

# Повышение точности и скорости калибровки цифровых графмометров за счет применения средств искусственного интеллекта

В. А. Сушников, К. К. Семенов

ООО «Элграмм», Санкт-Петербург;  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

semenov\_kk@spbstu.ru

**Аннотация.** В докладе представлен новый способ организации калибровки и поверки графмометров за счет применения средств искусственного интеллекта, обеспечивающий повышение точности и скорости выполнения соответствующих метрологических процедур. Представлена структура соответствующей калибровочной установки для графмометров, впервые задействующей машинное зрение, описаны основные этапы проводимой математической обработки с использованием нейронных сетей. Обсуждены достоинства и преимущества предлагаемого подхода в сравнении со стандартной методикой поверки существующих серийно выпускаемых графмометров.

**Ключевые слова:** графмометры, поверка графмометров, калибровка графмометров, метрологическое обеспечение

## I. ВВЕДЕНИЕ

Графмометры предназначены для измерения малых усилий и представляют собой важный элемент систем контроля качества для ряда ключевых областей промышленности [1]. С их помощью осуществляются измерения силы нажатия или отрыва контактов электромеханических реле при их выходном и входном контроле; данные средства задействованы при сборке вакуумных выключателей, при выполнении контроля на часовых производствах и при решении других задач прецизионной механики. Графмометры находят применение и в других областях, где возникают задачи измерения малых усилий, – например, в медицине в миологических исследованиях [2]. Важность данных средств измерений подчеркивается и тем обстоятельством, что они выделены в обособленную область измерений – графмометрию, – хотя представляют собой по сути дела частный случай динамометров.

Основными потребителями графмометров являются в первую очередь отделы технического контроля крупных производителей электромеханических реле (в России – АО «НПК «Северная заря» [3], АО «Иркутский релейный завод» [4], АО «Завод «Электроприбор» [5], Специальное конструкторско-технологическое бюро по релейной технике (СКТБ РТ) [6], ООО «ИРЗ ТЕСТ» [7]), крупных потребителей электромеханических реле (в России – ОАО «НПП «Старт» [8], ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина» [9], ОАО «НПП «Полус» [10], ОАО

«ВПК «НПО Машиностроения» [11], ОАО «НПК «КБМ» [12], ФГУП МОКБ «Марс» [13], ОАО «Концерн ВКО «Алмаз-Антей» [14]), заводы точной механики (в России – ОАО «Научно-исследовательский институт точной механики» [15]).

К основным типам серийно выпускаемых графмометров могут быть отнесены:

- 1) механические ручные графмометры часового типа с аналоговым индикатором (рис. 1а [16], 1б, [17]),
- 2) постепенно приходящие им на смену портативные цифровые графмометры (рис. 2а, 2б [18]).

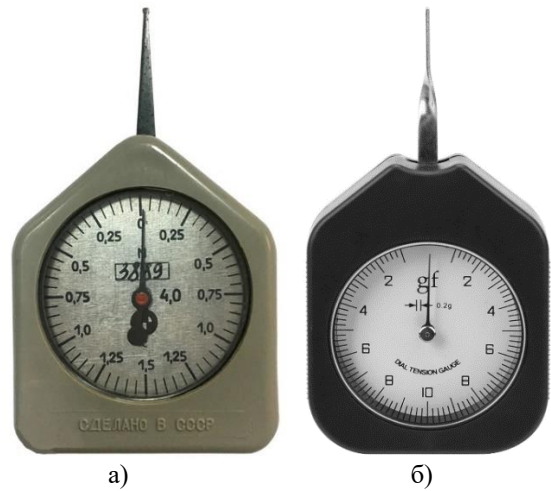


Рис. 1. Графмометры часового типа: а) – отечественный Г-1,5 [16], б) – зарубежный [17]

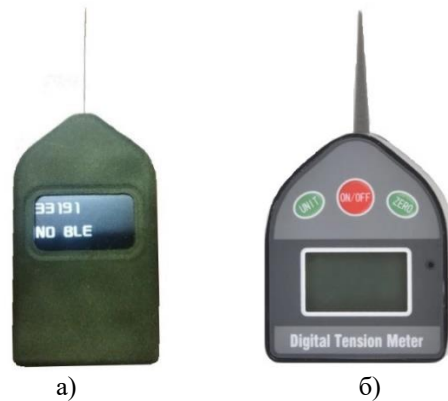


Рис. 2. Цифровой графмометр: а) – разработанный авторами, б) – зарубежный EZSS [18]

Работа выполнена при финансовой поддержке Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере, договор № 5025ГС1/85499 от 10.07.2023 г.

