

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

Обзорная статья


УДК 006.067:681.2.089:531.786

<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2026-22-1-82-93>



Градуировка дополнительных каналов многоканальных динамометров с применением призмы как способ компенсации погрешности измерений силы, проводимых методом совокупных измерений*

В. В. Сычев , И. Ю. Шмигельский 

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева»,
г. Санкт-Петербург, Россия
 v.v.sychev@vniim.ru

Аннотация: Воспроизведение и передача единицы силы в диапазоне от 10 Н до 1 МН в Российской Федерации осуществляется с применением Государственного первичного эталона единицы силы ГЭТ 32–2011 согласно Государственной поверочной схеме. Однако современная промышленность на новом витке развития остро нуждается в обеспечении единства измерений для сил, превышающих 1 МН.

Государственная поверочная схема для передачи единицы силы в обсуждаемом нами диапазоне подразумевает применение метода совокупных измерений. Данный метод удовлетворяет текущим требованиям производственных процессов, однако имеет ряд существенных ограничений, препятствующих повышению точности измерительных средств в диапазоне свыше 1 МН до уровня, сопоставимого с методом прямых измерений.

Цель представленного в статье исследования – рассмотреть и изучить ряд факторов, оказывающих влияние на результат измерений средств измерений силы, реализующих метод совокупных измерений.

Отправной точкой для достижения указанной цели стало определение факторов, снижающих точность метода совокупных измерений силы при использовании групп параллельно нагружаемых динамометров. Для выявления и оценки указанных факторов применен метод анализа нормативных документов и литературных источников. Экспериментальная часть работы реализована с использованием группы динамометров из состава ГЭТ 32–2011. Метод совокупных измерений реализован с использованием параллельно нагружаемых динамометров. Градуировка дополнительных каналов многоканальных динамометров проведена путем проведения нескольких рядов нагружений динамометра на эталоне единицы силы с применением призмы.

Анализ теоретической базы показал, что центральная проблема – систематическая погрешность, возникающая из-за отклонения векторов прикладываемых сил от осей чувствительности динамометров. Для решения данной проблемы разработаны теоретическая модель, количественно оценивающая

* Публикация подготовлена на основе доклада, представленного на Международной научно-технической конференции «Механометрика 2025. Механические измерения и испытания», которая прошла 1–3 июля 2025 года во Всероссийском научно-исследовательском институте метрологии имени Д. И. Менделеева. Статья была принята к публикации после доработки рукописи и прохождения процедуры рецензирования.

это влияние, и новый метод градуировки дополнительных каналов многоканальных динамометров с использованием призмы, позволяющий компенсировать данную погрешность.

Результаты представленной в статье работы могут рассматриваться как перспективное направление для продолжения исследований влияния описанных в настоящей статье факторов на результаты измерений силы, предполагая в перспективе повышение точности измерений силы в диапазоне от 1 до 9 МН.

Ключевые слова: градуировка, погрешность измерения силы, компенсация погрешности измерений, совокупные измерения, метод совокупных измерений, динамометр, составляющие погрешности, систематическая погрешность, каналы измерений

Для цитирования: Сычев В. В., Шмигельский И. Ю. Градуировка дополнительных каналов многоканальных динамометров с применением призмы как способ компенсации погрешности измерений силы, проводимых методом совокупных измерений // Эталон. Стандартные образцы. 2026. Т. 22, № 1. С. 82–93. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2026-22-1-82-93>

Статья поступила в редакцию 29.10.2025; одобрена после рецензирования 25.02.2026; принята к публикации 25.03.2026.

MODERN METHODS OF ANALYSIS OF SUBSTANCES AND MATERIALS

Review Article

Calibration of Additional Channels of Multi-Channel Dynamometers Using a Prism as a Method for Compensating the Force Measurement Error Performed by the Method of Combined Measurements

Vladimir V. Sychev ✉, Ilya Yu. Shmigelskiy 

D. I. Mendeleev Institute for Metrology, St. Petersburg, Russia

✉ v.v.sychev@vniim.ru

Abstract: In the Russian Federation, the reproduction and transfer of the measurement unit of force in the range from 10 N to 1 MN is carried out using the State Primary Standard of the measurement unit of force GET 32–2011, in accordance with the State Verification Schedule. However, modern industry, at a new stage of its development, has an urgent need to ensure metrological traceability for forces exceeding 1 MN. The State Verification Schedule for transferring the unit of force in the range under discussion implies the use of the method of combined measurements. This method meets the current requirements of production processes, but it has a number of significant limitations that prevent increasing the accuracy of measuring instruments in the range above 1 MN to a level comparable to the method of direct measurements.

The purpose of the research presented is to consider and study a number of factors influencing the measurement result of force measuring instruments that implement the method of combined measurements. The starting point for achieving this goal was to identify the factors that reduce the accuracy of the combined measurement method of force when using groups of parallel-loaded dynamometers. To identify and

evaluate these factors, the method of analyzing regulatory documents and literature sources was applied. The experimental part of the work was carried out using a group of dynamometers from GET 32–2011. The method of combined measurements was implemented using parallel-loaded dynamometers. Calibration of the additional channels of multi-channel dynamometers was carried out by conducting several series of loadings of the dynamometer on the force standard using a prism.

An analysis of the theoretical framework showed that the central problem is the systematic error arising from the deviation of the applied force vectors from the sensitivity axes of the dynamometers. To solve this problem, a theoretical model was developed to quantitatively assess this influence, along with a new method for calibrating the additional channels of multi-channel dynamometers using a prism, which makes it possible to compensate for this error.

