$

$$\gamma_Q = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{ik} \left( 1 + 2 \left| \cos\frac{\Delta\alpha}{2} \right| \right)}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2} \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2}} + \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}}{2 \left| \sin^3 \frac{\Delta\alpha}{2} \right| \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2} \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2}} \times$$

$$\times \left[ \left| \sin\frac{\Delta\alpha}{2} \cos(\varphi - \Delta\alpha) - \sin\left(\varphi + \frac{\Delta\alpha}{2}\right) \right| + 2 \left| \sin^3 \frac{\Delta\alpha}{2} \cos\left(\varphi - \frac{\Delta\alpha}{2}\right) - \sin\varphi \right| \right]. \quad (12)$$

Из выражений (9) – (12) следует, что погрешность измерения СКЗН зависит от угла сдвига фазы  $\Delta\alpha$ , а погрешности определения остальных параметров находятся в зависимости еще и от угла сдвига фазы между напряжением и током  $\varphi$ .

Зависимость относительной погрешности измерения СКЗН от  $\Delta\alpha$  в соответствии с (9) при наличии в сигнале 1-й и 3-й гармоник с  $h_{U3} = 0,2\%$  приведена на рис. 3.

На рис. 4–6 представлены графики погрешности измерения СКЗТ, АМ и РМ в зависимости от  $\Delta\alpha$  и  $\varphi$  согласно (10)–(12) при наличии в сигналах 1-й и 3-й гармоник с  $h_{U3} = h_{I3} = 0,2\%$ .

Разработанный метод измерения параметров ГС использует формирование дополнительного сигнала напряжения, сдвинутого на произвольный угол относительно входного, и сигнала, инверсного входному. Поскольку инверторы, используемые для этих целей, могут обеспечивать погрешность в сотые доли процента, то это позволяет исключить угловую погрешность и погрешность по напряжению ИНВ.

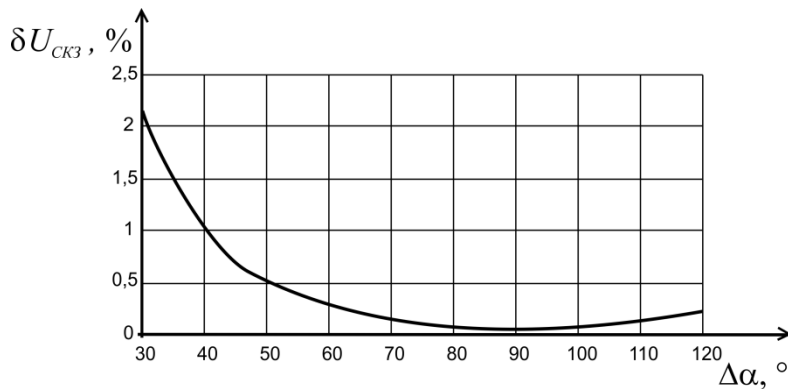


Рис. 3. График зависимости  $\delta U_{СКЗ}$  от  $\Delta\alpha$

Анализ показывает, что при наличии в сигналах гармонических составляющих погрешности измерения параметров существенно увеличиваются. При этом меньшие значения погрешностей имеют в общем случае место при  $\Delta\alpha$ , близком к  $90^\circ$ . При определении СКЗТ, АМ и РМ погрешности снижаются при  $\Delta\alpha > 90^\circ$ .