Обозначенный тренд на превалирование использования цифровых граммометров для контроля качества электромеханических реле обусловлен их следующим важным преимуществом – исключением одновременного выполнения трех ручных операций (контроль отрыва контакта, точки приложения граммометра и его показаний) при контроле реле.

Дополнениями к приведенной классификации, не являющимися серийно выпускаемыми средствами измерений, выступают автоматизированные установки измерения характеристик электромеханических реле [19], доля применения которых в настоящее время в соответствующей области измерений исчезающе мала в силу их высокой стоимости.

Типовое строение граммометра предполагает наличие измерительного щупа, осуществляющего восприятие усилия и передающего его к следующему преобразователю в измерительном канале (рис. 1 и 2).

В отечественную федеральную государственную информационную систему «Аршин» на момент подготовки статьи внесены только граммометры часового типа [20]: граммометры Г-0,5; Г-1,5; Г-3,0 (ПАО «Завод Старорусприбор», г.Старая Русса, внесены в государственный реестр 08.05.2018 и 15.06.2021) и граммометры ГМ-1, ГМ-2, ГМ-3, ГМ-4, ГМ-5 (завод «Красная заря», г. Санкт-Петербург, внесены в государственный реестр 08.05.2018). Межповерочный интервал у всех перечисленных средств измерений составляет 1 год. Цифровых граммометров, прошедших процедуру утверждения типа, в системе «Аршин» нет. По этой причине все действующие методики поверки граммометров относятся к поверке граммометров часового типа и только к ним.

## II. ДЕЙСТВУЮЩИЕ МЕТОДИКИ ПОВЕРКИ ГРАММОМЕТРОВ

В настоящее время к действующим документам, регламентирующим процедуру проведения поверочных или калибровочных работ с граммометрами, относятся следующие.

1) Методика поверки Са4.046.000 Д7 [21], входящая в комплект поставки граммометров часового типа, изготавливаемых ПАО "Завод Старорусприбор" [16] и предписывающая использовать для поверки набор образцовых гирь IV разряда, приспособление для тарирования, аттестованного по массе с точностью гирь IV разряда, или лабораторные весы квадрантные типа ВЛКТ-500г [22].

2) Правила ПР 32.ЦШ 04-98 системы калибровки граммометров часового типа Г10-60, Г50-300 [23]. Средствами калибровки согласно ним должны выступать набор гирь 4-го разряда по ГОСТ 7328-89 [24] и специальная корзиночка (приспособление), масса которой должна соответствовать нижнему пределу измерения граммометра (для Г10-60 и Г50-300 – соответственно 10 или 50 гс), при этом отклонение массы корзиночки не должно превышать 1 % от ее номинального значения [23].

Калибровку документ [23] предписывает выполнять следующим образом: «Перед проведением калибровки на конец щупа граммометра навешивается корзиночка.

Грамометр необходимо держать в таком положении, чтобы после каждого нагружения щуп его находился в горизонтальном положении. Отклонение от горизонтального положения допускается не более 5°.

Для стабилизации работы пружины (граммометра часового типа – прим. авторов) следует нагрузить граммометр до максимального предельного значения и выдержать в таком положении в течение 5 минут. Разгрузить граммометр. Стрелка прибора должна вернуться в нулевое положение...

Погрешность показаний следует определять на всех оцифрованных отметках шкалы, последовательно нагружая граммометр гирями до максимального предельного значения, отдельно для правой и левой части шкалы... Погрешность на каждой оцифрованной отметке шкалы не должна быть более 4 % от верхнего предела измерения (2,4 гс для Г10-60 и 12 гс для Г50-300)...

Вариацию показаний следует определять на всех оцифрованных отметках шкалы трехкратным приложением нагрузки. Разность между наименьшим и наибольшим показаниями в каждой точке не должна превышать 4 % от верхнего предела измерений».