The results of the work presented in the article can be considered as a promising direction for further research into the influence of the factors described in this article on the results of force measurements, suggesting the potential to improve the accuracy of force measurements in the range from 1 to 9 MN.

Keywords: calibration, force measurement error, measurement error compensation, combined measurements, combined measurement method, dynamometer, error components, systematic error, measurement channels

For citation: Sychev VV, Shmigelskiy IYu. Calibration of additional channels of multi-channel dynamometers using a prism as a method for compensating the force measurement error performed by the method of combined measurements. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2026;22(1):82–93. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2026-22-1-82-93>

The article was submitted 29.10.2025; approved after reviewing 25.02.2026; accepted for publication 25.03.2026.

Введение

Воспроизведение и передачу единицы силы в Российской Федерации осуществляют согласно Государственной поверочной схеме, утвержденной приказом Росстандарта № 2498¹, с применением Государственного первичного эталона единицы силы, включающего четыре установки непосредственного нагружения, которые обеспечивают воспроизведение силы в диапазоне от 10 Н до 1 МН. Верхнюю границу этого диапазона обеспечивает установка ЭУ-100.

Однако в сфере промышленности сформирован запрос на обеспечение единства измерений для сил свыше 1 МН [1].

В настоящий момент для передачи размера единицы силы в диапазоне свыше 1 МН Государственная поверочная схема предусматривает применение метода совокупных измерений. Расширенная неопределенность метода совокупных измерений составляет от 0,006 %, что вдвое превышает нижнюю границу неопределенности метода прямых

измерений (0,003 %) в диапазоне до 1 МН². Текущая точность метода совокупных измерений соответствует требованиям промышленности, однако ограничивает возможность повышения точности средств измерений в диапазоне свыше 1 МН.

Повышение точности передачи единицы силы в диапазоне свыше 1 МН до уровня метода прямых измерений требует значительных ресурсов по физическому масштабированию эталона. Например, добавление новых грузов или разработки новых установок в составе ГЭТ 32–2011 в настоящее время не осуществимы в рамках НИОКР ввиду высокой стоимости работ по совершенствованию первичного эталона силы подобным способом. Есть основания допустить, что существующая точность метода совокупных измерений может в будущем ограничить возможность снижения нормируемой погрешности средств измерений силы в диапазоне свыше 1 МН до уровня высокоточных средств измерений, работающих в меньшем диапазоне.

¹ Об утверждении государственной поверочной схемы для средств измерений силы : Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии № 2498 от 22.10.2019.

² Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений. URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/12/items/397917>.

ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» для решения задачи передачи единицы силы в диапазоне до 9 МН применяет группы динамометров, конструкция которых защищена патентом «Устройство для передачи размера единицы силы, воспроизводимой эталонной силовоспроизводящей установкой» [2]. Каждая группа динамометров способна осуществлять передачу единицы силы в диапазоне до 3 МН [3]. Данная конструктивная схема позволяет минимизировать влияние на результат измерений отклонения векторов прилагаемых сил, вызванное отклонением от горизонтального положения опорной плоскости траверсы силовоспроизводящей машины [4]. Три такие группы динамометров позволяют охватить диапазон до 9 МН.

Цель исследования – изучить и обосновать влияние факторов, определяющих погрешность измерений силы при использовании метода совокупных измерений.

Предполагается проверить гипотезу о том, что влияние этих факторов обусловлено отклонением векторов прилагаемых сил от осей чувствительности динамометров в составе нагружаемой группы.

В исследовании предстоит решить следующие задачи:

- провести измерения силы методом совокупных измерений с использованием параллельно нагружаемых динамометров, объединенных в группу;
- экспериментально проверить метод градуировки дополнительных каналов динамометров.

Материалы и методы

Оборудование эксперимента

Метод совокупных измерений реализован с использованием объединенных в группу параллельно нагружаемых динамометров согласно уравнению (1). При таком подходе показания группы определили как сумму $\sum F_q$.

$$\begin{cases} F_1 = I_1 \cdot f_1(I) \\ F_2 = I_2 \cdot f_2(I) \\ \dots \\ F_q = I_q \cdot f_q(I) \\ \dots \\ F_Q = I_Q \cdot f_Q(I), \end{cases} \quad (1)$$

где Q – количество динамометров в группе; I_q – показания индикатора динамометра в мВ/В q -го динамометра; $f_q(I)$ – функция преобразования показаний индикатора из мВ/В в Н q -го динамометра; F_q – показания q -го динамометра из состава группы в Н.

Экспериментальные исследования во ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» показали, что даже при использовании конструкции [2] достичь одинаковых показаний всех динамометров на ступени нагружения невозможно из-за конечной жесткости силовоснабжающих проставок и различий в жесткости чувствительных элементов динамометров. Экспериментальные исследования проведены с применением оборудования из состава Государственного первичного эталона единицы силы ГЭТ 32–2011 (рис. 1) [5].

