Вестник научно-технического развития
Bulletin of Science and Technical Development

Номер 179, 2025г.

DOI: 10.18411/vntr2025-179



Издается с 2007 года

Издание зарегистрировано в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.
Свидетельство о регистрации Эл. № ФС77-29768.

ISSN 2070-6847

Журнал выпускается под научным руководством Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН

DOI: 10.18411/vntr2025-179

ОГЛАВЛЕНИЕ № 179, 2025

Леонид Борисович Матусов. О некоторых свойствах равномерности многомерных последовательностей в задачах многокритериального проектирования машин……**стр. 3 – 8**

Николай Алексеевич Серков, Павел Аркадьевич Скворцов. Тенденции развития наноизмерительных и нанотехнологических машин……..……..**стр. 9 – 25**

Александр Анатольевич Шульженко, Михаил Борисович Модестов. Условия распространения в тепловой системе температурных изменений, вызванных реакцией микроциркуляции крови на тепловое воздействие ..…….. **стр. 26 – 36**

Издание зарегистрировано в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации Эл. № ФС77-29768.



ISSN 2070-6847

DOI: 10.18411/vntr2025-179-1

УДК 3054

О НЕКОТОРЫХ СВОЙСТВАХ РАВНОМЕРНОСТИ МНОГОМЕРНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ В ЗАДАЧАХ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ МАШИН

Леонид Борисович Матусов
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А.Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия
matusoff.l@yandex,ru

Аннотация. *Для проектирования механизмов, машин и конструкций, оптимизации их параметров был создан метод исследования пространства параметров (метод ИПП). В основе метода лежит возможность зондировать пространство изменяемых параметров объекта точками равномерно распределенной $ЛП_\tau$- последовательности. Точки $ЛП_\tau$-последовательностей используются здесь для расчета в каждой из них математической модели исследуемой системы. В силу того, что эти точки равномерно распределены в пространстве параметров, мы получаем его равномерный обзор. Чем более равномерно распределена эта последовательность, тем более достоверную информацию о свойствах исследуемого объекта можно получить при расчете системы без увеличения количества этих расчетов в точках последовательности. Только в этом случае данные последовательности могут быть успешно использованы при решении практических задач, относящихся к теории кубатурных формул, в задачах оптимизации машин и механизмов, и т.д.*

Ключевые слова: *равномерно распределенная последовательность, моноциклический оператор, направляющая матрица.*

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2024-0016

ON SOME UNIFORMITY PROPERTIES OF MULTIDIMENSIONAL SEQUENCES FOR MULTICRITERIA MACHINE DESIGN

L.B. Matusov
Mechanical Engineering Research Institute the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
matusoff.l@yandex,ru

Abstract. *A parameter space exploration method (the IPP method) was developed for the design of mechanisms, machines, and structures and the optimization of their parameters. The method is based on the ability to probe the space of variable object parameters using points of a uniformly distributed LP sequence. The points of the LP sequences are used here to calculate a mathematical model of the system under study at each point. Because these points are uniformly distributed throughout the parameter space, we obtain a uniform overview of it. The more uniformly*

distributed this sequence is, the more reliable information about the properties of the object under study can be obtained from calculating the system without increasing the number of calculations at the points of the sequence. Only in this case can these sequences be successfully used to solve practical problems related to the theory of cubature formulas, in machine and mechanism optimization problems, etc.
***Keywords**: uniformly distributed sequence, monocyclic operator, direction matrix.*

***Acknowledgements.** This research was supported by State Assignment from Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation FFGU-2024-0016.*

Введение. Последовательности многомерных точек, могут обладать различными свойствами равномерности [1].Сложность заключается в том, что для решения практических задач эти свойства должны выполняться уже при сравнительно небольших количествах точек. Для того, чтобы выполнить это условие, в статье [2] были сформулированы некоторые дополнительные требования, к равномерно распределенным последовательностям. Данная статья посвящена исследованию одному из таких требований или свойств. Другое свойство исследовано в статье [3].
Рассмотрим K^n – единичный n-мерный куб.

Свойство А. Разобьем куб K^n плоскостями $x_j = I/2$ при j=I, 2, …n на $t = 2^n$ октантов, которые будем считать двоичными параллелепипедами. Разобьем последовательность точек P_0, P_1, …, P_i, … в K^n на двоичные участки, длина которых равна 2^n : P_0, …, P_{t-1},P_t, …, P_{2t-1}, P_{2t}, …, P_{3t-1}, … . Если в любом из этих участков все точки принадлежат различным октантам, то мы говорим, что последовательность обладает свойством А.
Согласно [2] справедлива теорема:
ЛП$_\tau$ - последовательность P_0, P_1, …, P_i, … обладает свойством А тогда и только тогда, когда определитель (размером n x n), составленный из первых столбцов всех направляющих матриц, равен I (mod 2).
Данная теорема дает возможность строить ЛП$_\tau$ - последовательности со свойством А. Однако остается открытым вопрос: можно ли в качестве последовательности операторов $\{L_k\}$ брать все операторы низших порядков. Вопрос обоснован тем, что именно в этом случае значение τ будет минимальным, что наилучшим образом отразиться на всех характеристиках равномерности. Чтобы ответить на него рассмотрим следующие утверждения.
Пусть L_1 , L_2 , …, L_n – различные моноциклические операторы с порядками m_1 , m_2 , …, m_n соответственно.
Лемма 1. Пусть $p^j(i)$ – есть DP – последовательности, соответствующие всем моноциклическим операторам низших порядков L_1 , … L_n . Пусть m- порядок оператора L_n. Тогда справедливо следующее неравенство:

$$n+\frac{m(m+1)}{2} < 2^m \quad \text{при } m\geq 5 \qquad (1)$$

Доказательство. Доказательство проведем индукцией по m. При m=5 неравенство справедливо, т.к. максимальное n при этом равно 13 [2]. Пусть для некоторого m имеет место (1) при любом n, соответствующем данному m. Докажем, что при любом n, соответствующем m+I, будет выполняться аналогичное неравенство. Учитывая, что число

моноциклических операторов порядка m+I равно $\frac{\varphi\left(2^m-1\right)}{m+1}$, (где φ(к) – теоретико – числовая функция Эйлера, равная количеству натуральных чисел меньших к и взаимно простых с к) докажем, что

$$n + \frac{\varphi\left(2^m-1\right)}{m+1} + \frac{(m+1)(m+2)}{2} < 2^{m+1}$$

Преобразуем данное неравенство следующим образом:

$$n + \frac{\varphi\left(2^{m+1}-1\right)}{m+1} + \frac{(m+1)m}{2} + m + 1 + < 2^m + 2^m$$

Сравнивая его с (1), остается показать, что $\frac{\varphi\left(2^{m+1}-1\right)}{m+1} + m+1 \Big| < 2^m$

т.е. $\varphi(2^{m+1}-1) + (m+1)^2 < (m+1)\,2^m$

Очевидно, что $\varphi(2^{m+1}-1) + (m+1)^2 < 2^{m+1} - 1 + (m+1)^2 < (m+1)\,2^m$

Окончательно имеем $(m+I)^2 - I < (m-1)\,2^m$

Таким образом, приходим к очевидному неравенству, которое справедливо при m≥3.

Пусть m(n)- порядок моноциклического оператора, стоящего на n- ом месте в последовательности всех моноциклических операторов, взятых подряд.

Лемма 2. Рассмотрим n-I последовательность элементов GF(2) $\{u_i^{(k)}\}$, k=1, …, n-1, i=0,1,2,… Пусть к данному набору принадлежит последовательность, состоящая из единиц, и пусть определитель

$$\begin{vmatrix} u_1^{(1)} \ldots\ldots u_{n-1}^{(1)} \\ \ldots\ldots\ldots\ldots \\ u_1^{(n-1)} \ldots u_{n-1}^{(n-1)} \end{vmatrix} = 1 \pmod 2$$

Рассмотрим моноциклический оператор L_n порядка m≥ m(n), m≥5. Тогда существует такое решение оператора L_n - $\{u_i^{(n)}\}$, что определитель

$$\begin{vmatrix} u_1^{(1)} \ldots\ldots u_{n-1}^{(1)} u_n^{(1)} \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ u_1^{(n-1)} \ldots u_{n-1}^{(n-1)} u_n^{(n-1)} \\ 1 \ldots\ldots\ldots u_{n-1}^{(n)} u_n^{(n)} \end{vmatrix} = 1 \pmod 2 \qquad (2)$$

Доказательство. Допустим обратное: как-бы ни выбирать первые m значений решения оператора L_n определитель (2) равен 0 (mod 2). Т.к. столбцы предыдущего определителя линейно независимы, то первые n-I элемент последнего столбца в (2) единственным образом

выразятся через эти столбцы. Но в силу указанного предположения, последний элемент n-ого столбца в (2) должен таким же образом выражаться через элементы n-ой строки, принадлежащие соответствующим столбцам в (2), при любом выборе первых m значений последней строки в (2). Т.е. для последней строки имеем

$$u_n^{(n)} = \sum_{k=1}^{n-1} c_k u_k^{(n)} \quad , \; c_k \in \{0,1\} \text{ или} \qquad (3)$$

$$u_{i_0}^{(n)} = \sum_{k=1}^{n-1-i_0} c_{i_0+k} u_{i_0+k}^{(n)} + u_n^{(n)}, \; c_{i_0} = 1 \, , (c_i = 0 \quad \text{при} \quad i<i_0)$$

при произвольных, начинающихся с единицы, первых m значениях этой строки. Это означает, что любое решение моноциклического оператора L_n является решением линейного разностного оператора порядка $n-i_o$

$$L^*(u_i) = u_i + \sum_{k=1}^{n-1-i_0} c_{i+k} u_{i+k} + u_{i+n-i_0}$$

Действительно пусть $\{ u_i^{(n)} \}$- решение моноциклического оператора L_n. Если в качестве последней строки в (2) взять любой участок этого решения, начинающийся с 1, то получим (3). Возьмем произвольный участок длины n, начинающийся с нуля. Его, в силу того, что первые m значений можно выбирать произвольно, представим в виде суммы двух участков той же длины, начинающихся с 1. А т.к. для этих участков выполняется (3), то (3) справедливо и для данного участка, начинающегося с 0. Т.е. при любых начальных значениях $u_1^{(n)}$, $u_2^{(n)}$, …, $u_m^{(n)}$ выполняется (3). А это и означает, что всякое решение моноциклического оператора L_n порядка m, является решением линейного разностного оператора $L^*(u_i)$. Раз это так, то многочлен, соответствующий $L^*(u_i)$ должен делиться на многочлен, соответствующий оператору L_n. Пусть

$$x^{n-i_0} + a_{n-i_0-1} x^{n-i_0-1} + \ldots + a_1 x + 1 \qquad (4)$$

многочлен над полем GF(2), соответствующий оператору L*. Покажем, что если многочлен, соответствующий L_n,

$$x^m + a_{m-1} x^{m-1} + \ldots + a_1 x + 1 \qquad (5)$$

является делителем многочлена (4), то он будет делителем некоторого многочлена большей степени, у которого нет в качестве слагаемых одночленов вида $x^к$, где $к \leq m$, за исключением 1.

Пусть (4) содержит в качестве слагаемого некоторый одночлен $x^к$. где $к \leq m$ (т.е. $a_к = 1$).

Умножая (4) на $x^к + I$, получим многочлен степени $n-i_o + k$, у которого коэффициент при $x^к$, т.е. $a_к = 0$.

Аналогично можно поступить с любым слагаемым степени не большей m. Получим многочлен, у которого степень предпоследнего члена больше m, а максимальная степень самого многочлена равна $n-i_0+\frac{m(m+1)}{2}$,т.е.

$$x^{n-i_0+\frac{m(m+1)}{2}} + \ldots + a_{m+1} x^{m+1} + 1 \qquad (6)$$

Если многочлен (5) делит (4), то он должен делить и многочлен (6). С другой стороны (6), как и многочлен (4) содержит четное число слагаемых, т.к. по условию этой леммы одна из строк (2) состоит из единиц. Поэтому (6) можно представить в виде суммы двучленов.

$$(x^{n-i_0+\frac{m(m+1)}{2}}+1)+\ldots+(x^{m+p}+1) \qquad (p>0) \qquad (7)$$

Разделим каждый из этих двучленов на (5). Т.к. (5) соответствует моноциклическому оператору L_n порядка m, то, согласно [1], является делителем двучлена $(x^{2m-1}+I)$, но не является делителем никакого двучлена x^s+1, где $s<2^m-I$. Но в силу леммы 1 степень многочлена (6) меньше 2^m-I. Поэтому, разделив почленно (7) на (5), получим $(x^m + \ldots + a_1x+1)(x^{p_1} + \ldots + x^{p_1-c_1}) + +x^{k_1} + \ldots + 1 + \ldots + (x^m + \ldots + a_1x+1)(x^{p_k} + \ldots + x^{p_k-c_k}) + x^{k_l} + \ldots + 1 = (x^m + \ldots + +a_1x+1)(x^c + \ldots + x^d) + x^k + \ldots + 1$,

где $k_i<m, k<m$. Остаток от деления, $x^k + \ldots + 1 \neq 0 \pmod 2$, т.к. при делении каждого из двучленов (7) на (5) остаток содержит 1.Двучленов – нечетное число, поэтому суммарный остаток также содержит 1. Таким образом многочлен (6) не делится на многочлен (5). Противоречие.

Теорема. Существуют такие начальные условия для первых столбцов направляющих матриц, что последовательность точек $P_i=(p^1(i), \ldots p^n(i))$, построенная по последовательности всех взятых подряд моноциклических операторов, при каждом n обладает свойством А.