Указанные методики поверки предлагают выполнение поверки граммометра в статическом режиме измерений, когда нагружение измерительного щупа осуществляется постоянным весом с помощью гири. Такая процедура предполагает довольно долгий процесс осуществления поверки, поскольку, как было отмечено выше, после смены весозадающей гири необходимо выдерживать паузу на успокоение вынужденных колебаний измерительного щупа. Также подобный способ поверки сопряжен с возникновением погрешностей из-за смещения точки приложения усилия к измерительному щупу при изменении нагрузки из-за изгиба последнего. Документ [23] частично пытается компенсировать данное обстоятельство, но представленная в нем рекомендация по соблюдению горизонтальности далека от реальных измерительных ситуаций применения граммометров на практике, когда положение граммометра, прежде всего, определяется объектом измерения, на котором выполняется регистрация усилий. Отсутствие учета реальной точки приложения силы в действующих методиках поверки вызвано относительно невысокой точностью поверяемых граммометров часового типа: предел приведенной погрешности для них составляет не ниже 4 % [1, 23]. Существенно лучшая точность, обеспечиваемая цифровыми граммометрами, осуществляющими измерение без механических пружинных преобразователей, не может быть удостоверена применением данных методик и требует разработки новых процедур метрологического обеспечения.

Использование современных средств автоматизации позволяет ускорить процесс поверки за счет применения средств машинного зрения и интеллектуальной обработки данных. Настоящая статья предлагает новый метод организации поверки и калибровки, пригодный как для граммометров часового типа, так и для цифровых граммометров, и позволяющий существенно

уменьшить количество средств поверки/калибровки и ускорить выполнение данной процедуры.

### III. МЕТОДИКА ПОВЕРКИ ГРАММОМЕТРОВ, ОСНОВАННАЯ НА ПРИМЕНЕНИИ СРЕДСТВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Современные средства искусственного интеллекта позволяют автоматизировать многие технические операции, ранее выполнявшиеся только вручную. Развитие методов машинного зрения в совокупности с быстрым прогрессом камер, обеспечивающих высокие разрешение и скорость съемки, позволили использовать оптические методы для контроля процесса выполнения поверки и/или калибровки с последующей покадровой обработкой получаемых изображений. Авторы настоящей работы предлагают использовать те преимущества, что обеспечиваются применением уже ставших стандартными инструментов в области искусственного интеллекта для выполнения ускоренной поверки граммометров. Поверочную/калибровочную установку предлагается организовать так.

На образцовых высокоточных весах с цифровым индикатором размещается специальная надстройка в виде плоской весомой металлической пластины с размерами, близкими к платформе весов, посередине которой приварен вертикальный стержень. К торцу стержня поверитель прикладывает измерительный шуп граммометра нужной стороной и плавно и медленно оказывает всё возрастающее усилие на торец стержня. Перед весами размещена оптическая система, состоящая из высокоскоростной камеры с достаточным разрешением кадра. Весы ориентированы в пространстве таким образом, что обеспечивается параллельность индикатора весов и камеры либо близкое к ней состояние. Поверитель держит граммометр рукой так, как это происходит при обычных измерениях, но при этом граммометр ориентирован стороной с индикатором в пространстве так, чтобы плоскость индикатора так же была параллельной плоскости камеры либо обеспечивалось близкое к тому состояние. Таким образом, в каждом кадре, снятом камерой, присутствуют показания двух измерительных средств, причем изображение их цифровой записи имеет малые геометрические деформации (отклонения от параллельности с плоскостью кадра). Показания на одном из индикаторов будут обязательно повернуты относительно другого. Время установления результата измерений у весов должно быть на порядок меньше времени установления показаний граммометра, что в целом легко обеспечивается существующей номенклатурой соответствующих средств измерений.