Вследствие конечной жесткости силовоснабжающих проставок отклонения опорной плоскости траверсы силовоснабжающей машины, на которой установлена группа динамометров, от горизонтального положения, и разницы в жесткости чувствительных элементов, векторы сил, действующих на динамометры Д1, Д2, Д3 со стороны силовоснабжающей проставки (векторы $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3$ на рис. 2), отклонялись от осей чувствительности каждого динамометра (оси Oz_1, Oz_2, Oz_3 на рис. 2), что приводило к появлению поперечной составляющей нагрузки (векторы $\vec{F}_{1n}, \vec{F}_{2n}, \vec{F}_{3n}$ на рис. 2) и уменьшению проекции векторов сил $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3$ на оси чувствительности динамометров (векторы $\vec{F}_{1z}, \vec{F}_{2z}, \vec{F}_{3z}$ на рис. 2).

Расчетная база

Поперечную составляющую нагрузки на динамометр определяли по формуле (2) как произведение модуля вектора силы, приходящейся на динамометр, на синус угла φ между данным вектором и осью чувствительности динамометра (2):

$$|\vec{F}_{qn}| = |\vec{F}_q| \cdot \sin \varphi, \quad (2)$$

где $\sin \varphi$ – синус угла φ между вектором \vec{F}_q и осью чувствительности динамометра.

Составляющую, расположенную вдоль оси чувствительности динамометра, определяли по формуле (3)



Рисунок подготовлен авторами по собственным данным / The figure is prepared by the authors using their own data
 Рис. 1. Внешний вид группы динамометров, применяемых во ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» при передаче единицы силы

Fig. 1. A group of dynamometers used at the D. I. Mendeleev Institute for Metrology for force unit transfer

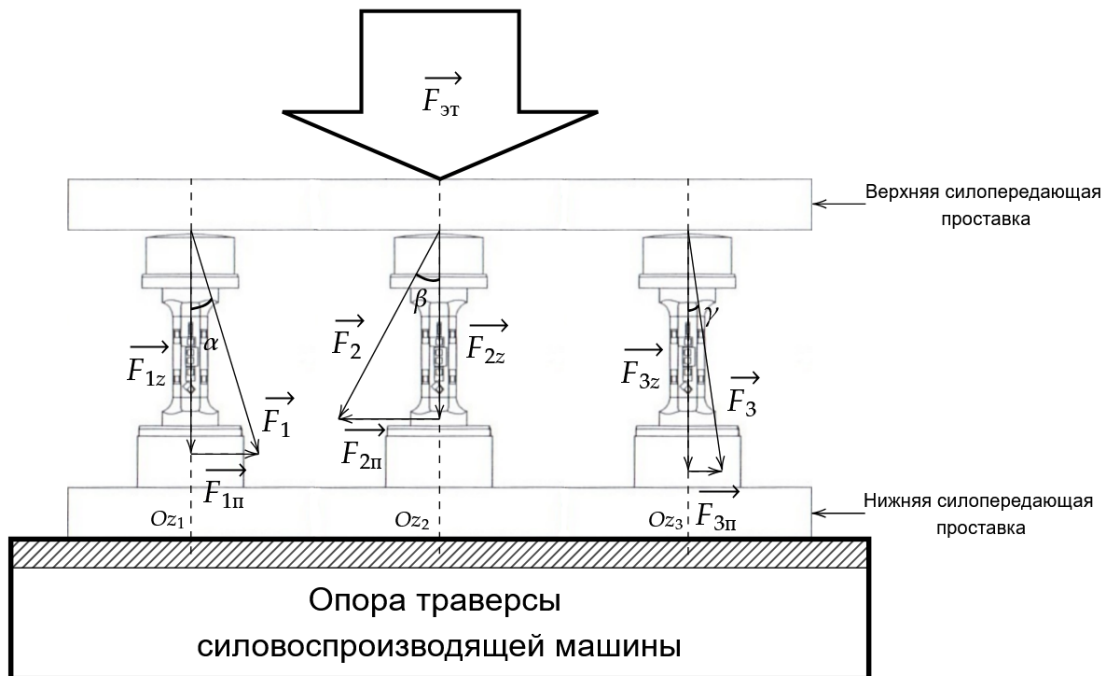


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным / The figure is prepared by the authors using their own data

Рис. 2. Схема расположения векторов сил, действующих на динамометры:

$\vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3$ – векторы сил силопередающей проставки; Oz_1, Oz_2, Oz_3 – оси чувствительности динамометров; $\vec{F}_{1п}, \vec{F}_{2п}, \vec{F}_{3п}$ – поперечные составляющие нагрузки; $\vec{F}_{1z}, \vec{F}_{2z}, \vec{F}_{3z}$ – проекция векторов сил

Fig. 2. Schematic diagram of force vector arrangement acting on the dynamometers:

$\vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3$ – force vectors of the force-transmitting spacer; Oz_1, Oz_2, Oz_3 – sensitivity axes of the dynamometers; $\vec{F}_{1п}, \vec{F}_{2п}, \vec{F}_{3п}$ – transverse components of the load; $\vec{F}_{1z}, \vec{F}_{2z}, \vec{F}_{3z}$ – projections of force vectors

$$\left| \vec{F}_{qz} \right| = \left| \vec{F}_q \right| \cdot \cos \varphi, \quad (3)$$

где $\cos \varphi$ – косинус угла φ между вектором \vec{F}_q и осью чувствительности динамометра.