Доказательство. Доказательство проведем по индукции. Легко проверить, что теорема справедлива до n = 7 (m(8)=5). Пусть она справедлива при некотором n>7. Но это означает, что выполняются условия леммы 2. И если рассмотреть любой моноциклический оператор L_{n+1} , порядок которого такой же, как у L_n или на единицу больше, то в силу леммы 2 ,у решения этого оператора найдется начинающийся с I участок длины n+I, такой что

$$\begin{vmatrix} 1 & u_2^{(1)} & \ldots\ldots & u_n^{(1)} & u_{n+1}^{(1)} \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ 1 & u_2^{(n)} & \ldots\ldots & u_n^{(n)} & u_{n+1}^{(n)} \\ 1 & u_2^{(n+1)} & \ldots & u_n^{(n+1)} & u_{n+1}^{(n+1)} \end{vmatrix} = 1 \pmod 2 \qquad (8)$$

При этом все угловые определители (8) равны I (mod 2). Как следует из [2], это доказывает справедливость теоремы при n+I. Теорема доказана.

Выводы.

1.В статье исследовано дополнительное свойство равномерности ЛП$_\tau$ - последовательностей, имеющее важное значение при решении практических задач проектирования машин и конструкций.

2. Доказано, что можно строить ЛП$_\tau$ - последовательности со свойством А таким образом, чтобы в качестве последовательности операторов $\{L_k\}$ брать все операторы низших порядков. Именно в этом случае значение τ будет минимальным, что наилучшим образом отражается на всех характеристиках равномерности. Это дает возможность

обеспечить достаточно хороший обзор пространства проектируемых параметров машины при сравнительно небольшом объеме вычислений.

Список литературы

1. Соболь И.М. Многомерные квадратурные формулы и функции Хаара. – М.: Наука, 1969. – С.288.
2. Соболь И.М. Точки, равномерно заполняющие многомерный куб. – М.: Знание, 1985. - С.57.
3. Матусов Л.Б. О расширении класса равномерно распределенных ЛП$_\tau$-последовательностей для расчета и векторной оптимизации параметров машин // Вестник научно -технического развития. – 2024. - №175. - С.25-29.

Дата поступления: 19 ноября 2025 г.

DOI: 10.18411/vntr2025-179-2

УДК 620.3

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ НАНОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И НАНОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН

© Николай Алексеевич Серков, Павел Аркадьевич Скворцов
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия
Serkov1943@mail.ru

Аннотация. *Рассмотрены достижения в развитии прецизионных многокоординатных машин с нанометрической точностью позиционирования в рабочем объёме ∅300 мм на Z = 50 мм. Эти машины, в первую очередь, предназначены для использования в области оптической литографии и функционализации поверхностей с помощью наноструктур для создания продуктов с ранее неизвестными свойствами. Новые принципы конструирования несущих систем (НС) и накопленный опыт при создании таких машин может быть применены при проектировании, изготовлении и эксплуатации также прецизионных многокоординатных металлорежущих станков, роботов и КИМ субмикронной точности.*
Ключевые слова: *нанотехнология, наноизмерения, наномашина, лазерный интерферометр, планарный механизм, материал Zerodur, ситалл-ЛГ, калибровка.*

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2024-0016.

TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF NANOMEASURING AND NANOTECHNOLOGY MACHINES

© N.A. Serkov, P.A. Skvortsov

Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
Serkov1943@mail.ru

Abstract. *The achievements in the development of precision multi-coordinate machines with nanometric positioning accuracy in the working volume of ∅ 300 mm by Z = 50 mm are considered. These machines are primarily intended for use in the field of optical lithography and surface functionalization using nanostructures to create products with previously unknown properties. The new principles of design of load-bearing systems (NS) and the accumulated experience in the creation of such machines can be applied in the design, manufacture and operation also in precision multi-axis submicron precision metal cutting machines.*
Keywords*: nanotechnology, nanoscale measurements, nanomachine, laser interferometer, planar mechanism, Zerodur, material ситалл-ЛГ, calibration.*

Acknowledgements. *This research was supported by State Assignment from Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation FFGU-2024-0016.*

Введение. В работе [1] отмечается, что полупроводниковая промышленность может существенно измениться в сторону мелкосерийного и индивидуального производства по причине широкого распространения индивидуального дизайна и решений для конкретных приложений, которые будут доминировать в будущем. В работе [2] отмечается, что **функционализация поверхностей с помощью наноструктур обладает огромным потенциалом для создания продуктов с ранее неизвестными свойствами и является предметом текущих международных исследовательских инициатив.** (Функционализация – это процесс придания материалу новых свойств или функций путем модификации его поверхности или структуры. В химии и материаловедении, функционализация часто подразумевает введение в молекулу или на поверхность материала химически активных групп, которые позволяют материалу взаимодействовать с другими веществами или выполнять определенные функции.)

В работе Мур GE (2006) [3] говорится, что при «впихивании» большего количества компонентов в интегральные схемы существует проблема регулярно измерять, контролировать и структурировать на атомном уровне, т.е. работать с дискретностью – ангстрем (внесистемная единица измерения длины, равная 10^{-10} м (1 Å = 100 пм = 0,1 нм; 10 000 Å = 1 мкм).

Анализ тенденций развития наноизмерительных и нанотехнологических машин

Точное позиционирование на уровне нанометров стало одним из важнейших требований при разработке прецизионного технологического оборудования для прецизионного машиностроения.

В работе [4] (**2001 г.)** представлены результаты разработки комбинированной системы, построенной на известных принципах и включающей наружный (точность 10 мкм) и внутренний (точность 10 нм) контур системы позиционирования. В качестве наружного контура используется серводвигатель на основе шарико-винтовой пары и традиционного датчика обратной связи (угла поворота), а в качестве внутреннего – пьезопривод и лазерный интерферометр в качестве датчика обратной связи. Это стало возможным благодаря применению **абсолютного метода измерения положения** [5-7] (метода дисперсионной интерферометрии с использованием фемтосекундного импульсного лазера) вместо инкрементального метода.

Другим принципиальным новшеством является использование в комбинированной системе для устранения шумовых составляющих при движении специально разработанного цифрового фильтра Чебышева. Было установлено, что реализованный цифровой фильтр повышает точность позиционирования в три раза. Точность позиционирования была достигнута в пределах 10 нм при ходе 200 мм.

Однако следует отметить, что в данной работе решена задача высокоточного позиционирования по одной линейной координате и остается не ясным вопрос использования полученных результатов для создания систем точного движения по криволинейной траектории с использованием многокоординатного оборудования с многокоординатными интерполяторами.

Для решения этой задачи предложен принципиально другой подход в работе [8] **2004 г.**

Чтобы уйти от «слоённой» конструкции платформы, перемещающейся в плоскости по двум независимым координатам X, Y предложено использовать платформу, перемещающуюся в плоскости (X, Y, θ_Z) на аэростатических подшипниках и приводимой в движение с помощью четырёх двухфазных линейных двигателей в направлениях X и Y (рис. 1).

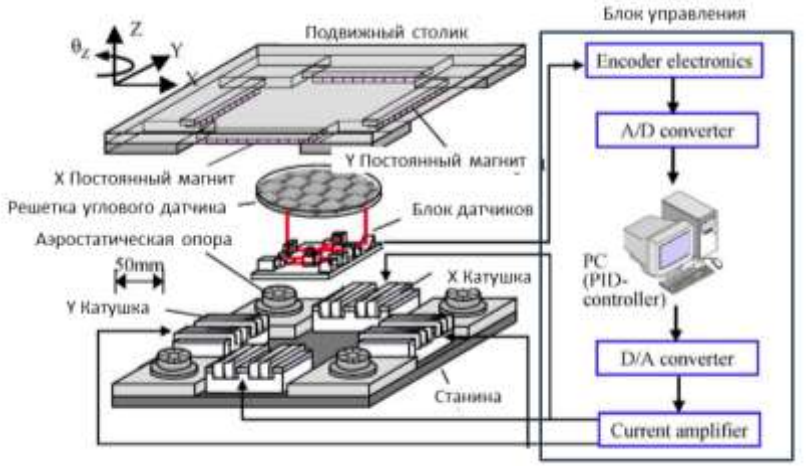


Рис. 1. Конструктивная схема устройства движения стола в плоскости.

Сенсорный блок поверхностного энкодера состоит из двух линейных и одного углового интерферометра (решетка углового датчика и блок датчиков).

Исследования подтвердили, что **разрешение энкодера** составляет **~ 20 нм** в направлениях X и Y и 0,2″ в направлении угла поворота θ вокруг оси Z. Поверхностный энкодер был интегрирован в прототип планарной платформы XY. **Ход платформы составляет 40 мм**. Эксперименты по позиционированию продемонстрировали, что платформа может управляться независимо в направлениях X и Y с точностью **200 нм** и **1″** по углу поворота θ вокруг оси Z. Выявлено, что для повышения точности позиционирования во всем рабочем диапазоне требуется провести процесс калибровки и компенсации. Также требуется разработать дополнительные системы измерения и управления движения платформы: тангаж (θ_X), качение (θ_Y).

2009 г. В работе [9] описана конструкция и результаты экспериментальных исследований машины для нанопозиционирования и наноизмерений NMM-1, разработанной Институтом измерения процессов и сенсорных технологий Технического университета Ильменау, Германия и изготовленной компанией SIOS Messtechnik GmbH, Германия. Машина реализует режим сканирования образца в диапазоне 25×25×5 мм с разрешением 0,1 нм. (рис.2). В ней реализовано активное управление наклоном платформы со сканируемым образцом, реализуемое системой из четырех z-приводов. Таким образом достигается точное плоскопараллельное движение во всем рабочем объеме NMM-1 и изначальная недостаточная точность механических направляющих для перемещения по осям x, y и z не влияет на общую точность машины, поскольку неизбежные отклонения компенсируются замкнутой системой управления (системой из четырех z-приводов). Погрешность сканирования составляет σ = 2,6 нм при использовании измерительной головки, разработанной фирмой NPL (Англия) [10,11].

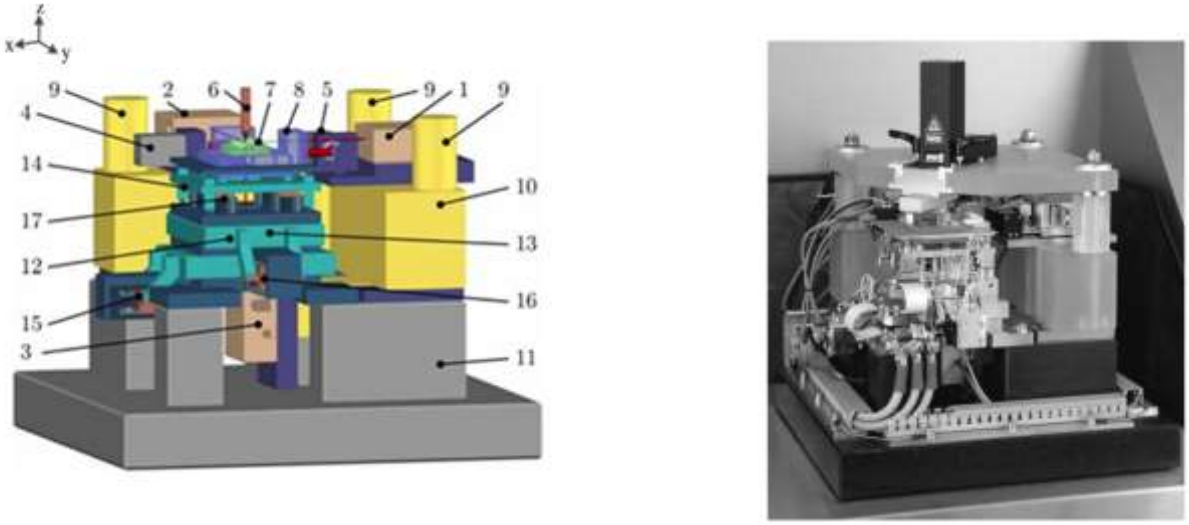


Рис. 2. Общий вид и компоновочная схема наномашины NMM-1: 1 - интерферометр X, 2 - интерферометр Y, 3 - интерферометр Z, 4 – датчик угла поворота платформы вокруг осей Y, Z (φ_y, φ_z), 5 - датчик угла поворота платформы вокруг осей X, Z (φ_x, φ_z), 6 измерительная головка, 7 – сканируемый объект, 8 – «угловое» зеркало (отражатель для интерферометров X, Y), 9 – колона из Zerodur, 10 рама из Zerodur для установки датчиков, 11 – станина для направляющих качения (12 – ось X, 13 – ось Y, 14 – ось Z,15 - привод X, 16 - привод Y, 17 - привод Z.

Следующим этапом развития рассматриваемого направления является разработка, описанная в работе [12] **2011 г.** Создана универсальная нанопозиционирующая и наноизмерительная машина NPMM-200 с рабочим объемом 200×200×25 мм и разрешением 0,02 нм. Общий вид и компоновочная схема наномашины NPMM-200 показана рис. 3.