Каждый кадр выполняемой съемки процесса поверки граммометра подвергается следующей автоматической математической обработке:

1) выделению области показаний каждого из двух индикаторов с помощью средств искусственного интеллекта, обученных на размеченных ретроспективных записях и направленных на поиск на изображении заданных паттернов [25, 26] с определением их местоположения,

2) определению углов поворота каждого индикатора относительно плоскости кадра на основе преобразования Радона [27],

3) определению итоговых границ областей, содержащих показания того или иного индикатора участвующих средств измерений (граммометра или образцовых весов),

4) предварительным морфологическим преобразованиям строго в пределах областей кадра, выделенных на предыдущем этапе математической обработки и содержащих в себе только показания того или иного индикатора (данная операция направлена на обеспечение наилучшей контрастности для следующей шага обработки),

5) распознаванию показаний на каждом из индикаторов за счет использования средств искусственного интеллекта для оптического распознавания символов (в случае использования семисегментных индикаторов – обученных специально на обнаружение отображаемых на них цифр) [28].

Выполнение последней из перечисленных операций производится с учетом межкадровых изменений, когда значение, отображаемое в том или ином разряде индикатора, переходит из одного своего положения в другое и на кадре в данном разряде оказывается суперпозиция двух цифр (когда какая-то часть из семи сегментов не успела погаснуть или, наоборот, загореться). Это может привести к ошибкам распознавания, поэтому необходимо выполнять сравнение двух соседних кадров и определять моменты возникновения подобных ситуаций.

По результатам покадровой обработки получаются два временных ряда: показаний граммометра  $G_0(t)$ , показаний весов  $W_0(t)$ ,  $t \in [0, t_{max}]$ . Шаг по времени между кадрами определяется техническими настройками камеры и строго определен. Так как выполняемая съемка процесса поверки обеспечивает передискретизацию (то есть частота смены кадров существенно выше скорости изменений показаний граммометра и весов), то далее выполняется медианная фильтрация для устранения остаточных ошибок распознавания показаний на индикаторах. Выполняемый дальнейший анализ получившихся временных рядов  $G_1(t)$  и  $W_1(t)$  направлен на получение требуемых количественных метрологических характеристик граммометра. Определяется наиболее вероятный сдвиг  $\Delta t$  по времени между сигналами  $G_1(t)$  и  $W_1(t)$  путем определения положения максимума их взаимной корреляционной функции  $R(\tau) = \frac{1}{t_{max}-\tau} \cdot \int_0^{t_{max}} G_1(t+\tau) \cdot W_1(t) dt$ ,  $\tau \geq 0$ , нормированной на длительность:

$$\Delta t = \arg \max_{\tau \geq 0} R(\tau).$$

Значение  $\Delta t$  является одной из основных динамических характеристик граммометра и отражает время запаздывания его показаний. Далее определяется зависимость погрешности граммометра на диапазоне измеряемых значений путем вычисления зависимости  $\Delta G(G) = G_1(t') - W_1(t' - \Delta t)$ , где  $t' = G_1^{-1}(G)$  – такой момент времени, при котором  $G_1(t') = G$ .

Поверка осуществляется нагружением измерительной шупа сначала в одну, а затем в другую сторону. Поверитель при этом стоит вначале по одну сторону от весов, а затем переходит на другую.

Поскольку возможны ошибки распознавания, то должно осуществляться не менее трех циклов поверки. Пусть получаемые в их ходе оценки зависимости  $\Delta G(G)$  обозначены соответственно  $\Delta G_1(G), \Delta G_2(G), \dots, \Delta G_k(G)$ ,  $k \geq 3$ . В качестве итоговой оценки для каждого заданного значения  $G$  берется медиана значений  $\Delta G_1(G), \Delta G_2(G), \dots, \Delta G_k(G)$ .

В случае наличия у цифрового граммометра беспроводного канала передачи данных задача организации поверки несколько изменяется: пропадает необходимость в контроле значений на индикаторе граммометра, обнуляется вероятность ошибок при распознавании соответствующих показаний, но появляется потребность в синхронизации результатов измерений, выполняемых с помощью прецизионных весов и граммометром.

В случае, если и задействованные весы обеспечены цифровым интерфейсом передачи данных в режиме реального времени, то задача организации поверки упрощается еще больше: синхронизация в таком случае может быть осуществлена средствами персонального компьютера, принимающего измерительную информацию от весов и граммометра; необходимость в распознавании показаний на индикаторах средства измерений исчезает вовсе. Подобные весоизмерительные средства с достаточными метрологическими характеристиками на рынке представлены и образуют довольно представительную номенклатуру.

Предложенная современная методика поверки граммометров обеспечивает существенное сокращение времени на калибровку или поверку одного граммометра в сравнении с действующими методиками поверки.