Ввиду того, что векторная сумма сил, действующих на динамометры группы, была неизменна в процессе нагружения группы динамометров, но оставалась равной вектору силы эталонного нагружения группы $\vec{F}_{эт}$ в соответствии с формулой (4), вследствие уменьшения векторов \vec{F}_{1z} , \vec{F}_{2z} , \vec{F}_{3z} была сокращена измеряемая величина силы. Таким образом, явление отклонения векторов сил, действующих на динамометры группы, привело к дополнительной погрешности результата измерений.

$$\begin{cases} \vec{F}_{эт} = \sum_{n=1}^Q \vec{F}_n \\ \vec{F}_{эт} + \Delta_{откл} = \sum_{n=1}^Q \vec{F}_{nz} \end{cases}, \quad (4)$$

где $\Delta_{откл}$ – погрешность результата измерений, связанная с отклонением векторов от оси чувствительности динамометров.

Другим фактором, приводящим к появлению дополнительной погрешности, появление которого является следствием отклонения векторов сил, действующих на динамометры от осей чувствительности динамометров в группе, выявлено отклонение нагрузки на динамометр в группе при проведении измерений от опорного значения нагрузки, на которой производилось определение коэффициента чувствительности c_i динамометра. Такой способ градуировки заключался в определении коэффициента чувствительности каждого динамометра на каждой ступени нагружения, соответствующей ступеням нагружения группы при проведении измерений. Применяют данный способ градуировки:

- для исключения составляющей неопределенности, связанной с интерполяцией;
- для увеличения точности проводимых измерений.

Однако при проведении описанных выше измерений с применением параллельно нагружаемых динамометров нагрузка распределялась между динамометрами неравномерно. Поэтому ступень нагружения, на которой

был получен коэффициент чувствительности динамометра при градуировке, не соответствовал ступени нагружения, приходившейся на динамометр, на соответствующей ступени нагружения группы динамометров. Например, коэффициент чувствительности c_i для 1-го динамометра группы на ступени нагружения 1 МН определен в процессе градуировки как $c_i = 500 \text{ кН/мВ/В}$, что означало: показания индикатора 1-го динамометра на ступени нагружения 1 МН составляют 2 мВ/В. Но в процессе нагружения группы из трех динамометров на ступени нагружения 3 МН индикатора 1-го динамометра показывал значение 1,99 мВ/В, что при переводе в единицы измерения силы с применением коэффициента чувствительности $c_i = 500 \text{ кН/мВ/В}$ составляло 995 кН.

Во ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» проведены экспериментальные исследования с применением группы из трех параллельно нагружаемых динамометров на нескольких ступенях нагружения. На рис. 3 представлена запись показаний трех динамометров (показания каждого динамометра отмечены разными цветами), где наблюдается разность между показаниями, которая значительно превышает погрешность измерений. Максимальная разность между динамометрами одной группы менее 1% от максимальной величины нагружения.

Результаты измерений (рис. 3) в диапазоне от 500 до 5000 кН получены с помощью линейной градуировки. Однако погрешность данного метода велика относительно метода определения коэффициента чувствительности. Поэтому применение метода градуировки с применением коэффициента чувствительности, определенного при градуировке единичного динамометра, требует распространения коэффициента на интервал, соответствующий разнице показаний динамометров в группе.

Таким образом, в соответствии с формулой (1), применяя метод градуировки динамометров, путем определения коэффициента чувствительности c_i , функция преобразования показаний индикатора из мВ/В в $N f_q(I)$ получила вид (рис. 4).

Следует отметить, что одноканальные динамометры при измерении величины силы

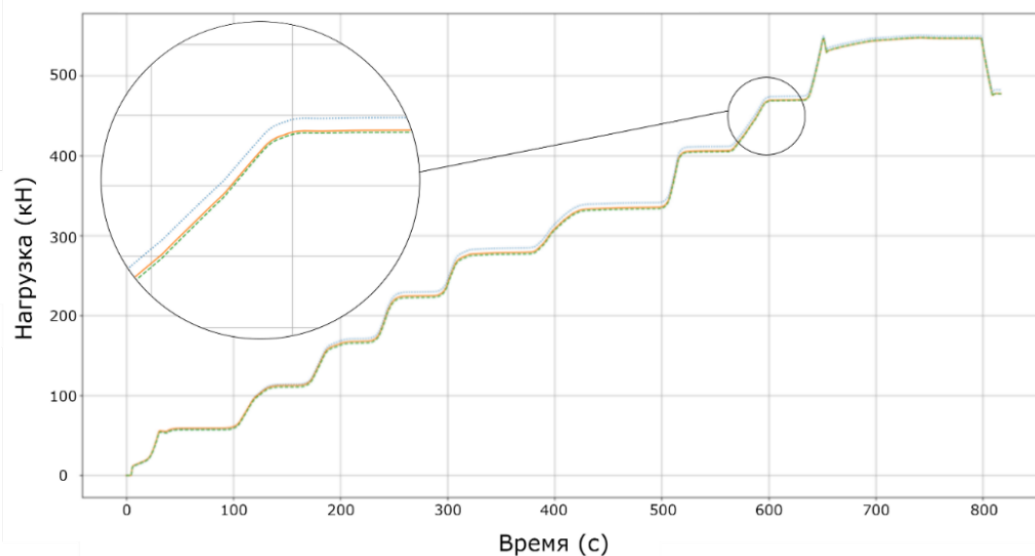


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным / The figure is prepared by the authors using their own data

Рис. 3. График показаний группы из трех динамометров: показаниям каждого динамометра соответствует свой цвет

Fig. 3. Graph of readings of a group of three dynamometers: the readings from each dynamometer correspond to its own color