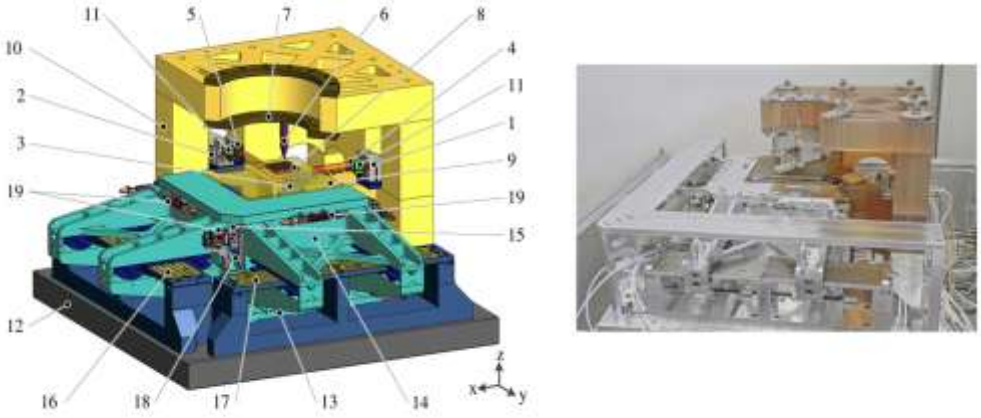


Рис. 3. Общий вид и компоновочная схема наномашины NPMM-200: 1 - интерферометр X, 2 - интерферометр Y, 3 - интерферометр Z, 4 – датчик угла поворота платформы вокруг осей Y, Z (φ_y, φ_z), 5 - датчик угла поворота платформы вокруг осей X, Z (φ_x, φ_z),, 6 измерительная головка, 7 – измерительная головка, 8 – сканируемый объект, 9 – зеркальная панель (отражатель для интерферометров), 10 рама из Zerodur для установки датчиков, 11 – датчики нуля наномашины, 12 – гранитная плита наномашины, 13 - роликовые направляющих качения (13– ось X, 14 – ось Y, 15 – ось Z), 16 - привод X, 17 - привод Y, 18 - привод Z и компенсаторы веса подвижных узлов наномашины [13].

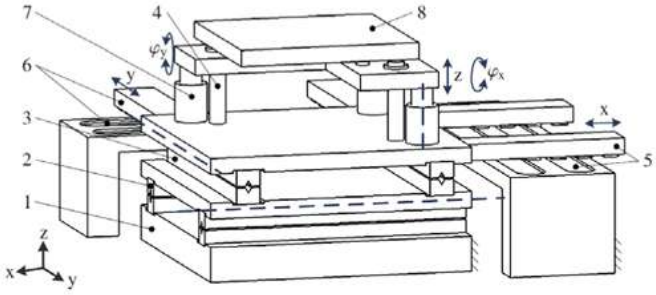


Рис. 4. Схема конструкции несущей системы с приводами наномашины NPMM-200: 1 – базовая плита из алюминиевого сплава, 2 – роликовые направляющие качения (2 – x, 3 – y, 4 – z), 5 двигатели (5 - x, 6 – y, 7 – z), 8 - зеркальная панель.

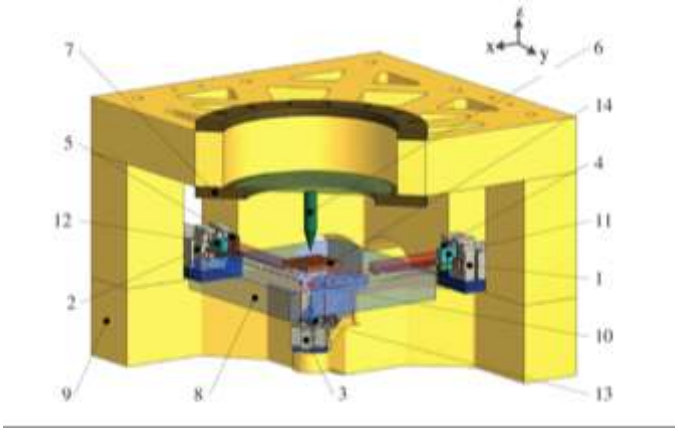


Рис. 5. Схема конструкции несущей метрологической системы с датчиками наномашины NPMM-200: 1 – интерферометр оси X, 2 - интерферометр оси Y, 3 – интерферометр оси Z, 4 – датчик угла φ_y и φ_z, 5 - датчик угла φ_x и φ_z, 6 – измерительная головка, 7 – присоединительная плата измерительной головки, 8 – зеркальная плата, 9 – метрологическая ферма из Zerodur, 10 – точка Abbe, 11 – датчик нуля для оси x, 12 - датчик нуля для оси y, 13 - датчик нуля для оси z, 14 – измеряемый или сканируемый объект.

В работе [14] отмечается, что угловые отклонения позиционируемой платформы в данной наномашине измеряются тремя дополнительными угловыми интерферометрами и корректируются двигательной системой в направлении Z. Таким образом в NPMM-200 используется шестиосевая система лазерных интерферометров с волоконной связью (рис. 6). В качестве обобщенных характеристик точности наномашины NPMM-200 можно указать: 1) рабочий орган или измерительная головка позиционируется в любой точке в пределах измерительного объема (200 мм × 200 мм × 25 мм) с повторяемостью 4 нм (k = 2), 2) рабочий орган наномашины в вертикальном направлении может перемещаться шагами в субнанометровом диапазоне. На рис. 7 показаны результаты позиционирования выполненных в вертикальном направлении Z вверх и вниз: а) шаг - 1 нм, б) - 80 пм. Шум на каждом плато в основном не превышает ±60 пм, а иногда менее ±30 пм. Стоит отметить, что позиционируемая платформа весит около 24 кг.

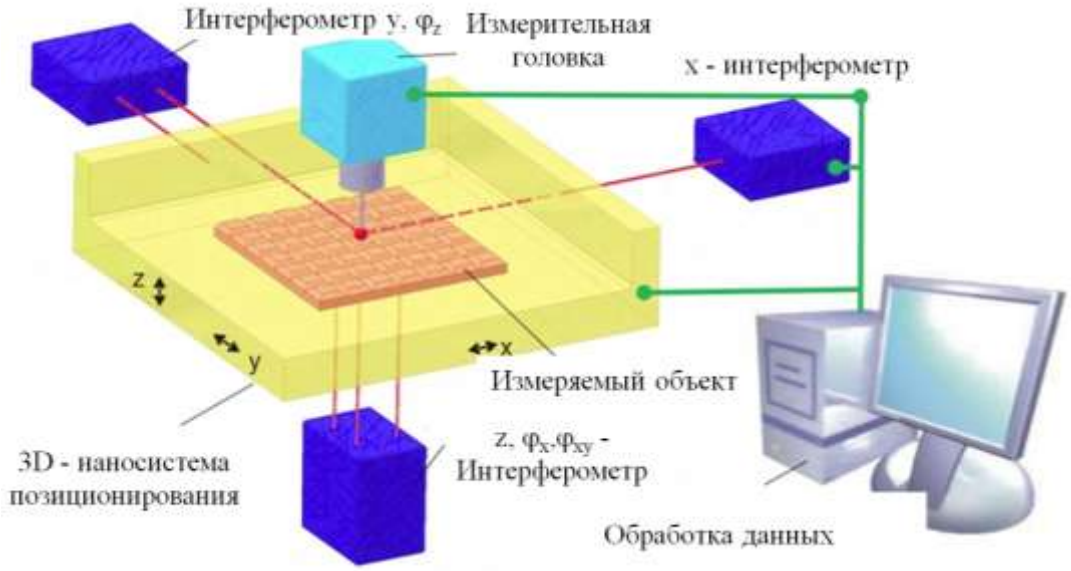


Рис. 6. Метрологическая схема измерений наномашины NPMM-200

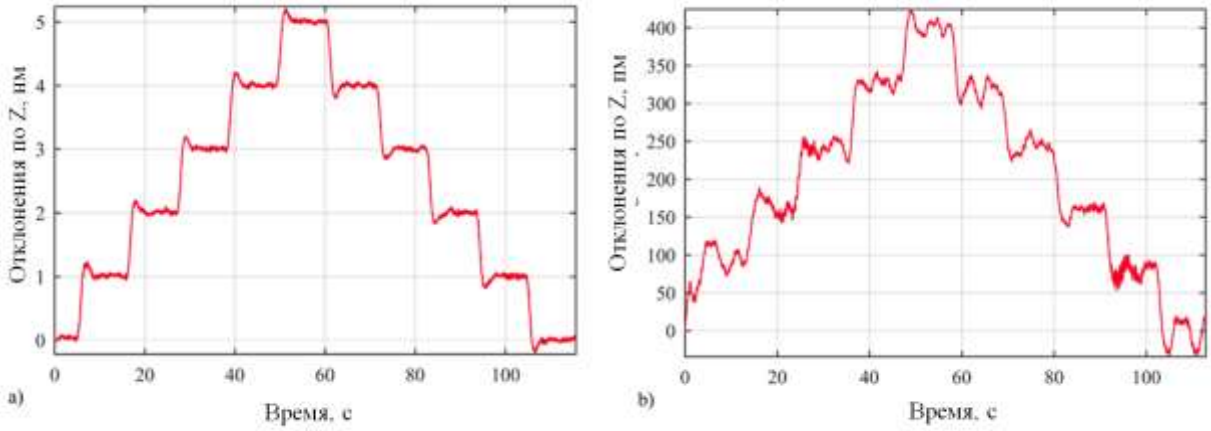


Рис. 7. Результаты перемещения рабочего органа наномашины NPMM-200 по оси Z: а) с шагом 1 нм, б) с шагом 80 пм.

Существует несколько стандартов высоты ступеней, специально предназначенных для калибровки сканирующих микроскопов. Сравнительный анализ наноступенчатых измерений на расстоянии от 7 нм стандарты высоты ступени в 1000 нм очень хорошо представлены в работе [15], по крайней мере, с погрешностями в 1 нм (k = 2). Для экспериментальных исследований наномашины NPMM-200 использовались специальные стандарты высоты ступеней, изготовленные из кварца в диапазоне 1-5 мм. Измерение высоты ступеней производилось с помощью лазерного датчика фокусировки [16], который в настоящее время также выпускается компанией SIOS Messtechnik GmbH на коммерческой основе.

В работе [17] **2011 г.** представлены результаты исследования планарной установки, которые предшествовали созданию наномашины NPMM-200.

В данной работе представлена децентрализованная схема управления планарной установки точного позиционирования. Отмечается, что для достижения оптимального времени измерения при увеличенных диапазонах перемещения необходимо динамическое позиционирование и измерение во время движения. В этом случае трение, создаваемое шарикоподшипниками, является основной проблемой при создании системы управления. Таким образом, точное моделирование трения и компенсация имеет решающее значение для динамического позиционирования с точностью до нанометра. Предлагаемый метод управления базируется на использовании пространства состояний на основе модели в сочетании с наблюдателем помех. При разработке контроллера используется модель упругопластического трения.

Исследования проведены на установке с рабочими перемещениями 200 х 200 мм **при сохранении принципа планарности.** Механическая конструкция представляет собой двойную Н-структуру (рамка в рамке). Это означает, что «внутренняя» ось расположена внутри «внешней» оси. Общий вид установки представлен на рис. 8.

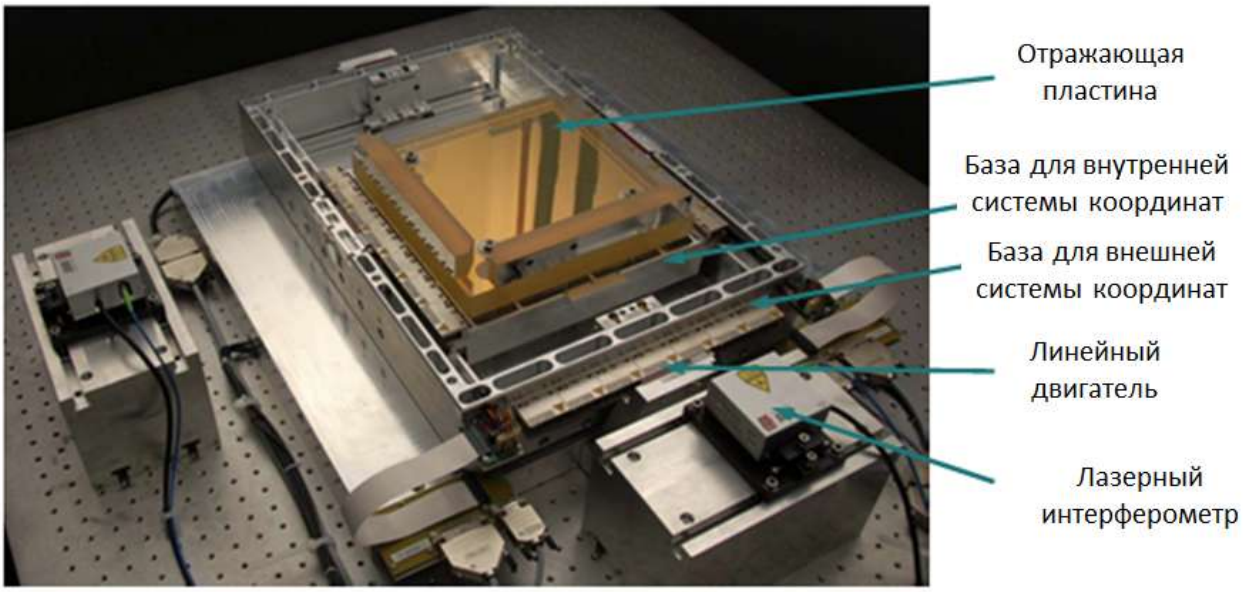


Рис. 8. Общий вид прецизионной планарной установки, работающей в плоскости XY.