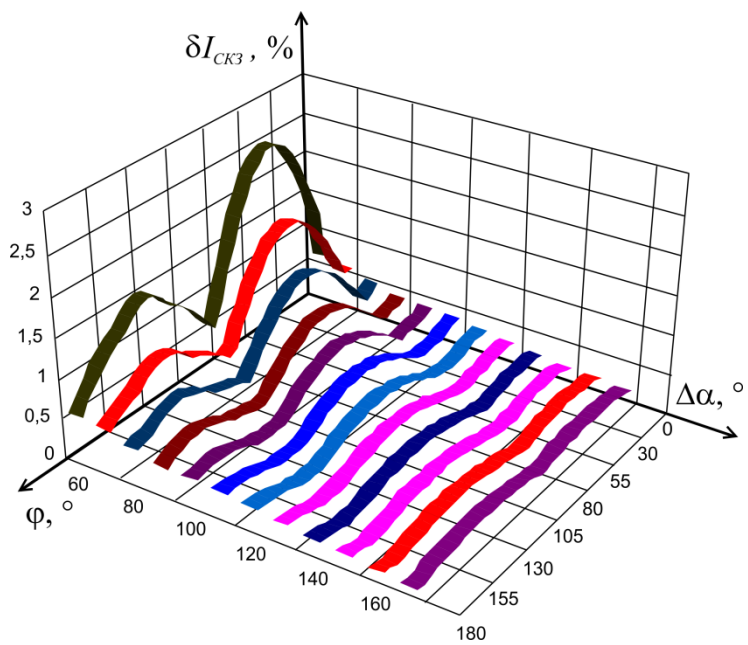


Рис. 4. Графики зависимости  $\delta I_{CK3}$  от  $\Delta\alpha$  и  $\varphi$

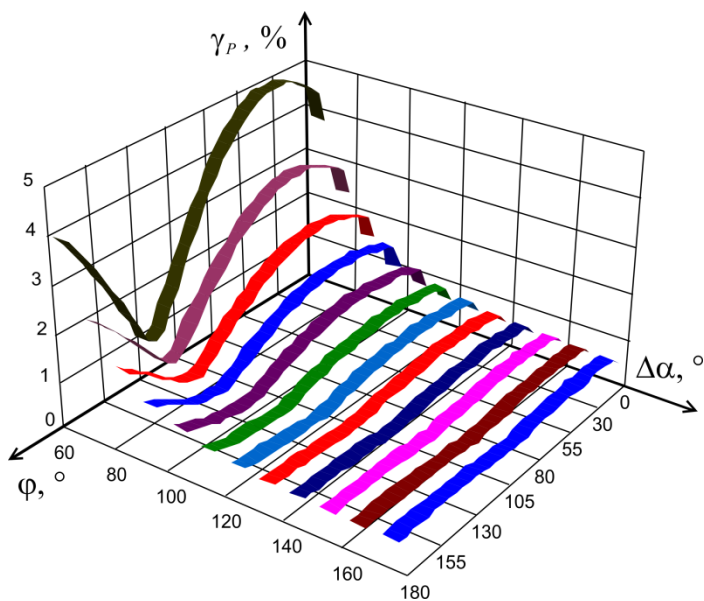


Рис. 5. Графики зависимости  $\gamma_P$  от  $\Delta\alpha$  и  $\varphi$

Полученные результаты позволяют осуществлять выбор области использования метода при соответствующем спектре сигналов и предъявляемых требованиях по точности измерения, а также подбирать оптимальные параметры измерительного процесса для обеспечения наименьшей погрешности.