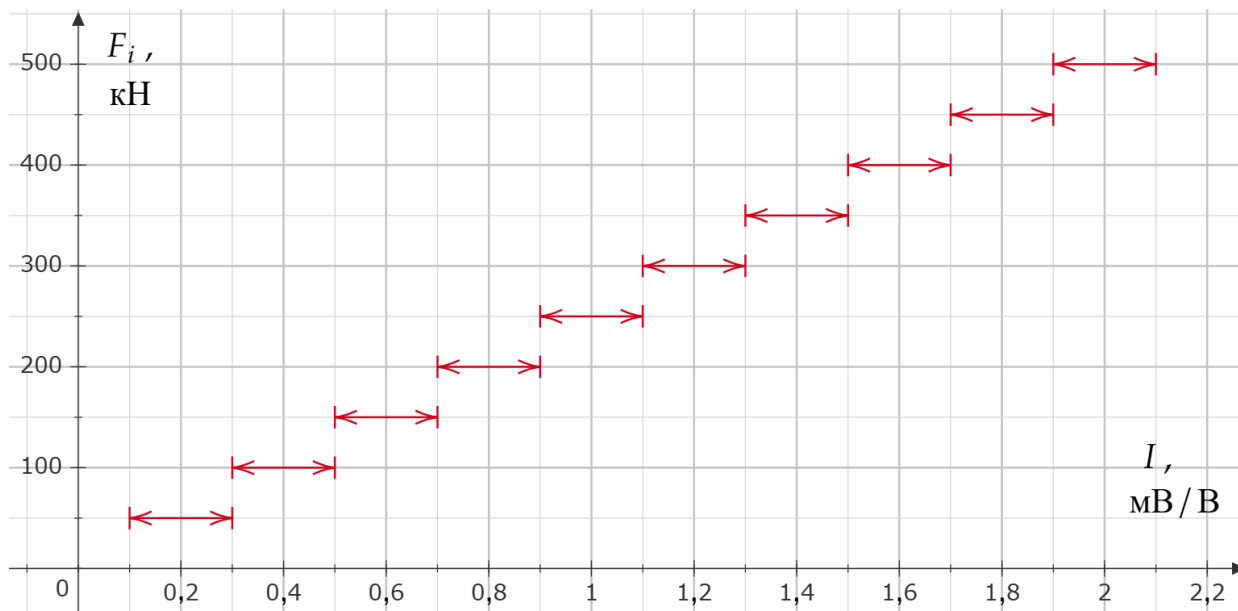


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным / The figure is prepared by the authors using their own data

Рис. 4. График функции преобразования: ось абсцисс – показания динамометра; ось ординат – сила нагружения; горизонтальные стрелки – область диапазона распространения коэффициента чувствительности

Fig. 4. Transformation function graph: abscissa axis – dynamometer readings; ordinate axis – loading force; horizontal arrows – the region of the sensitivity coefficient distribution range

производят измерение проекции вектора силы, действующей на динамометр, на ось чувствительности, а дополнительные каналы многоканальных динамометров не градуируют и применяют для проверки правильности установки динамометров в конструкции группы.

Метод градуировки дополнительных каналов динамометров

В рамках данного исследования также разработан метод градуировки дополнительных каналов динамометров. Для этого проведены измерения величины силы, действующей на динамометр в процессе нагружения на эталоне с применением призмы (рис. 5).

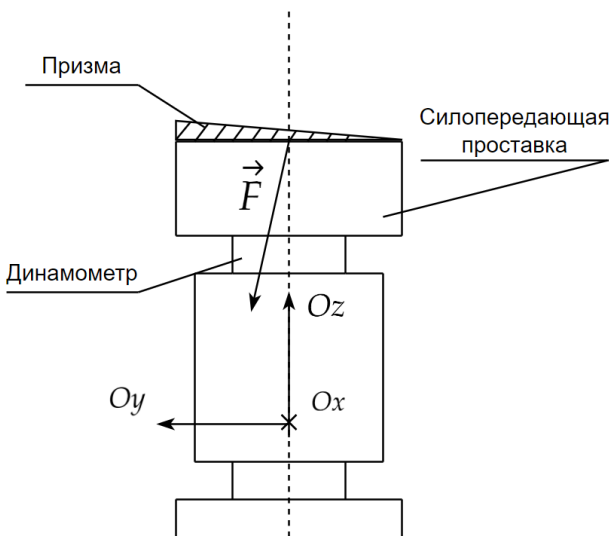


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным / The figure is prepared by the authors using their own data

Рис. 5. Схема расположения призмы при нагружении динамометра: F – вектор силового введения; $O_{z(x,y)}$ – оси чувствительности динамометра

Fig. 5. Diagram of the prism arrangement under dynamometer loading: F – force introduction vector; $O_{z(x,y)}$ – dynamometer sensitivity axes

Для компенсации погрешности, связанной с поперечными составляющими нагрузками, разработан метод градуировки дополнительных каналов динамометров. Его физическая сущность заключается в использовании призмы, которая искусственно создает известное отклонение вектора силы, позволяя определить градуировочные характеристики для дополнительных измерительных каналов.

Метод реализован в следующей последовательности.

1. Нагружение без призмы (предварительная градуировка основного канала Z).

Динамометр нагружали без призмы на эталонной силовоспроизводящей установке. Регистрировали показания основного канала \vec{F}_{qz} при последовательном повороте динамометра в положениях $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$. Процедуру повторяли несколько раз. Проводили градуировку основного канала в соответствии с зарегистрированными показаниями известным методом.