Двигатели питаются от аналоговых усилителей собственной разработки. Коммутация двигателей осуществляется системой управления в соответствии с напряженностью магнитного поля, измеряемой встроенными датчиками Холла. Рабочий диапазон позиционирования отражающей зеркальной пластины, несущей измеряемый или сканируемый объект, составляет **200 х 200 мм.** Каждая ось поддерживается двумя линейными V-образными высокоточными направляющими качения. Положение пластины по каждой координате X и Y измеряется стабилизированными He-Ne-лазерными интерферометрами **с разрешением 0,1 нм** [18]. Высокоточные «зеркальные» отражатели установлены на пластине стола, изготовленного из материала Zerodur (стеклокерамики с коэффициентом теплового расширения, равным $0 \pm 0.007 \times 10^{-6}$ K^{-1} в диапазоне температур 0 ÷ 50 °C). Для сбора данных и управления используется модульная система реального времени dSpace в сочетании с Matlab/Simulink R. Система управления работает с частотой

дискретизации 10 кГц. Динамическим поведением усилителя и двигателя в данной работе пренебрегают, т. к. общая частота среза превышает 10 кГц. В этом случае, приложенная сила F(t) к столику со стороны линейного двигателя пропорциональна выходному сигналу усилителя, току i(t).

$$F(t) = k_A \cdot i(t)$$

Используется декартовая система координат, направляющие качения расположены перпендикулярно друг другу. Механическая конструкция представляет собой двойную H-структуру (рамка в рамке), поэтому движущая сила от приводов действует на высоте в близи центра тяжести подвижной платформы вдоль каждой оси. В связи с этим сделано предположение, что динамические системы вдоль оси X и оси Y моделируются, как отдельные системы.

$$F(t) = m \cdot \ddot{x}(t) + F_f(t).$$

Движущая сила используется для придания ускорения массе m и преодоления силы трения $F_f(t)$. Для представления силы трения используется модель упругопластического трения, которая была введена Дюпоном [19]. Эта модель основана на предположении, что поверхности двух «трущихся» объектов состоят из маленьких «щетинок», которые взаимодействуют друг с другом (рис. 9). «Щетинки» характеризуются коэффициентом жесткости σ_0 и коэффициентом демпфирования σ_1. Аналогичный подход использовался в работе [20].

В данной работе рассматриваются вопросы моделирования и управления при точном позиционировании столика в плоскости XY при наличии трения качения. Основой предлагаемой схемы управления является ПИ-регулятор. Для моделирования системы используется упругопластическая модель трения. Для проектирования регулятора была получена и использована упрощенная модель.

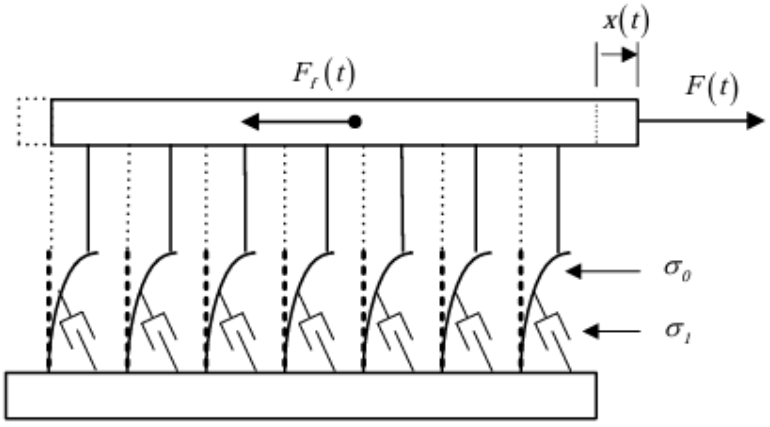


Рис. 9. Модель силы трения («щетинка»).

В экспериментальном исследовании предложенный подход, основанный на модели силы трения, сравнивается с ПИД-регулятором без учета трения. В качестве тестовых траекторий были выбраны синусоидальное движение, движение по прямой и круговое движение.

На рис. 10, а) показаны фактическое положение (синяя кривая x), расчётное положение (зелёная кривая x_{ref}) и отклонения в позиционировании (красная кривая) для случая, когда

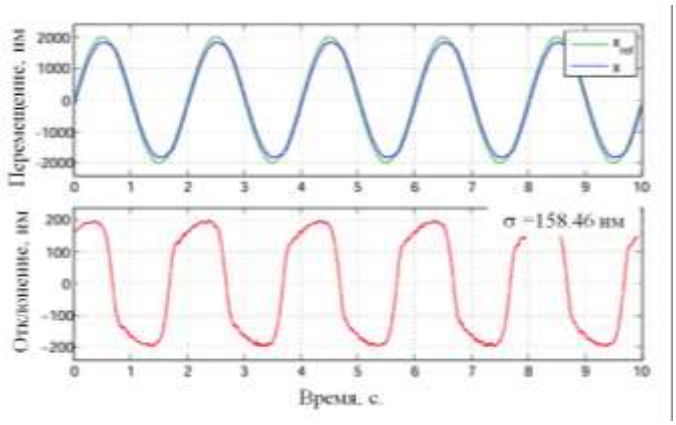
узел с трением не охвачен отрицательной обратной связью. Рассматривается ошибка отслеживания для синусоидального движения с амплитудой a = 2 мкм (2000 нм) и частотой: f = 0,5 Гц

$$x_{ref} = a \sin(2\pi ft).$$

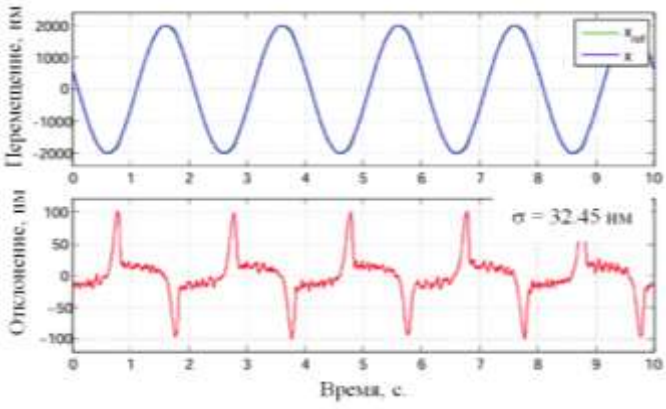
Максимальное отклонение составляет 200 нм, а среднеквадратичное отклонение (СКО) составляет σ = 158,64 нм. Напротив, на рис.12, б) показана ошибка отслеживания с регулятором в пространстве состояний (узел с трением охвачен отрицательной обратной связью и обычный PID-регулятор). Наблюдается явное улучшение, и СКО снижается до σ = 32,45 нм.

Однако всё ещё наблюдаются большие отклонения в точках реверса, где скорость равна нулю и система «застревает». Это можно объяснить тем, что в этот момент проявляется действие «упругого зазора».

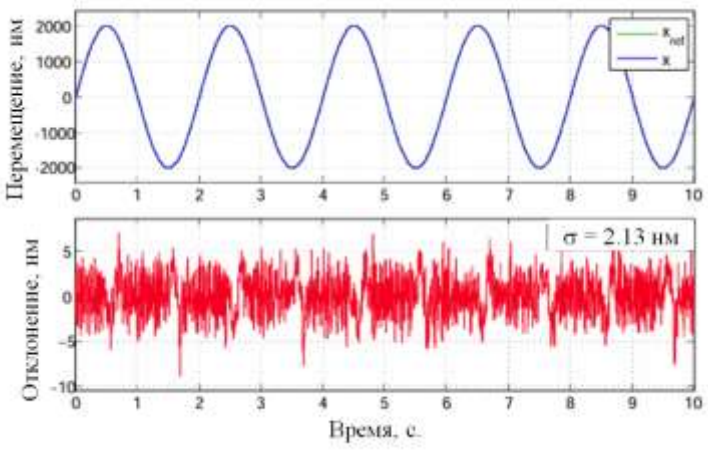
На рис. 10, в) показана ошибка отслеживания при использовании дополнительного наблюдателя возмущений. Видно, что фильтр Калмана способен компенсировать неучтенные эффекты. Предлагаемая комбинация контроллера пространства состояний и наблюдателя возмущений приводит к хорошим результатам отслеживания. Максимальная ошибка снижена до 8 нм, а среднеквадратичное отклонение (СКО) также минимизировано до σ = 2,13 нм.



а)



б)



в)

Рис. 10. Результаты экспериментального исследования движения платформы по окружности (приводятся сигналы по координате x).

В наномашине NFM-100 [21] используется идея планарной схемы rrr[3] и «прямого» привода [22]. На рис. 11 показан вид сбоку на установку. В качестве измерительного инструмента (прибора сравнения) установлена измерительная система на основе зонда. Эта АСМ-система использует активные микроконсольные датчики и имеет трёхмерный диапазон перемещения 10 мкм x 10 мкм x 5 мкм благодаря пьезоэлектрическому сканирующему устройству. Эти микроконсольные датчики для повышения чувствительности приводятся в наноколебания термомеханическим приводом. Этот привод состоит из различных слоёв с различными коэффициентами теплового расширения. Считывание отклонения кантилевера (измерительного наконечника) осуществляется с помощью моста Уитстона. Скорости сканирования до 50 мкм/с уже были продемонстрированы с помощью этой системы на основе зонда в [23].

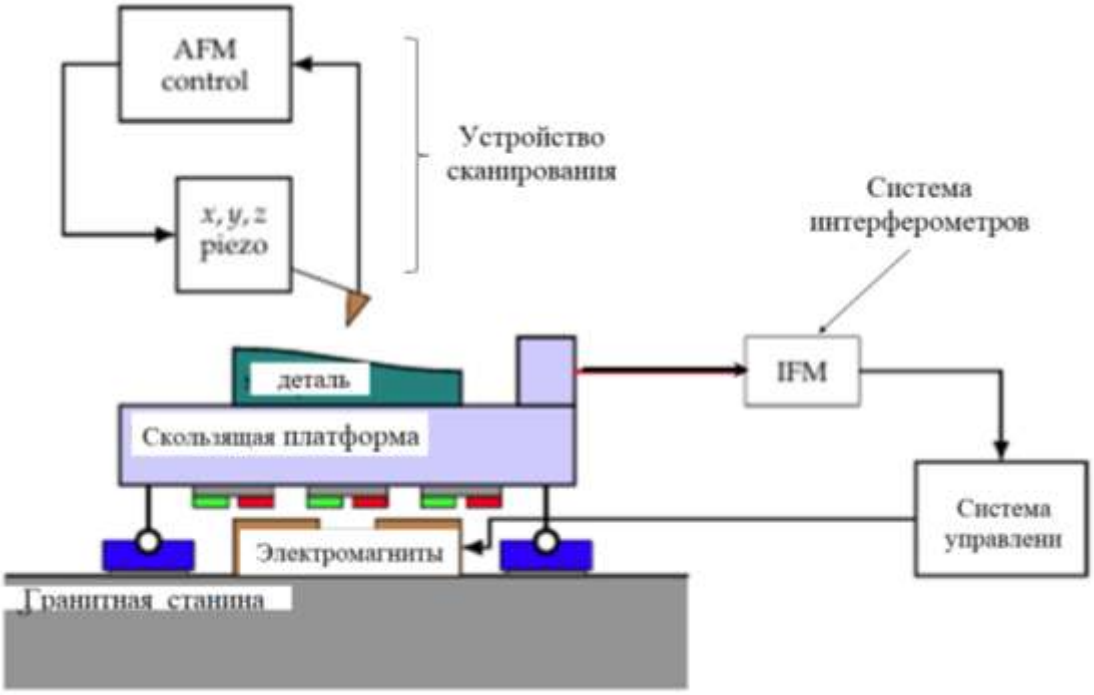


Рис. 11. Схема установки с устройством сканирования

Вся установка работает в климат-контролируемой и виброизолированной среде. Платформа скользит на трёх аэростатических подшипниках и её положение в плоскости измеряется дифференциальными интерферометрами (IFM). Системы измерения и приводы расположены в одной плоскости под углом 120 градусов друг к другу (рис. 11 и рис.12 [22]).

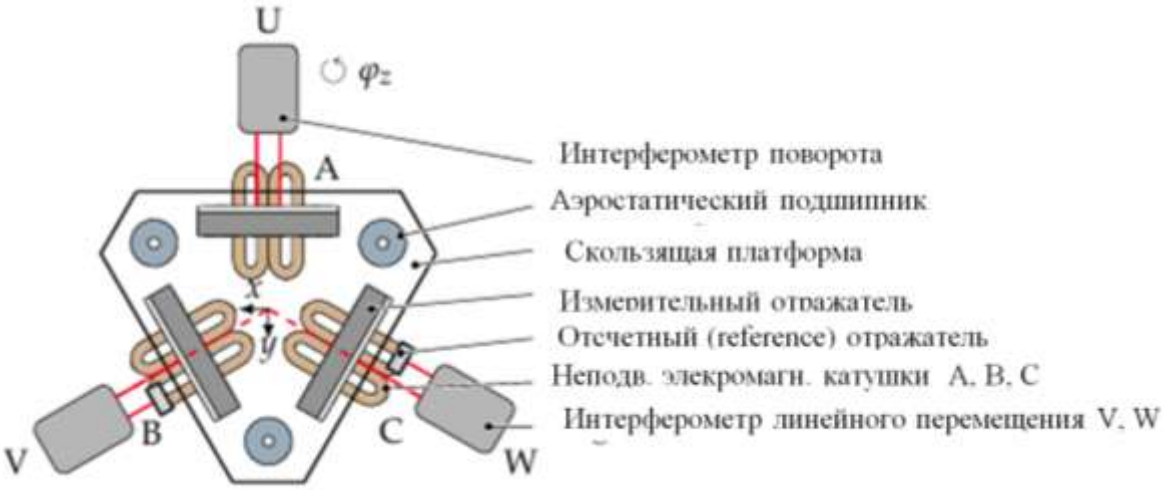


Рис. 12. Схема скользящей платформы наномашины NFM-100.

Аэростатические направляющие имеют «низкое» трение и «низкий» уровень вибрации во время движения [23-24].

Отсутствие «механического» контакта при таком типе направляющих позволяет исключить эффекты «прерывистого» скольжения. Это обеспечивает высокую повторяемость точности позиционирования [25].

Наномашина NFM-100 может быть оснащена различными инструментами и использоваться как технологическая наномашина, так и измерительная наномашина с применением сканирующего атомно-силового микроскопа.