Также важным обстоятельством является то, что предложенная структура поверочной установки позволяет обеспечить проведение калибровки и поверки граммометров в динамическом режиме при измерении ими характеристик процессов прижатия/отжатия контактов электромеханического реле, чего невозможно добиться при использовании механических граммометров часового типа и методик их поверки.

Авторы реализовали предложенную ими методику поверки/калибровки граммометров на основе средств искусственного интеллекта на разработанном ими цифровом граммометре (рис. 2а). На рис. 3 представлен пример кадра, полученного в ходе видеозаписи процедуры калибровки с применением смартфона, закрепленного на штативе.



Рис. 3. Пример кадра при выполнении поверки/калибровки по представленной методике

Результаты выполненной обработки по представленному в данном разделе алгоритму привели к зависимости  $\Delta G(C)$ , изображенной на рис. 4, где в качестве  $C$  выступали показания граммометра, отложенные в единицах его выходного кода.

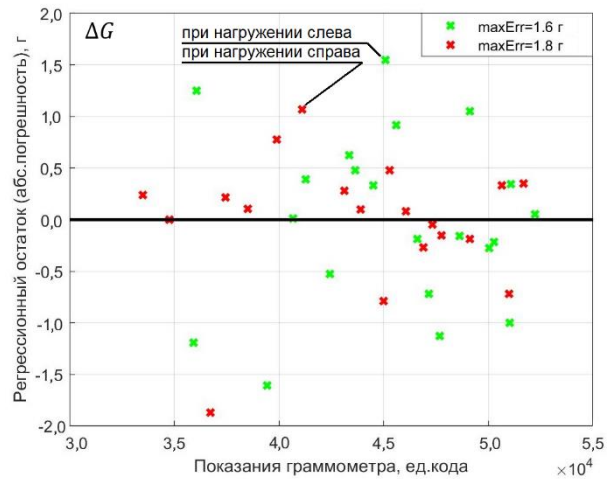


Рисунок 4. Оценки абсолютной погрешности граммометра, полученные при применении предложенной методики

На рис. 4 зеленым цветом отображены значения, полученные при отклонении измерительного щупа граммометра влево, а красным цветом – вправо. Указанные на рисунке значения maxErr отображают максимальную зафиксированную погрешность. Видим, что на диапазоне измерений в 50 г ее величина не превышала стандартных для типовых граммометров часового типа 4 % приведенной погрешности, что является свидетельством в пользу возможности использования предложенной методики для поверки устройств с погрешностью в указанных пределах и менее.

#### IV. ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ОТ ВНЕДРЕНИЯ НОВОЙ МЕТОДИКИ ПОВЕРКИ И КАЛИБРОВКИ ГРАММОМЕТРОВ

Рынок поверочных работ граммометров может быть охарактеризован следующим образом. В силу отмеченных в предыдущих разделах обстоятельств его величина в значительной мере определяется объемом выпуска электромеханических реле. Согласно [29] по состоянию на 2019 г. глобальный рынок производства реле составлял 13,9 млрд долл. США. Рынок реле российского производства в 2018 г. согласно [30] оценивался в 3,46 млрд руб. Консервативной оценкой стоимости контроля и диагностики реле при их массовом производстве является 20–25 % от его цены.

Согласно [31] наиболее значимыми диагностическими признаками электромеханических реле являются 24 электрических, динамических и механических параметра, большая часть из которых мониторится отделами технического контроля на соответствующих производствах. Из них 1 непосредственно измеряется исключительно граммометрами и еще 10 могут быть измерены с использованием цифровых граммометров, если

последние будут обеспечены синхронизацией с системами подачи электрического напряжения на обмотки реле. Таким образом, граммометры могут быть использованы для контроля 5–45 % из основных контролируемых характеристик электромеханических реле. Следовательно, общий объем рынка использования граммометров составляет на момент публикации статьи не менее 173 млн руб. в год в России, 695 млн долл. США в год в мире. При среднем сроке службы граммометров часового типа, равном 8 лет [1], и при средней цене продажи таких граммометров от производителя в 19,6 тыс. руб. за единицу [32] получаем, что ежегодный парк граммометров, подлежащих поверке и калибровке, составляет в России не менее 70,6 тыс. устройств.