2. Нагружение с призмой.

Динамометр устанавливали на эталонную силовоспроизводящую установку с применением призмы. Наклонную плоскость призмы ориентировали коллинеарно оси одного из боковых каналов (например, канал X при положении поворота динамометра 0°). Регистрировали показания всех трех измерительных каналов $\vec{F}_{qz}, \vec{F}_{qx}, \vec{F}_{qy}$ в тех же положениях поворота ($0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$). Таким образом (рис. 6):

– в положениях 0° и 180° справедливо утверждение, что $F_{qx} \approx 0$;

– в положениях 90° и 270° справедливо утверждение, что $F_{qy} \approx 0$.

3. Определение градуировочных коэффициентов дополнительных каналов:

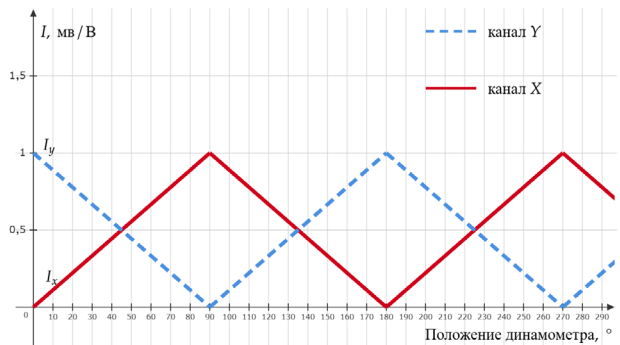


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным / The figure is prepared by the authors using their own data

Рис. 6. График показаний боковых каналов

Fig. 6. Graph of lateral channel readings

1) в положениях 0° и 180° поперечная сила направлена вдоль оси Y, что позволило, используя показания основного и боковых каналов, рассчитать коэффициент для канала Y согласно уравнениям (5) и (6).

$$|\vec{F}_q|^2 = |\vec{F}_{qz}|^2 + |\vec{F}_{qx}|^2 + |\vec{F}_{qy}|^2, \quad (5)$$

$$|\vec{F}_{qy}|^2 = |\vec{F}_q|^2 - |\vec{F}_{qz}|^2 - |\vec{F}_{qx}|^2, \quad (6)$$

где $|\vec{F}_{qx}|^2 = 0$;

2) аналогично в положениях 90° и 270° поперечная сила направлена вдоль оси X, что позволило по формуле (7) рассчитать градуировочный коэффициент для канала X:

$$|\vec{F}_{qx}|^2 = |\vec{F}_q|^2 - |\vec{F}_{qz}|^2 - |\vec{F}_{qy}|^2, \quad (7)$$

где $|\vec{F}_{qy}|^2 = 0$.

Результаты и обсуждение

Выводы и итоги исследования

Исследованы факторы, снижающие точность метода совокупных измерений силы при использовании групп параллельно нагружаемых динамометров. В ходе эксперимента с группой из трех динамометров получена серия данных (рис. 3). Установлено: разброс показаний между отдельными динамометрами на каждой ступени нагружения значительно превышает

неопределенность измерений динамометров из состава группы, что указывает на влияние отклонения опорной плоскости от горизонтального положения и различий в жесткости чувствительных элементов динамометров.

Разработанная в исследовании теоретическая модель, основанная на анализе отклонения векторов сил от осей чувствительности динамометров, позволила в количественном выражении оценить влияние данного эффекта на погрешность измерений. Проведена серия нагружений многоканального динамометра на ступени нагружения 150 кН. В ходе обработки показаний динамометра, зарегистрированных по итогам данной серии нагружений, проведен расчет измеренных значений составляющих вектора силы (табл. 1 и 2). Значения боковых компонент вектора силы в рамках данной обработки показаний найдены с применением метода градуировки дополнительных каналов динамометров для призмы с наклоном силопередающей поверхности 0,5°.

Результаты расчета погрешности (табл. 1 и 2):

- отражают влияние отклонения вектора силы величиной 0,5° на погрешность измерений около 0,03 % (-0,026–0,002 %);

- показывают возможность уменьшения погрешности измерений, если применяется метод градуировки дополнительных каналов динамометров при отклонении вектора силы от оси чувствительности динамометра.

Таблица 1. Результаты измерений составляющих вектора силы без применения призмы
Table 1. Measurement results of force vector components without using a prism

Нагрузка, Н $ \vec{F}_{эм} $	Результаты измерений, Н			
	Основной канал $ \vec{F}_z $	Дополнительный канал $ \vec{F}_x $	Дополнительный канал $ \vec{F}_y $	Сумма компонентов $ \vec{F} $
150 000	150 003	1 049	521	150 008

Погрешность результата измерений силы без учета боковых составляющих:

$$\Delta = |\vec{F}_z| - |\vec{F}_{эм}| = 150003 \text{ Н} - 150000 \text{ Н} = 3 \text{ Н}$$

$$\delta_{откл} = 0,002 \%$$

Погрешность результата измерений силы с учетом боковых составляющих:

$$\Delta = |\vec{F}| - |\vec{F}_{эм}| = 150008 \text{ Н} - 150000 \text{ Н} = 8 \text{ Н}$$

$$\delta_{откл} = 0,005 \%$$

Таблица составлена авторами по собственным данным / The table is prepared by the authors using their own data

Таблица 2. Результаты измерений составляющих вектора силы с применением призмы
Table 2. Measurement results of force vector components using a prism