Точность движения платформы по траектории окружность с радиусом 1 мм и окружной скоростью 10 мм/с. составляет (отклонение по радиусу) σ = 3,107 нм, а по углу φ_z σ = 354 нрад (нанорадиан). На рис. 13 представлена CAD модель наномашины NFM-100 со сканирующим атомно-силовым микроскопом.

Из рис. 11 и рис. 13 видно, что сканирующий атомно-силовой микроскоп и узел «скользящая платформа» размещены **раздельно** на гранитной станине. Это положительно сказывается на точности работы наномашины.

Следующим шагом в развитии этого направления является исследование влияния воздушных подшипников на «покачивания» скользящей платформы, и разработка системы управления движения по оси Z планарной наномашины в соответствии с [26]. Наномашина может быть доработана, чтобы обеспечить активное управление платформы в направлении Z и компенсировать её «покачивание», как это сделано в наномашине NPMM-200. Это достигается путем встраивания приводов в направлении Z в аэростатические опорные «подушки».

Интегрированная планарная система привода [26] с 6 степенями свободы представляет собой комбинацию 3D планарного двигателя для скользящей платформы по осям x, y и φ_z (исходная конструкция NPPS100, рис. 14) и системы из 3-х вертикальных приводов (z, φ_x и

φ_y). На рис. 15 представлен общий вид модифицированной установки NPPS100-6D, а на рис. 16 - отдельный вертикальный привод Z, встроенный в опору аэростатического подшипника.

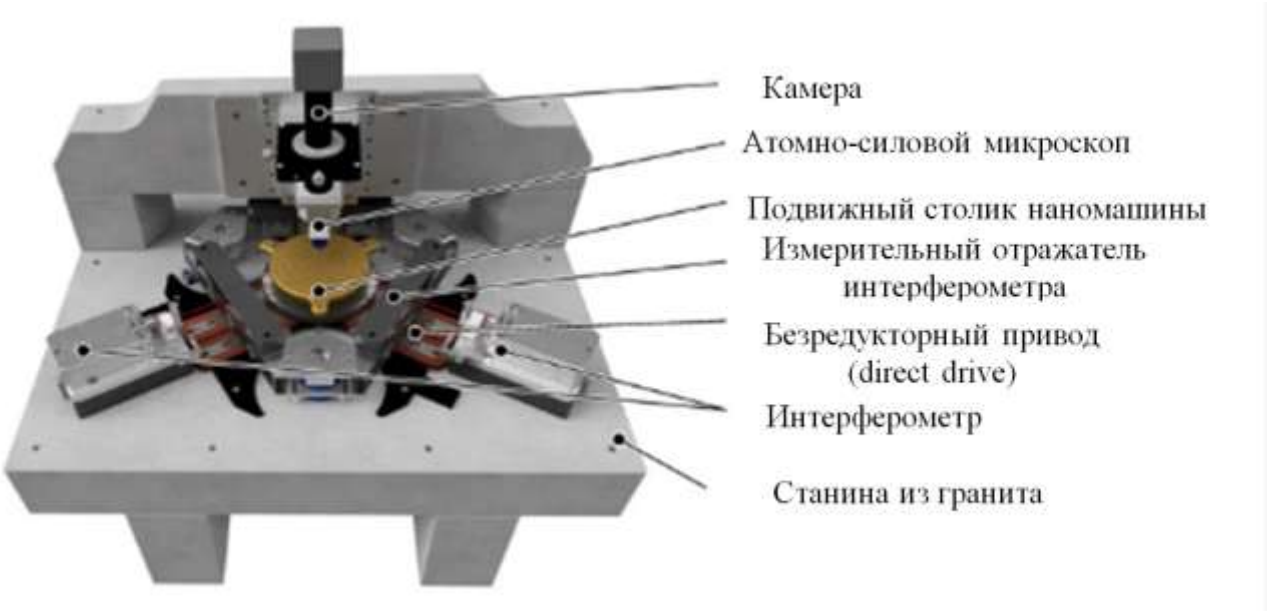


Рис. 13. CAD модель наномашины NFM-100 со сканирующим атомно-силовым микроскопом (АСМ).

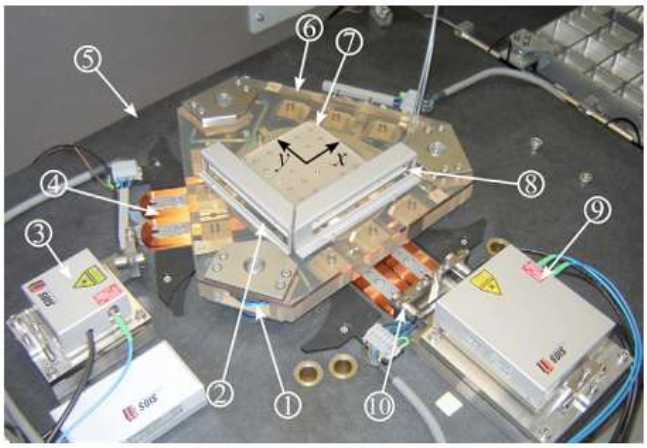


Рис. 14. Исходная конструкция NPPS100: 1 – аэростатический подшипник, 2 – отражатель интерферометра x, 3 - интерферометр x, 4 – обмотка (катушки) привода, 5 – гранитное основание, 6 – скользящая плита из zerodur, 7 – перемещаемый объект, 8 - отражатель интерферометра *y*, φ_z, 9 - интерферометр *y*, φ_z, 10 – ёмкостной датчик.

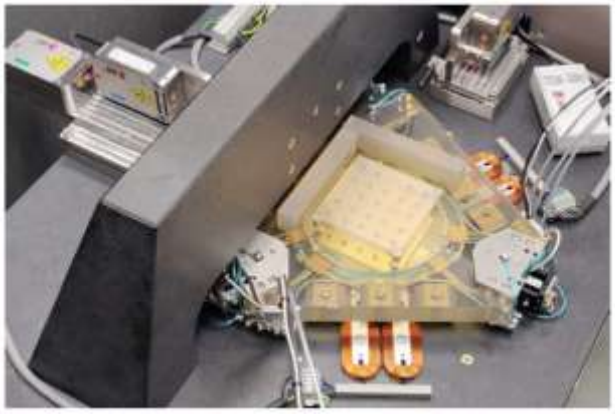


Рис. 15. Общий вид модифицированной установки NPPS100-6D: с 6D интерферометрической системой измерения и 3 двигателями LAU, установленными на аэростатические подшипники.



Рис. 16. Общий вид аэростатического подшипника с встроенным приводом Z.

Вертикальные приводы Z дополнительно реализуют пневматическую компенсацию веса скользящей платформы. Для управления по замкнутому контуру 6 D осуществляется измерение перемещений и углы наклона высокоточной многоканальной системой интерферометров с плоским зеркалом.

(2021 г.) В настоящее время исследования в области нанотехнологий ограничен работой в плоскости. Функционализация непланарных поверхностей (в оптике, например, асферы и поверхности «свободной» формы) с помощью наноструктур позволила бы добиться дальнейшего значительного технического прогресса [23].

Сложность любого процесса нанесения оттиска заключается в позиционировании и выравнивании штампа в направлении нормали к поверхности, на которую наносится оттиск. Возможности позиционирования по трем линейным координатам, которыми обладают NPM машины [8,9,22,23], является вполне достаточными для процесса нанесения оттиска на поверхности близкие к плоским. Для структурирования сильно «искривленных»

поверхностей с локальными наклонами до 45° необходимо наклонять сам штамп. Это возможно при использовании пяти/шести координатной нанотехнологической машины. На рис. 17 представлена схема пятикоординатной наномашины NMM-1 [23]. Здесь: 1 - Угловой зеркальный отражатель в цепях обратных связей приводов X, Y, Z, 2 - интерферометры X, Y, Z, 3 - «метрологическая» станина, 4 - гониометр поворотной оси ϕ, *5* поворотная ось θ, *6* датчики расстояния системы отсчета, *7* опорная полусфера, *8* рабочий инструмент («штамп»), *9* обрабатываемое изделие, *10* станина машины.

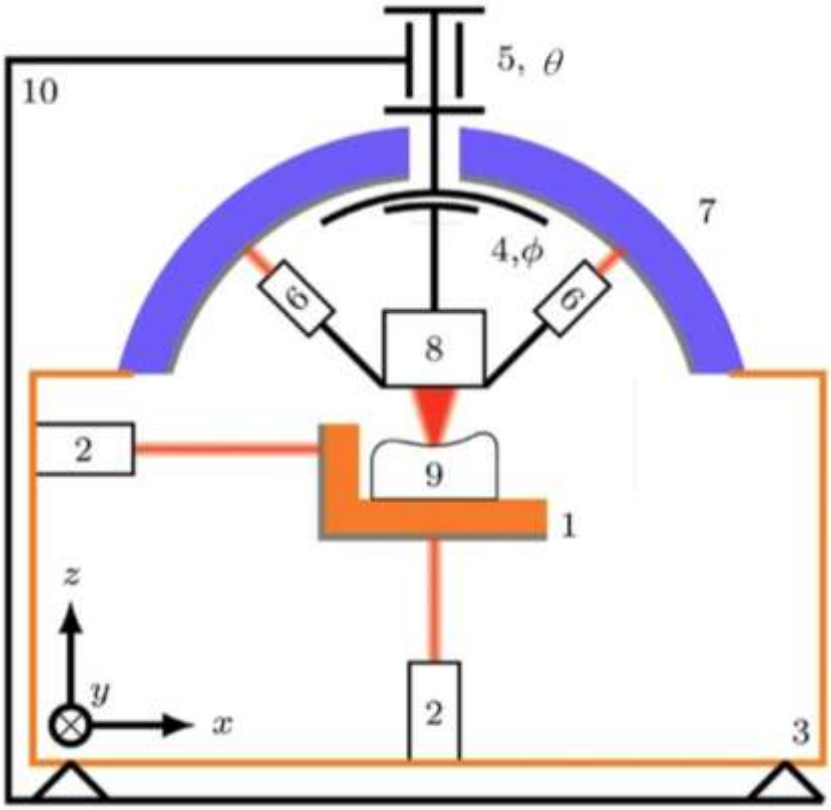


Рис. 17. Схема пятикоординатной наномашины NMM-1

Работы в этом направлении продолжают идти в настоящее время: 1) Фундаментальные исследования в области проектирования пятикоординатных наномашин для измерений и технологических операций [27], 2) экспериментальные исследования точностных возможностей 6-ти координатной наномашины NPS6D100—A6D с разрешением < 10 нм с рабочим объёмом ∅100 мм × 10 мм [28]. Будущие разработки предполагается сосредоточить на изучении (in situ) в конкретных условиях проводимых калибровочных операций и интегрированного взаимодействия с инструментальными зондами для расширения функциональности в области нанотехнологий.

Заключение. Наномашины NMM-1, NPMM-200 и NFM-100 представляют значительный прогресс в развитии сверхточных измерений и работ с объектами в нанометровом диапазоне. Это оборудование составляет основу для проведения функционализации поверхностей и материала с помощью создания новых наноструктур как поверхностного, так и объемного слоя материала. Это является огромным потенциалом для создания продуктов и изделий с

ранее неизвестными свойствами и является предметом текущих международных исследовательских инициатив**.**

Выводы. Для выполнения процесса нанопозиционирования с дискретностью нм или A˚ в машинах в рабочем пространстве ∅ 300 мм на Z = 50 мм, представленных в работах [3-5], применены новые подходы:

1. В системе позиционирования, работающей в плоскости**, осуществлен переход от конструкции «слоённого пирога»,** где два ползуна установлены один на другом на направляющих качения (это приводит к проблеме сильного нелинейного трения, особенно в нанометровом диапазоне), **к одному ползуну (планарная конструкция)**, установленному на воздушных подшипниках и имеющему три степени свободы.
2. В системе приводов используется принцип **"direct drive".**
3. В измерительной системе используются **лазерные интерферометрические датчики** в сочетании с применением в конструкции НС материала **Zerodur** (отечественный аналог - **Ситалл-ЛГ**).
4. Применение системы регулирования с отрицательной обратной связью по углу поворота платформы вокруг управляемых координат X, Y.
5. На базе основных наномашин NMM-1, NPMM-200 и NFM-100 ведутся разработки многокоординатных наномашин, позволяющих устанавливать рабочий инструмент («штамп») по нормали к поверхности образца.
6. Новые разработки в создании эталонов настройки и калибровки наномашин.
7. Использование достижений в теоретических и экспериментальных исследованиях в области управления высокодинамичными подвижными планарными платформами.