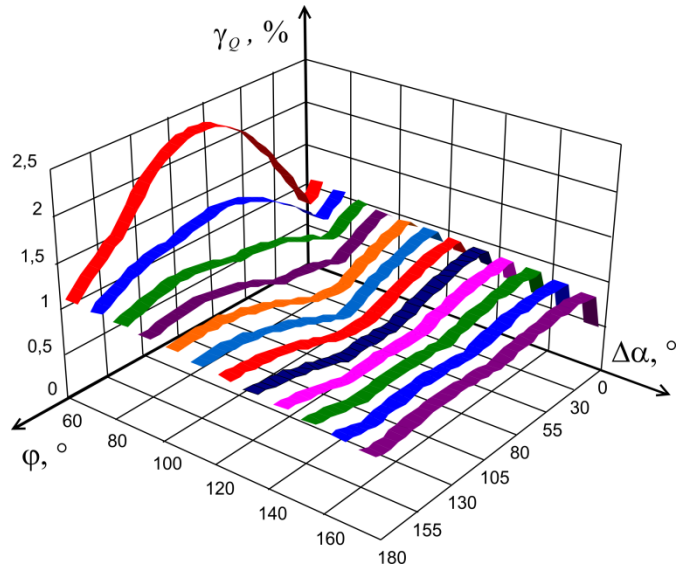


Рис. 6. Графики зависимости  $\gamma_Q$  от  $\Delta\alpha$  и  $\varphi$

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мелентьев В.С., Батищев В.И. Аппроксимационные методы и системы измерения и контроля параметров периодических сигналов. – М.: Физматлит, 2011. – 240 с.
2. Melent'ev V.S., Ivanov Yu.M., Lychev A.O. A method of measuring integral characteristics from the instantaneous values of signals separated in time and space // Measurement Techniques: Volume 57, No. 9, October, 2014. Page 979-984.
3. Мелентьев В.С., Иванов Ю.М., Муратова В.В. Исследование метода измерения интегральных характеристик по мгновенным значениям сигналов, разделенным в пространстве // Известия Волгоградского государственного технического университета. Сер. Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь. – 2014. – Т. 9. – № 10 (137). – С. 52-55.
4. Мелентьев В.С., Ярославкина Е.Е., Павленко Е.В. Исследование влияния погрешности формирования ортогональных составляющих на результат измерения параметров гармонических сигналов / Теоретические и прикладные аспекты современной науки: Сб. науч. трудов по матер. VII Междунар. науч.-практ. конф. – Белгород: АПНИ, 2015. – Ч. 3. – С. 80-82.
5. Мелентьев В.С., Муратова В.В., Таштабанов Б.Н. Новый подход к повышению точности измерения параметров периодических сигналов / Теория и практика современной науки: Матер. XVII науч.-практ. конф. – Москва: Изд.-во «Институт стратегических исследований», 2015. – С. 127-134.
6. Мелентьев В.С. Оценка влияния погрешности формирования дополнительного напряжения на точность измерения параметров гармонических сигналов // Современные материалы, техника и технологии: Науч.-практ. журнал. – 2015. – №1 (11). – С. 146-151.
7. Мелентьев В.С., Муратова В.В., Иванов Ю.М. Метод измерения характеристик периодических сигналов, инвариантный к погрешностям формирования дополнительного сигнала // Известия Самарского научного центра РАН. – 2014. – Т. 16. – № 1(2). – С. 439-443.
8. Иванов Ю.М. Сокращение времени измерения характеристик периодических сигналов на основе формирования дополнительных напряжений // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2014. – № 3 (43). – С. 47-52.

Статья поступила в редакцию 27 мая 2015 г.

## THE USE OF INVERTING THE INPUT SIGNAL TO REDUCE THE TIME MEASUREMENT OF HARMONIC SIGNALS PARAMETERS

*V.S. Melent'ev, E.E. Jaroslavkina, E.V. Pavlenko*

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

*A new method of measuring the parameters (RMS of voltage and current, active and reactive power) by the harmonic- signal instantaneous values which provides the measurement time reduction is considered. In contrast to the methods known which are based on the formation of additional voltage signals, identifying the moments of signal zero crossings, and comparing their instantaneous values, the method realization eliminates modulo errors of the phase-shifting units. A block diagram of the information-measuring system implementing the method is offered. The results of the analysis of the system error due to the actual signal deviation from the harmonic model are given. The results obtained allow to select the appropriate equipment depending on the measurement accuracy requirements.*

**Keywords:** *harmonic signals, instant values, additional signals, phase-shifting units, harmonic model, an error.*

---

*Vladimir S. Melent'ev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.  
Ekaterina E. Jaroslavkina (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.  
Elena V. Pavlenko, Postgraduate Student.*