Нагрузка, Н $ \vec{F}_{эм} $	Результаты измерений, Н			
	Основной канал $ \vec{F}_z $	Дополнительный канал $ \vec{F}_x $	Дополнительный канал $ \vec{F}_y $	Сумма компонентов $ \vec{F} $
150 000	149 961	43	2 793	149 987

Погрешность результата измерений силы без учета боковых составляющих:

$$\Delta = |\vec{F}_z| - |\vec{F}_{эм}| = 149961 \text{ Н} - 150000 \text{ Н} = -39 \text{ Н}$$

$$\delta_{откл} = -0,026\%$$

Погрешность результата измерений силы с учетом боковых составляющих:

$$\Delta = |\vec{F}| - |\vec{F}_{эм}| = 149987 \text{ Н} - 150000 \text{ Н} = -13 \text{ Н}$$

$$\delta_{откл} = -0,009\%$$

Таблица составлена авторами по собственным данным / The table is prepared by the authors using their own data

Согласно разработанной теоретической модели (формулы (2)–(4)), принимая во внимание расчеты (табл. 1 и 2), отклонение опорной плоскости силовоспроизводящей машины от горизонтального положения, а также неодинаковое значения жесткости чувствительных элементов динамометров, влияющих на результат измерений, приводит к уменьшению проекции вектора силы на ось чувствительности динамометра и, как следствие, к занижению результата измерения общей силы по формуле (1).

Обсуждение

Полученные результаты частично согласуются с выводами работы [4], где тоже отмечено влияние вектора приложения нагрузки на показания силоизмерительных устройств. Однако в отличие от [4] в данном исследовании это влияние проанализировано для конфигурации группы динамометров с эффектом взаимного влияния. Обсуждение выявленного эффекта частичной компенсации погрешностей внутри группы представляет значительный интерес ввиду предположения о том, что алгебраическое суммирование разнонаправленных погрешностей отдельных датчиков может быть использовано в будущем для разработки способа коррекции результата измерений, целью которого служит увеличение точности измерений силы в диапазоне свыше 1 МН.

Важным практическим результатом представленной в статье работы является разработка нового метода градуировки дополнительных каналов многоканальных динамометров. Предложенный способ применения призмы (рис. 5) и последующей обработки данных по формулам (6) и (7) позволили получить градуировочные характеристики для каналов, измеряющих поперечные составляющие изучаемого вектора силы. Выводы исследования открывают перспективу не только для контроля правильности установки датчиков, но и для прямого измерения величины боковой нагрузки с последующей компенсацией ее влияния.

Перспективным направлением будущей работы в данной области исследований может быть создание математической модели, использующей данные всех измерительных каналов группы для расчета скорректированного значения приложенной силы, что позволит существенно повысить точность метода в целом.

Заключение

В ходе представленного исследования выполнен анализ ключевых факторов, влияющих на точность метода совокупных измерений силы, и предложены пути для снижения их влияния. Установлено, что даже при использовании запатентованной конструкции [2] невозможно

избежать неравномерного распределения нагрузки и отклонения векторов сил от осей чувствительности, что увеличивает систематическую погрешность.

Основной вывод: доминирующий источник погрешности – уменьшение проекции силы на ось чувствительности динамометра при ее отклонении. Этот вывод подтверждается моделями (формулы (1)–(4)) и экспериментальными данными (рис. 3).

Сравнение выводов представленного исследования с опубликованными данными [4–6] показывает, что выявленные закономерности носят общий характер для силоизмерительных систем, но их проявление и влияние в конфигурации с параллельно нагружаемыми динамометрами имеют свою специфику. Полученные результаты, включая разработанный способ градуировки дополнительных каналов, вносят вклад в развитие метрологического обеспечения измерений величин силы в диапазоне свыше 1 МН и открывают пути для дальнейшего повышения точности метода совокупных измерений.

Благодарности: Авторы выражают благодарность ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» за предоставление технической базы для проведения экспериментов.

Acknowledgments: The authors would like to express their gratitude to the D. I. Mendeleev Institute for Metrology for providing the technical facilities for conducting the experiments.

Вклад авторов: Сычев В. В. – разработка методологии исследования, создание модели исследования; проведение экспериментального процесса (в частности, проведение экспериментов, обработка данных); применение математических методов для анализа и обобщения данных; создание визуальных материалов работы; написание первоначального текста рукописи, ее пересмотр. Шмигельский И. Ю. – руководство планированием и выполнением исследовательской деятельности, включая наставничество.

Contribution of the authors: Sychev V. V. – development of research methodology, creation of

the research model; conducting the experimental process (including performing experiments, data processing); application of mathematical methods for data analysis and synthesis; creation of visual materials for the work; writing the original draft of the manuscript, its revision. Shmigelskiy I. Yu. – supervision of the planning and execution of the research activities, mentoring.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи. Работа выполнена в рамках диссертационного исследования младшего научного сотрудника научно-исследовательской лаборатории госэталонов в области измерений массы и силы ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» В. В. Сычева «Метрологическое обеспечение методики передачи единицы силы рабочим эталонам методом совокупных измерений». Научный руководитель: Шмигельский И. Ю., канд. техн. наук, руководитель научно-исследовательской лаборатории госэталонов в области измерений массы и силы ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева».