Список литературы

1. Fritze M. (2021) Post-Moore: prospects for novel patterning of low volume ICs. In: Panning EM, Liddle JA (eds) Novel patterning technologies 2021. Vol. 11610. International society for optics and photonics. SPIE, Bellingham. https:// doi. org/ 10. 1117/ 12. 25932 29.
2. Amthor A., Zschaeck S. and Ament C. High precision position control using an adaptive friction compensation approach, Automatic Control, IEEE Transactions on, vol. 55, no. 1, P. 274– 278, 2010. [11]
3. Moore G. E. (2006). Cramming more components onto integrated circuits, Reprinted from Electronics, volume 38, number 8, April 19, 1965, P.114 ff. In: IEEE Solid-State Circuits Society Newsletter 11.3, pp. 33–35. https:// doi. org/ 10. 1109/N- SSC. 2006. 47858 60.
4. Pahk H.J. et al. Ultra precision positioning system for servo motor piezo actuator using the dual servo loop and digital filter implementation / International Journal of Machine Tools & Manufacture 41 (2001) P. 51- 63.
5. Joo K.-N. and Kim S.-W. Absolute distance measurement by dispersive interferometry using a femtosecond pulse laser / OPTICS EXPRESS 595 / 26 June 2006 / Vol. 14, No. 13.
6. Jin J., and Kim S.-W. Precision Dimensional Metrology Based on a Femtosecond Pulse Laser, published: 01 February 2010, From the Edited Volume Advances in Solid State Lasers Development and Applications Edited by Mikhail Grishin https://www.intechopen.com/chapters/8408

7. Wu H., Zhang F., Liu T., Meng F., Li J., and Qu X. Absolute distance measurement by chirped pulse interferometry using a femtosecond pulse laser / **Optics Express,** Vol. 23, Issue 24, P. 31582-31593, (2015), https://doi.org/10.1364/OE.23.031582.
8. Gao W., Dejima S., Yanai H., Katakura K., Kiyono S., Tomita Y. A surface motor-driven planar motion stage integrated with an X, Y, θ_Z surface encoder for precision positioning. / Precision Eng, 2004, 28(3), P. 329–337.
9. Jäger G., Manske E., Hausotte T., Büchner H.-J. The Metrological Basis and Operation of Nanopositioning and Nanomeasuring Machine NMM-1 / tm - Technisches Messen, Volume 76, Issue 5, P. 227-234.
10. Weckenmann A., Peggs G. N., Hoffmann J. Probing Systems for Dimensional Micro and Nano Metrology / 7th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments ISMTII, Huddersfield, UK, P. 199–206, 2006.
11. Peggs G. N., Lewis A. J.; Oldfield S. Design for a compact highaccuracy CMM / Annuals of CIRP 48(1), 417–420 (1999).
12. Jäger G., Manske E., Hausotte T., Müller A. and Balzer F. Nanopositioning and nanomeasuring machine NPMM-200 - a new powerful tool for large-range micro- and nanotechnology / Surf. Topogr.: Metrol. Prop.4(2016)034004
13. Balzer F. G. 2015. Entwicklung und Untersuchungen zur 3D Nanopositioniertechnik in großen Bewegungs bereichen. PhD Thesis TU Ilmenau
14. Manske E., Fröhlich T., Füßl R., Ortlepp I., Mastylo R., Blumröder U., Dontsov D., Kühnel M. and Köchert P. Progress of nanopositioning and nanomeasuring machines for cross-scale measurement with sub-nanometre precision / Meas. Sci. Technol. 31 (2020) Measurement Science and Technology, Volume 31, Number 8 (8 p.)
15. Danzebrink H. U., Koenders L., Picotto G. B., Lassila A., Wang S. H. and Klapetek P. 2010. Final report on EUROMET. L-S15.a (EUROMET Project 925), intercomparison on step height standards and 1D gratings / Metrologia Volume 47, Number 1A.
16. Mastylo R., Dontsov D., Manske E. and Jager G. (2005). A focus sensor for an application in a nanopositioning and nanomeasuring machine / Proc. SPIE 5856 238–44
17. Zschaeck S., Amthor A., Ament Ch. Decentralized High Precision Motion Control for Nanopositioning and Nanomeasuring Machines / IECON 2011 - 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Conference Paper · November 2011 DOI: 10.1109/IECON.2011.6119369.
18. SIOS Meβtechnik GmbH. Miniature plane-mirror interferometer. [Online]. Available: http://www.sios.de
19. Dupont P., Hayward V., Armstrong B. and Altpeter F., “Single state elastoplastic friction models,” Automatic Control, IEEE Transactions on, vol. 47, no. 5, P. 787–792, May 2002.
20. Серков Н.А., Пась О.В. Исследование влияния внутреннего трения на траекторию движения «точки» на ленте при возбуждении гармонических колебаний (стенд «Аллигатор 2м») // «Вестник научно-технического развития». - 2024. - № 1(172). - С. 29-40. [Электронный ресурс] URL: http://www.vntr.ru.
21. Stauffenberg J. et al. Measurement Precision of a Planar Nanopositioning Machine with a Range of Motion of Ø100 mm. Appl. Sci. 2022, 12, 7843. https //doi.org/ 10.3390/ app12157843.

22. Ortlepp I., Stauffenberg J., Manske E. Processing and Analysis of Long-Range Scans with an Atomic Force Microscope (AFM) in Combination with Nanopositioning and Nanomeasuring Technology for Defect Detection and Quality Control / Sensors 2021, 21, 5862. https:// doi.org/10.3390/s21175862
23. Ortlepp I. et al. Tip and Laser based 3D Nanofabrication in Extended Macroscopic Working Area // Nanomanufacturing and Metrology (2021) 4:132–148 https://link.springer.com/article/10.1007/s41871-021-00110-w.
24. Hesse S., Schäffel C., Mohr H.U., Katzschmann M., Büchner H.J. Design and performance evaluation of an interferometric controlled planar nanopositioning system. Meas. Sci. Technol. 2012, 23, 074011.
25. Stauffenberg J., Ortlepp I., Blumröde U., Dontsov D., Schäffel C., Holz M., Rangelow I.W., Manske E. Investigations on the positioning accuracy of the Nano Fabrication Machine (NFM-100). tm-Tech. Mess. 2021, 88, 581–589.
26. Gorges S., Hesse S., Schaeffel C., Ortlepp I., Manske E., Langlotz E., Dontsov D. (2019) Integrated Planar 6-DOF Nanopositioning System. IFAC-Papers Online, Volume 52, 313–318. (2020).
27. Schienbein R., Fern F., Theska R., Supreeti S., Füßl R., Manske E. Fundamental Investigations in the Design of Five-Axis Nanopositioning Machines for Measurement and Fabrication Purposes / Nanomanufacturing and Metrology, 2021, volume 4, pages 156-164.
28. Hesse S., Huaman A., Katzschmann M. and Herzog L. NPS6D100—A6D Nanopositioning System with Sub-10 nm Performance in a 100 mm ×10mmWorkspace / Actuators 2025, 14, 361. https:// doi.org/10.3390/act14080361.

Дата поступления: 28 октября 2025 г.

DOI: 10.18411/vntr2025-179-3
УДК 536.2:518.355.4

УСЛОВИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ В ТЕПЛОВОЙ СИСТЕМЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ, ВЫЗВАННЫХ РЕАКЦИЕЙ МИКРОЦИРКУЛЯЦИИ КРОВИ НА ТЕПЛОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ

© Александр Анатольевич Шульженко, Михаил Борисович Модестов
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А.Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия
aa_shulzhenko.01@mail.ru

Аннотация. *Проведено математическое моделирование реакции тела человека в виде температурных изменений на тепловое воздействие, связанных с изменениями в микроциркуляции крови в пределах тепловой системы, представляющей собой двухслойную тонкую стенку, расположенную на поверхности тела человека. Рассмотрены условия распространения температурных изменений в тепловой системе. Для имитации переменного коэффициента теплоотдачи человека, $K_н(\Delta T(t))$, возникающего в приграничном слое при тепловом воздействии, использовались экспериментальные данные, полученные при проведении тепловых проб методом лазерной доплеровской флоуметрии. Результаты получены с помощью оригинальной программы, написанной авторами. Данное исследование может представлять интерес для специалистов, занимающихся созданием устройств, обогревающих человека, а также для физиологов и медицинских работников различных профилей.*

Ключевые слова*: тепловая система, тканый электронагреватель, математическое моделирование, реакция человека на тепловой сигнал, коэффициент теплоотдачи, терморегуляция человека, периферическая микроциркуляция крови, физиология.*

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2024-0022.

CONDITIONS OF PROPAGATION IN THE THERMAL SYSTEM OF TEMPERATURE CHANGES CAUSED BY THE REACTION OF BLOOD MICROCIRCULATION TO THERMAL EFFECTS

© Alexander Anatolyevich Shul'zhenko, Mikhail Borisovich Modestov
Mechanical Engineering Research Institute the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
aa_shulzhenko.01@mail.ru

Abstract. *Mathematical modeling of the human body reaction in the form of temperature changes to thermal impact associated with changes in blood microcirculation within the thermal system, which is a two-layer thin wall located on the surface of the human body, is carried out. The conditions of propagation of temperature changes in the thermal system are considered. To*

simulate the variable human heat transfer coefficient, Кн(ΔT(t)), arising in the boundary layer under thermal influence, experimental data obtained during thermal tests by the laser Doppler flowmetry method were used. The results were obtained using an original program written by the authors. This study may be of interest to specialists involved in the creation of devices that warm people, as well as to physiologists and medical workers of various profiles.
Key words: *thermal system, woven electric heater, mathematical modeling, human response to a thermal signal, human thermoregulation, peripheral blood microcirculation, physiology.*

This research was supported by State Assignment from Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation FFGU-2024-0022.

Для исследования периферической микроциркуляции крови применяются самые различные методы: плетизмографии, ультразвуковой визуализации, лазерно-доплеровской флоуметрии (ЛДФ) и т.д. С их помощью измеряются: скорость и объем кровотока, расположение и размеры сосудов и т.д. Все они строятся на различных способах измерения, но одно общее – наличие теплового воздействия, провоцирующего происходящие изменения в периферическом сосудистом русле. Однако, ввиду того, что данные методы довольно сложны, они до сих пор в практической медицине не используются [1].
В ходе экспериментов с тепловыми пробами с ткаными электронагревателями, расположенными на поверхности тела человека, было отмечено, что наблюдаются температурные изменения во времени в области тканых электронагревателей (рис. 1). Как оказалось, они связаны с изменениями в периферическом сосудистом русле, то есть, имеются предпосылки для построения более простого, неинвазивного метода по сравнению с методами плетизмографии и ЛДФ [2].

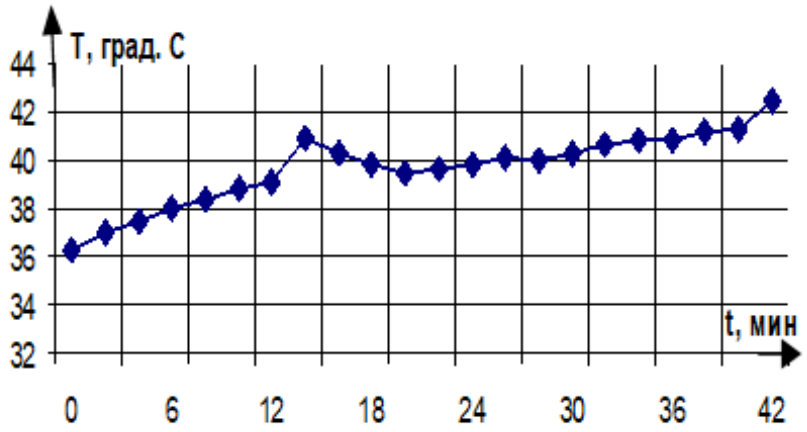


Рис. 1. Распространение температуры во времени на поверхности тканого электронагревателя, полученные в ходе натурного эксперимента.

Целью настоящей работы является определение условий, при которых происходит фиксация реакции тела человека на тепловое воздействие в виде изменений температуры, вызванных изменениями микроциркуляции крови.

Так как тепловые процессы происходят в пространствах, имеющих небольшие размеры, в пределах от менее одного да нескольких мм, то математическое моделирование является довольно удобным способом исследования.

Для воспроизведения моделей сигналов, воздействующих со стороны тела человека при его нагреве, использовались ранее полученные с помощью лазерно-доплеровского метода экспериментальные данные [1, 3 - 5].

В ходе моделирования проводились изменения условий распространения сигналов в тепловой системе.

Проведем рассмотрение тепловых процессов с использованием тканых электронагревателей и других, типов нагревателей (далее - нагревателей), с помощью которых можно осуществлять контактный нагрев.

Пусть, нагреватель имеет плоскую двухслойную структуру, у которой площадь поверхности намного превышает толщину, то есть представляет собой двухслойную тонкую стенку.

Будем считать, что интересующие тепловые процессы протекают по нормали к площади поверхности нагревателя, то есть, будем рассматривать одномерный в пространстве тепловой процесс. В нашем случае, в тепловой системе процесс протекает по оси X, а площадь поверхности нагревателя располагается по осям Y и Z.

Рассматриваемая тепловая система, расположенная на поверхности тела человека показана (рис. 2).

В пределах $X < X_0$ располагается внешняя среда - человек (так как размеры человека намного больше размеров используемого тканого электронагревателя, то будем считать, что по отношению к нему человек сам является внешней средой).

Также будем полагать, что температура ядра тела человека в течение всего эксперимента неизменна, $T_{cp} = const$.

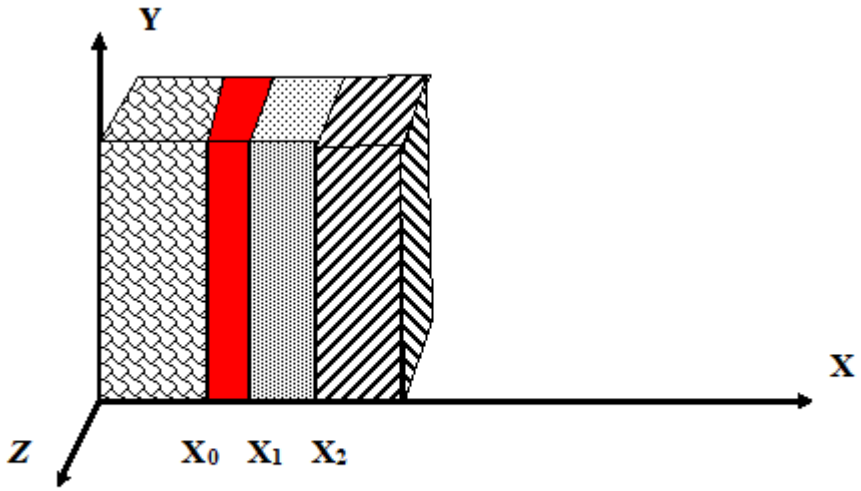


Рис. 2. Тепловая система нагревателя на поверхности тела человека.