Таким образом, уменьшение времени поверки или калибровки граммометров с 5 минут [23] на отдельное измерение в рамках соответствующей методики до 1–2 минут на всю поверку должно сэкономить не менее 3,4 тыс. часов рабочего времени квалифицированных инженеров-метрологов в российских сертифицированных метрологических центрах в год, что при перерасчете через значение средней заработной платы указанных специалистов соответствует не менее 14,0 млн руб. в год экономического эффекта от внедрения новой методики поверки.

#### V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В докладе представлен новый способ организации калибровки и поверки граммометров на основе применения средств искусственного интеллекта, обеспечивающий повышение точности и скорости выполнения соответствующих метрологических процедур. Представлена структура соответствующей поверочной/калибровочной установки для граммометров, впервые задействующей машинное зрение, описаны основные этапы проводимой математической обработки с использованием нейронных сетей. Обсуждены достоинства и преимущества предлагаемого подхода в сравнении со стандартными методиками поверки существующих серийно выпускаемых граммометров. Оценена величина экономического эффекта, достигаемого от внедрения предлагаемой методики поверки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Грамометр часового типа. Паспорт технический Са4.046.000 ПС. ОАО "Завод Старорусприбор". Утвержден в 2008 г. – 9 с. URL: <https://staroruspribor.ru/files/catalog/gallery/700/738/4.pdf>
- [2] Градов О.В. Грамометрические лаборатории на чипе и синхронизация граммометрии на чипе на изолированном мышечном волокне с рентгеноструктурным анализом ткани *in situ* и MEMS опосредованной спектроскопией времен возбуждения // Вестник новых медицинских технологий. 2015. Т. 22(3). С. 153-160.
- [3] АО «НПК «Северная заря». [Электронная страница]. Дата обращения: 10.04.2024. Формат доступа: свободный. URL: <http://relays.ru/>
- [4] АО «Иркутский релейный завод». [Электронная страница]. Дата обращения: 10.04.2024. Формат доступа: свободный. URL: <https://irzirk.ru/>
- [5] АО «Завод «Электроприбор». [Электронная страница]. Дата обращения: 10.04.2024. Формат доступа: свободный. URL: <https://www.elpri-rele.ru/>