Conflict of interest: The authors declare that there are no obvious or potential conflicts of interest associated with the publication of this article. The work was carried out within the framework of the dissertation research of V. V. Sychev, Junior Researcher of the Mass and Force Laboratory of the D. I. Mendeleev Institute for Metrology, titled «Metrological Assurance of the Procedure for Transferring the Unit of Force to Working Standards by the Method of Combined Measurements». Scientific supervisor: Shmigelskiy I. Yu., Cand. Sci. (Eng.), Head of the Mass and Force Laboratory, D. I. Mendeleev Institute for Metrology.

Финансирование: Это исследование не получало финансовой поддержки в виде гранта от какой-либо организации государственного, коммерческого или некоммерческого сектора.

Funding: This research did not receive financial support in the form of a grant from any governmental, for-profit, or non-profit organizations.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шмигельский И. Ю. Эталоны силы до 1 МН и выше // Эталоны. Стандартные образцы. 2024. Т. 20, № 3. С. 5–12. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2024-20-3-5-12>
2. Устройство для передачи размера единицы силы, воспроизводимой эталонной силовоспроизводящей установкой: пат. 121570 РФ; заявл. 05.07.2012; опубл. 27.10.12, Бюл. № 30.
3. Сычев В. В., Шмигельский И. Ю. Факторы, влияющие на результат измерений силы при проведении измерений методом совокупных измерений // За нами будущее : тезисы докладов III Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов и тексты работ участников пилотного Международного конкурса «Лучший молодой метролог МГС СНГ» 2024 года, 11–14 июня 2024 г. / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт) [и др.]. Санкт-Петербург: ООО «Типография Литас+», 2024. С. 432–433.
4. Коллер А. А., Каленицкий А. И., Черепанов В. Я. Методы определения зависимости показаний силоизмерительных устройств от вектора приложения нагрузки // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012 : сб. мат. Международной научной конференции «Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника, нанотехнологии», Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г. / Сибирский государственный университет геосистем и технологий [и др.]. Новосибирск: СГГА, 2012. С. 144–148.
5. Kleckers T., Schaefer A. Force calibration with build up systems // EPJ Web of Conferences. 18th International Congress of Metrology. 2017. Вып. 14009. URL: <https://doi.org/10.1051/metrology/201714009> (дата обращения: 29.10.2025).
6. Abdulhakim M., Hassan S. R., Tegtmeier F. Practical investigation for the concept of a serial-type build-up force measurement system // ACTA IMEKO. 2020. Т. 9, № 5. С. 143–149. https://doi.org/10.21014/acta_imeko.v9i5.957

REFERENCES

1. Shmigelskiy IY. Force measurement standards up to 1 MN and above. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2024;20(3):5–12. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2024-20-3-5-12>
2. Ostrivnoy AF, Senyansky MV, Derevyanko AS, Khanov YuA. Device for transfer of the size of the power unit reproduced by the reference standard power player. *Patent RF*, no. 121570, 2012. (In Russ.).
3. Sychev VV, Shmigelskiy IYu. Factors affecting the result of force measurements using the cumulative measurement method. In: *Za nami budushhee: Abstracts of the III international scientific and practical conference of young scientists and specialists and texts of the works of the participants of the pilot international competition «Luchshij molodoj metrolog MGS SNG» 2024*, 11–14 June 2024, Saint Petersburg, Russia. Saint Petersburg: ООО «Типография Литас+»; 2024. P. 432–433. (In Russ.).
4. Koller AA, Kalenitsky AI, Cherepanov VYa. Methods for determining the dependence of force measuring devices' readings on the load vector. In: *Intere'kspo GEO-Sibir'-2012: collection of materials of the International Scientific Conference «Specializirovannoe priborostroenie, metrologiya, teplofizika, mikrotexnika, nanotexnologii»*, 10–20 April 2012, Novosibirsk, Russia. Novosibirsk: Siberian State University of Geosystems and Technologies; 2012. P. 144–148. (In Russ.).
5. Kleckers T, Schaefer A. Force calibration with build up systems. *EPJ Web of Conferences. 18th International Congress of Metrology*. 2017;14009. Available at: <https://doi.org/10.1051/metrology/201714009> [Accessed 29 October 2025].
6. Abdulhakim M, Hassan SR, Tegtmeier F. Practical investigation for the concept of a serial-type build-up force measurement system. *ACTA IMEKO*. 2020;9(5):143–149. https://doi.org/10.21014/acta_imeko.v9i5.957

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сычев Владимир Владимирович – младший научный сотрудник научно-исследовательский лаборатории государственных эталонов в области измерений массы и силы, ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» 190005, г. Санкт-Петербург, пр. Московский, 19
e-mail: v.v.sychev@vniim.ru

Шмигельский Илья Юрьевич – канд. техн. наук, руководитель научно-исследовательский лаборатории государственных эталонов в области измерений массы и силы, ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» 190005, г. Санкт-Петербург, пр. Московский, 19
e-mail: i.y.shmigelskiy@vniim.ru
<https://orcid.org/0009-0006-5076-5126>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vladimir V. Sychev – Junior Researcher of the Mass and Force Laboratory, D. I. Mendeleev Institute for Metrology

19 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190005, Russia
e-mail: v.v.sychev@vniim.ru

Ilya Yu. Shmigelskiy – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Mass and Force Laboratory, D. I. Mendeleev Institute for Metrology

19 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190005, Russia
e-mail: i.y.shmigelskiy@vniim.ru
<https://orcid.org/0009-0006-5076-5126>