В пределах $X_0 < X < X_1$ находится слой тканого электронагревателя.

На границе поверхности нагревателя и человека действуют граничные условия III-го рода [6].

Будем считать, что слой нагревателя имеет прямоугольную форму и плотно прилегает к другим слоям, а его параметры: ρ – плотность, *c* – теплоемкость, λ – теплопроводность,- неизменны в течение времени проведения каждого эксперимента.

Как уже отмечалось, при нагреве поверхности тела человека происходят изменения в периферической микроциркуляции крови, что подтверждается ранее проведенными исследованиями. Характер этих изменений наиболее точно отражен в работах [1, 4, 5] (рис. 3), а обобщенные данные результатов исследований, приведены и продемонстрированы на рис. 4 [3].

Изменение кровотока, то есть изменение объема и скорости переносимой крови на поверхности тела человека, приводит к изменениям коэффициента теплоотдачи тела человека, $K_н(\Delta T(t))$. Характер этих изменений пропорционален изменениям сосудистого русла, показанным на рис. 3 и 4 [7, 8].

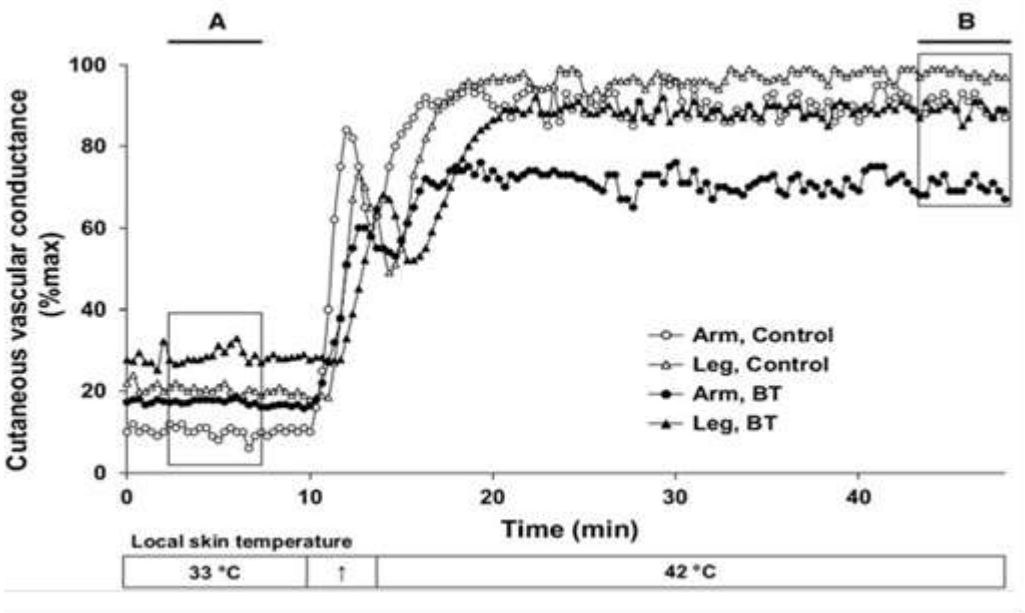


Рис. 3. CVCL(Ts) для двух площадок на руке и двух площадок на ноге. Местная температура кожи увеличивается со скоростью 3 С/мин.

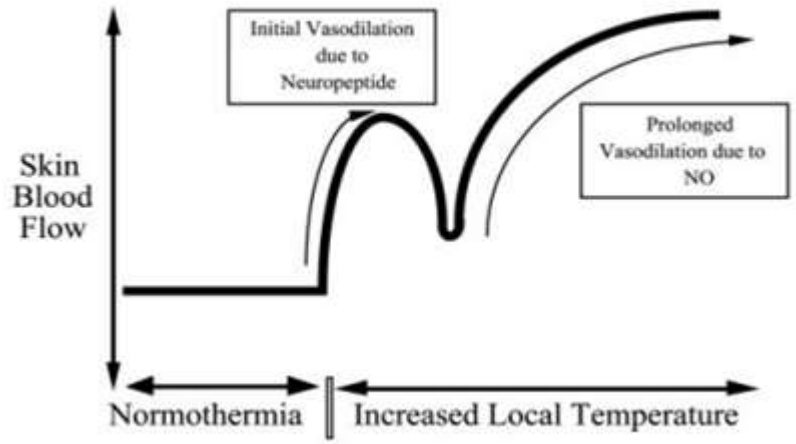


Рис. 4. Локальные реакции на согревание и сосудорасширяющие, сосудосужающие механизмы в коже человека. Повышение локальной температуры кожных кровеносных сосудов увеличивает кожный кровоток в результате двухфазной реакции: начальное быстрое повышение до пика, за которым следует длительная фаза плато.

Поэтому, используя данные, показанные на рис. 3 и 4, преобразуем их, учитывая пропорциональность изменений во времени коэффициента теплоотдачи тела человека в процессе нагрева, $K_н(\Delta T(t))$. Результат преобразования показан на рис. 5а.

Далее будем рассматривать тепловой процесс на границе нагревателя и человека не только в пространстве, по ***X***, а и во времени, по ***t***. В этом случае, функция температуры представляет собой функцию двух переменных,

$$\Delta T(x,t) = T(x,t) - T_{оср},$$

где $T(x,t)$ – текущее значение температуры; $T_{оср}$ – температура окружающей среды.

Граничные условия III рода в пространстве обычно представляются формулой с постоянным коэффициентом теплоотдачи

$$-\lambda_1 \cdot \frac{\partial \Delta T}{\partial x} = -K_н \cdot (\Delta T - \Delta T_{ср}) \qquad (1)$$

В нашем случае, изменения температуры на границе между нагревателем и телом человека, происходят одновременно не только по пространству (1), а и во времени, что вызывается нагревом и реакцией тела, переменным коэффициентом теплоотдачи, причем характер изменения температуры довольно динамичный, поэтому можно записать

$$-\lambda_1 \cdot \frac{\partial \Delta T}{\partial x} = -K_н(\Delta T(t)) \cdot (\Delta T - \Delta T_{ср}) \qquad (2)$$

где λ_1 – коэффициент теплопроводности материала нагревателя, находящегося на поверхности тела человека; $K_н$ – коэффициент теплоотдачи тела человека; $\Delta T = T - T_{оср}$ – текущее значение температуры; $\Delta T_{ср} = T_{ср} - T_{оср}$ – температура человека; $T_{оср}$ – температура окружающей среды; $T_{ср}$ – температура окружающей среды (тела человека); x - текущее значение пространственной координаты.

Подробно решение этой задачи было рассмотрено в [9].

В пределах $X_0 < X < X_1$ располагается слой, представляющий собой нагреватель. Действие нагревателя в этом слое описывается с помощью уравнения Фурье с внутренними источниками

$$\rho_1 \cdot c_1 \cdot \frac{\partial \Delta T}{\partial t} = \lambda_1 \cdot \frac{\partial^2 \Delta T}{\partial x^2} + q_v \quad \text{при} \quad t > 0, \quad x_1 < x < x_2 \qquad (3)$$

где λ_1 - коэффициент теплопроводности материала нагревателя; ρ_1 – плотность материала нагревателя; c_1 – теплоемкость материала нагревателя; q_v – объемная плотность тепловыделения нагревателя.

В пределах $X_1 < X < X_2$ располагается теплоизоляционный слой нагревателя. Тепловые процессы, происходящие в этом слое, можно представить с помощью уравнения Фурье

$$\rho_2 \cdot c_2 \cdot \frac{\partial \Delta T}{\partial t} = \lambda_2 \cdot \frac{\partial^2 \Delta T}{\partial x^2} \quad \text{при} \quad t > 0, \quad x_1 < x < x_2 \qquad (4)$$

где λ_2 - коэффициент теплопроводности материала теплоизоляционного слоя нагревателя; ρ_2 – плотность материала теплоизоляционного слоя нагревателя; c_2 – теплоемкость материала теплоизоляционного слоя нагревателя.

Условия в тонкой стенке между теплоизоляционным слоем нагревателя и нагревателем, в точке X_1, можно представить в виде граничных условий IV рода, то есть на границе будет соблюдаться равенство не только тепловых потоков, а и температур

$$\begin{cases} -\lambda_1 \cdot \dfrac{\partial \Delta T}{\partial x}\Big|_{x=x_1} = -\lambda_2 \cdot \dfrac{\partial \Delta T}{\partial x}\Big|_{x=x_1} \quad \text{при} \quad t>0, \quad x=x_1 \\ \Delta T_{h1}(t,x) = \Delta T_{i1}(t,x) \end{cases} \tag{5}$$

где $\Delta T_{i1}(t,x) = (T_{i1}(t,x) - T_{ocp})$ – разность между температурой на границе между теплоизоляционным слоем нагревателя и нагревателя со стороны теплоизоляционного слоя и температурой окружающей среды; $T_{i1}(t,x)$ – текущая температура на границе между теплоизоляционным слоем нагревателя и нагревателем со стороны теплоизоляционного слоя; $\Delta T_{h1}(t,x) = (T_{h1}(t,x) - T_{ocp})$ – разность между температурой на границе между теплоизоляционным слоем нагревателя и нагревателя со стороны нагревателя и температурой окружающей среды; $T_{h1}(t,x)$ – текущая температура на границе между теплоизоляционным слоем нагревателя и нагревателем со стороны нагревателя; T_{ocp} – температура окружающей среды.

Для описания условий между теплоизоляционным слоем нагревателя и окружающей средой также используются граничные условия III вида, но с постоянным коэффициентом теплоотдачи окружающей среды

$$\lambda_2 \cdot \frac{\partial \Delta T}{\partial x} = K_2 \cdot (T - T_{ocp}) \tag{6}$$

где $\Delta T = T - T_{ocp}$, T – текущее значение температуры; T_{ocp} – температура окружающей среды; K_2 – коэффициент теплоотдачи окружающей среды, контактирующей с теплоизоляционным слое нагревателя.

В целом, тепловую задачу с учетом (2) - (6) и других рассмотренных замечаний можно представить в виде смешанной задачи Коши

$$\begin{cases} \Delta T = \Delta T_{ocp} \quad при \quad t \ge 0 \quad x \ge x_2 \\ \Delta T = \Delta T_{cp} \quad при \quad t \ge 0 \quad x \le x_0 \\ -\lambda_1 \cdot \dfrac{\partial \Delta T}{\partial x} = -K_n(\Delta T(t)) \cdot (\Delta T - \Delta T_{cp}) \quad \text{при} \quad t>0, \quad x=x_0 \\ \rho_1 \cdot c_1 \cdot \dfrac{\partial \Delta T}{\partial t} = \lambda_1 \cdot \dfrac{\partial^2 \Delta T}{\partial x^2} + q_v \quad \text{при} \quad t>0, \quad x_0 < x < x_1 \\ -\lambda_1 \cdot \dfrac{\partial \Delta T}{\partial x}\Big|_{x=x_1} = -\lambda_2 \cdot \dfrac{\partial \Delta T}{\partial x}\Big|_{x=x_1} \quad \text{при} \quad t>0, \quad x=x_1 \\ \Delta T_{h1}(t,x) = \Delta T_{i1}(t,x) \quad \text{при} \quad t>0, \quad x=x_1 \\ \rho_2 \cdot c_2 \cdot \dfrac{\partial \Delta T}{\partial t} = \lambda_2 \cdot \dfrac{\partial^2 \Delta T}{\partial x^2} \quad \text{при} \quad t>0, \quad x_1 < x < x_2 \\ -\lambda_2 \dfrac{\partial \Delta T}{\partial x} = -K_2 \cdot (T - T_{ocp}) \quad \text{при} \quad t>0, \quad x=x_2 \end{cases} \tag{7},$$

x – координата по оси X; ΔT_{h1} – разность температур со стороны нагревателя в точке x_1; ΔT_{i1} – разность температур со стороны теплоизоляционного слоя нагревателя в точке x_1.

В соответствии с поставленной задачей (7) и с учетом использования теории возмущений [9] была написана программа, позволяющая рассматривать тепловые процессы на поверхности тела человека.

С помощью программы было проведено имитационное моделирование при использовании различных нагревателей и теплоизоляционных слоев, входящих в состав тонкой стенки, обладающих различными массами, теплоемкостями и теплопроводностями. Остальные параметры тонкой стенки оставались постоянными.

Следует отметить, что наличие аксонных явлений, проявляющихся при изменении микроциркуляции крови в ходе проведения тепловой пробы (рис. 3 и 4), можно преобразовать [9] в температурные изменения во времени и в пространстве, показанные на рис. 4б, что соответствует экспериментальным результатам, полученным и авторами (рис. 1). Наличие или вырождение аксонного явления позволяет удобно, не усложняя алгоритмы, отслеживать тепловые процессы, происходящие в системе при разных физических параметрах ее элементов.