- [6] Специальное конструкторско-технологическое бюро по релейной технике (СКТБ РТ). [Электронная страница]. Дата обращения: 10.04.2024. Формат доступа: свободный. URL: <https://sktbrt.ru/>
- [7] ООО «ИРЗ ТЕСТ». [Электронная страница]. Дата обращения: 10.04.2024. Формат доступа: свободный. URL: <https://test.irz.ru/>
- [8] ОАО «НПП «Старт». [Электронная страница]. Дата обращения: 10.04.2024. Формат доступа: свободный. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Старт\\_\(НПП\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Старт_(НПП))
- [9] ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина». [Электронная страница]. Дата обращения: 10.04.2024. Формат доступа: свободный. URL: <https://www.laspase.ru/ru/>
- [10] ОАО «НПП «Полус». [Электронная страница]. Дата обращения: 10.04.2024. Формат доступа: свободный. URL: <https://polus-tomsk.ru/>
- [11] ОАО «ВПК «НПО Машиностроения». [Электронная страница]. Дата обращения: 10.04.2024. Формат доступа: свободный. URL: <http://npomash.ru>
- [12] ОАО «НПК «КБМ». [Электронная страница]. Дата обращения: 10.04.2024. Формат доступа: свободный. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Конструкторское\\_бюро\\_машиностроения\\_\(Коломна\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Конструкторское_бюро_машиностроения_(Коломна))
- [13] ФГУП МОКБ «Марс». [Электронная страница]. Дата обращения: 10.04.2024. Формат доступа: свободный. URL: <https://www.mokb-mars.ru/>
- [14] ОАО «Концерн ВКО «Алмаз-Антей». [Электронная страница]. Дата обращения: 10.04.2024. Формат доступа: свободный. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Алмаз-Антей>
- [15] ОАО «Научно-исследовательский институт точной механики». [Электронная страница]. Дата обращения: 10.04.2024. Формат доступа: свободный. URL: <https://www.niitm.spb.ru/>
- [16] Г-1,5: Грамометр часового типа. [Электронный документ]. Дата обращения: 30.03.2024. Формат доступа: свободный. URL: [https://izm.by/image/cache/catalog/izmby\\_product/p63920768.pic01-850x850.jpg](https://izm.by/image/cache/catalog/izmby_product/p63920768.pic01-850x850.jpg)
- [17] Eujgoov Dial Tension Gauge SEG-10-1 Gram Tension Meter 10g Force Meter Measurement Tool with Single Needle. [Электронный документ]. Дата обращения: 30.03.2024. Формат доступа: свободный. URL: [https://m.media-amazon.com/images/I/31-Nu9-d2CS\\_SY445\\_SX342\\_QL70\\_FMwebp.jpg](https://m.media-amazon.com/images/I/31-Nu9-d2CS_SY445_SX342_QL70_FMwebp.jpg)
- [18] Ezzs-1.5digital Display Convenient Low Power Consumption Tensiometer Detector. [Электронный документ]. Дата обращения: 30.03.2024. Формат доступа: свободный. URL: <https://esstest.en.made-in-china.com/product/DdlasvUVZqpG/China-Ezzs-1-5digital-Display-Convenient-Low-Power-Consumption-Tensiometer-Detector.html>
- [19] G.F. Yu, Y.J. Chiu, X. Zheng, Z.L. Yuan and Z.X. Wang, "Contact pressure of high-voltage DC power relay change and life prediction and structure optimization," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 13(2), paper 10.1177/1687814021991666, 2021.
- [20] Подсистема «Аршин». [Электронная страница]. Дата обращения: 30.03.2024. Формат доступа: свободный. URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4>
- [21] Са4.046.000 Д7. Методика поверки граммометров часового типа.
- [22] Весы лабораторные квадрантные 4-го класса ВЛК-500 г; ВЛКТ-500 г; ВЛКТ-2 кг; ВЛКТ-5 кг; ВЛКТ-10 кг. Описание типа № 4873-76 от 25.02.1976.
- [23] ПР 32.ЦШ 04-98. Правила системы калибровки на федеральном железнодорожном транспорте. Грамометры часового типа Г10-60, Г50-300. Методика калибровки. М.: 1998. – 7с.
- [24] ГОСТ 7328-82 (СТ СЭВ 717-77). Меры массы общего назначения и образцовые. Технические условия. Введен 01.01.1984.
- [25] R. Girshick, "Fast r-cnn" In Proceedings of the IEEE international conference on computer vision, pp. 1440-1448, 2015.
- [26] Getting Started with R-CNN, Fast R-CNN, and Faster R-CNN. [Электронная страница]. Дата обращения: 10.04.2024. Формат доступа: свободный. URL: <https://www.mathworks.com/help/vision/ug/getting-started-with-r-cnn-fast-r-cnn-and-faster-r-cnn.html>
- [27] K. Jafari-Khouzani and H. Soltanian-Zadeh, "Radon transform orientation estimation for rotation invariant texture analysis," *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, vol. 27(6), pp. 1004-1008, 2005.

- [28] Recognize Seven-Segment Digits Using OCR [Электронная страница]. Дата обращения: 10.04.2024. Формат доступа: свободный.  
URL: <https://www.mathworks.com/help/vision/ug/recognize-seven-segment-digits-using-ocr.html>
- [29] Electromechanical Relay Market – Forecasts from 2021 to 2026. [Электронная страница]. Дата обращения: 10.04.2024. Формат доступа: свободный. URL: <https://www.researchandmarkets.com/reports/5332646/electromechanical-relay-marketforecasts-from>
- [30] Рынок реле в России. [Электронная страница]. Дата обращения: 10.04.2024. Формат доступа: свободный. URL: <https://commarketru.com/rynok-rele-v-rossii/>
- [31] Лавров В.А. Аппаратно-программные средства контроля качества и диагностики реле: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук, 05.11.16. Санкт-Петербург, 2016.
- [32] Граммометр часового типа Г, граммметры — динамометры типа Г. Старорусприбор. [Электронная страница]. Дата обращения: 10.04.2024. Формат доступа: свободный. URL: <https://staroruspribor.ru/catalog/grammometr-g/>