С помощью имитационного моделирования было определено, что:

- при небольших значениях массы, теплоемкости и теплопроводности материалов нагревателя (в данном случае, тканого электронагревателя) и теплоизоляционного слоя, тепловой сигнал-реакция человека, сформированный под воздействием нагревателя, приводит к изменению коэффициента теплоотдачи (рис. 5а). Связано это с влиянием изменений, происходящих в сосудистом русле за счет расширения/сужения сосудистого русла, увеличения/снижения скорости и объема кровотока. Сигнал-реакция (хорошо отслеживается по аксонному выбросу) устойчиво распространяется не только в области контакта тканого электронагревателя и тела человека, а и по большей части тонкой стенки: тканого электронагревателя и теплоизоляционного слоя (рис. 5б);

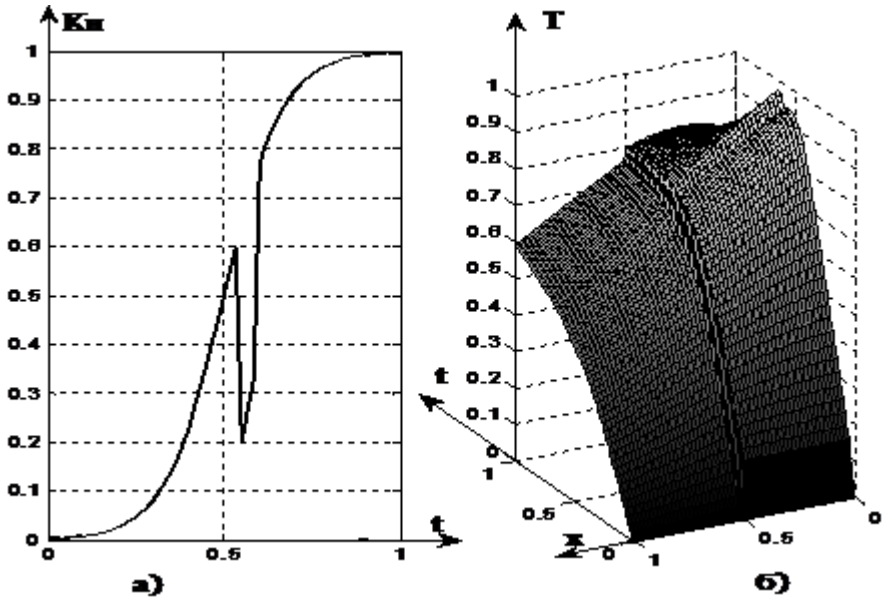


Рис. 5. а) Изменение коэффициента теплоотдачи тела человека во времени; б) изменение температуры во времени в пределах расположенной на поверхности тела человека тонкой стенки, состоящей из тканого электронагревателя и теплоизоляционного слоя, обладающих небольшой теплоемкостью и массой.

- при небольших значениях массы, теплоемкости и теплопроводности материалов нагревателя (в данном случае, тканого электронагревателя) и, одновременно, большой массе и теплоемкости, но небольшой теплопроводности теплоизоляционного слоя, аналогично первому случаю, тепловой сигнал-реакция человека, сформированный под воздействием тканого электронагревателя, приводит к изменению коэффициента теплоотдачи (рис.6а). Но, сигнал-реакция хорошо распространяется только в небольшой области тканого электронагревателя, а в области теплоизоляционного слоя он не распространяется (рис. 6б);

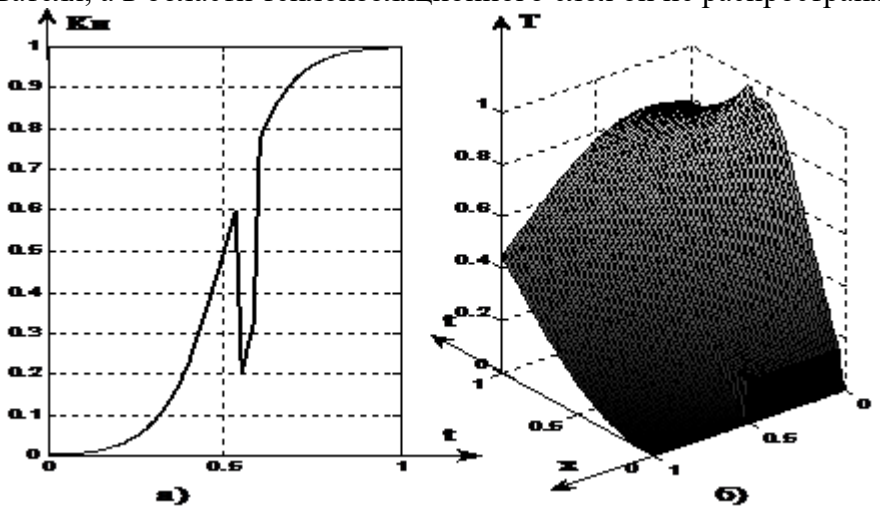


Рис. 6. а) Изменение коэффициента теплоотдачи тела человека во времени; б) изменение температуры во времени в пределах расположенной на поверхности тела человека тонкой стенки, состоящей из тканого электронагревателя, обладающего небольшой теплоемкостью и массой, и теплоизоляционного слоя нагревателя, имеющего большую теплоемкость и массу.

- при большой массе и большой теплоемкости, но небольшой теплопроводности материалов при использовании не тканых, а другого типа нагревателей, и, одновременно, при небольшой массе, теплоемкости и теплопроводности материалов теплоизоляционного слоя тепловой сигнал-реакция человека, сформированный под воздействием нагрева нагревателем, в области тонкой стенки не распространяется (рис. 7б);

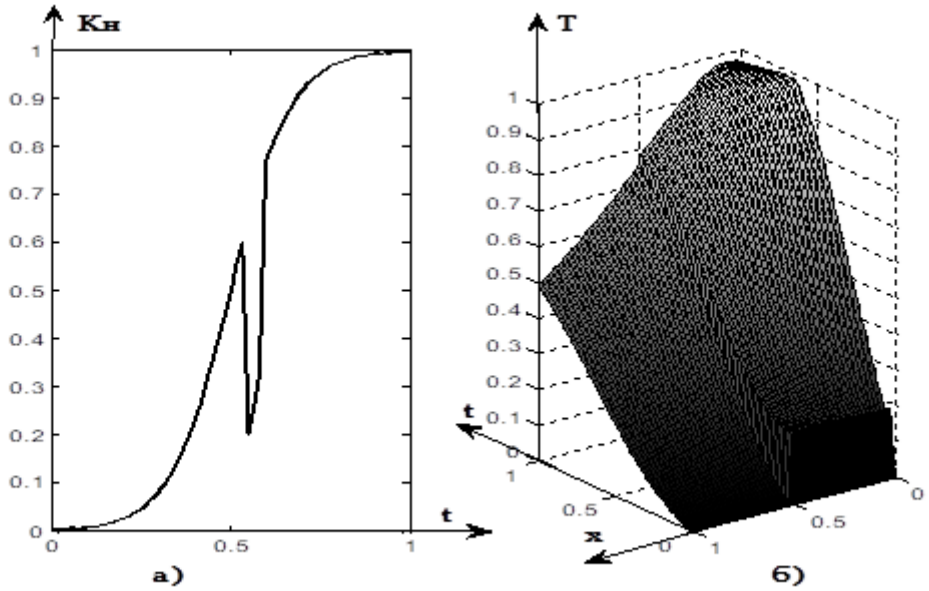


Рис. 7. а) Изменение коэффициента теплоотдачи тела человека во времени; б) изменение температуры во времени в пределах расположенной на поверхности тела человека тонкой стенки, состоящей из нагревателя, обладающего большой теплоемкостью и массой, и теплоизоляционного слоя нагревателя, имеющего небольшую теплоемкость и массу.

- при небольших значениях массы, теплоемкости, но большой теплопроводности материалов тканого электронагревателя и небольших значениях массы, теплоемкости и теплопроводности материалов теплоизоляционного слоя, тепловой сигнал-реакция человека, сформированный под воздействием тканого электронагревателя, приводит к изменению теплового поля. В этом случае, температурная реакция микроциркуляции на тепловое воздействие в виде аксонных изменений не видна даже в области тканого электронагревателя (рис. 8б).

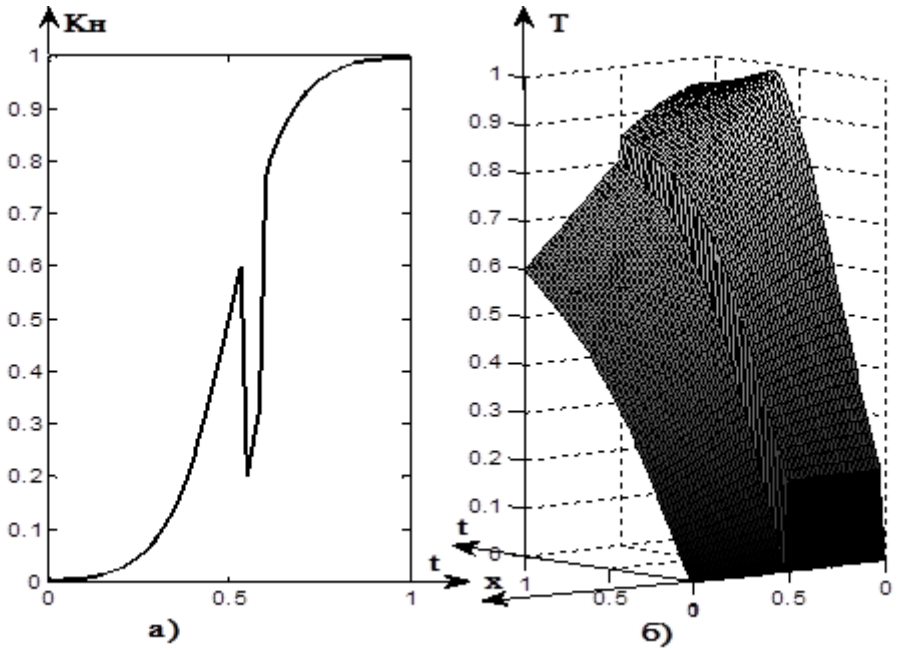


Рис. 8. а) Изменение коэффициента теплоотдачи тела человека во времени; б) изменение температуры во времени в пределах расположенной на поверхности тела человека тонкой стенки, состоящей из тканого электронагревателя, обладающего небольшой теплоемкостью и массой, но большой теплопроводностью, и теплоизоляционного слоя нагревателя, имеющего небольшую теплоемкость и массу.

Выводы. При моделировании динамичных изменений температуры в области тепловой системы на фоне контактного нагрева, идентичного нагреву при лазерной доплеровской флоуметрии, для построения модели переменного во времени коэффициента теплоотдачи тела человека были использованы изменения кровотока, полученные с помощью лазерной доплеровской флоуметрии.

Моделирование тепловых процессов в двухслойной тонкой стенке, происходящих под воздействием тканых электронагревателей, расположенных на поверхности тела человека, показало, что в этом случае обеспечиваются наилучшие условия для распространения теплого сигнала-реакции тела человека, то есть, когда все элементы тонкой стенки обладают малой массой, малой теплоемкостью и невысокой теплопроводностью. А сопоставление сигналов, полученных в ходе натурного эксперимента (рис. 1) и математического моделирования, позволяют убедиться в их идентичности.

При сохранении малой массы, теплоемкости и теплопроводности нагревателя (при параметрах, аналогичных тканому электронагревателю) и одновременном увеличении массы и теплоемкости теплоизоляционного слоя температурная реакция на тепловое воздействие со стороны нагревателя на тело человека распространяется только в пределах нахождения нагревателя. Больше того, возрастание тепловой инерции теплоизоляционного слоя приводит к ослаблению температурной реакции и, даже, в пределах слоя нагревателя.

При сохранении малой массы и теплоемкости теплоизоляционного слоя и при одновременном увеличении массы и теплоемкости нагревателя распространение температурной реакции на тепловое воздействие со стороны нагревателя на тело человека в пределах слоя нагревателя ухудшается, вплоть до полного исчезновения.

При сохранении малой массы и теплоемкости, но увеличении теплопроводности тканого электронагревателя, при одновременном сохранении малой массы, малой теплоемкости

теплоизоляционного слоя распространение тепловой реакции человека на тепловое воздействие со стороны нагревателя в пределах тонкой стенки ухудшается, вплоть до полного исчезновения.

Следует отметить, что у различных типов нагревателей, использующих в качестве теплоносителя воду, обладающую большой массой и теплоемкостью, распространение в области расположения нагревателя сигнала-реакции человека на тепловое воздействие нагревателя, либо крайне ослаблено, либо вообще подавлено.

Имитационное моделирование различных условий и использование аксонных явлений для наблюдения изменений температур, позволило достаточно простым способом определить влияние элементов тепловой системы, с различными тепловыми свойствами, на распространение температурной реакции на нагрев тела человека в области тепловой системы.

Список литературы

1. *Vissler E.H.* Human. Temperature. Control. - B. Springer, 2018. – 425 p.
2. *Шульженко А.А.* Некоторые особенности тепловых процессов в системах обогрева с ткаными электронагревателями// Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2023. - № 5. - С. 103-112.
3. *Kellogg J., Dean L.* In vivo mechanisms of cutaneous vasodilation and vasoconstriction in humans during thermoregulatory challenges // Journal of applied physiology.— 2006.— Vol. 100, no. 5.— P. 1709.
4. *Мизева И.А.* Пространственно-временной анализ колебаний кровотока в микроциркуляторном русле человека по данным оптические и термометрических измерений. Диссертация д.ф-м.н. ИМСС УРО РАН - Филиал ФГБУН ПФИЦУО РАН. 2021, 328 с.
5. *Глазков А.А.* Лазерная доплеровская флоуметрия. Диссертация к.м.н. МОНИКИ. 2020, 115 с.
6. *Самарский А.А., Вабищевич П.Н.* Вычислительная теплопередача. - М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. - 784 с.
7. *Кирпичев М.В., Михеев М.А., Эйгенсон Л.С.* Теплопередача. М.-Л.: Государственное энергетическое издательство, 1940. - 292 с.
8. *Жуковский В.С.* Основы теории теплопередачи. - Л.: Энергия, 1969. - 224 с.
9. *Шульженко А.А.* Особенности использования теории возмущений при описании граничных условий III рода на поверхности тканых электронагревателей // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2025. - № 1. - С. 49 - 56.
10. *Шульженко А.А., Модестов М.Б.* Новые возможности тканых электронагревателей// Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2025. - № 1. - С. 100-108.

Дата поступления: 1 декабря 2025 г.