

## ИЗГОТОВЛЕНИЕ ШКАЛ АНАЛОГОВЫХ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ С НЕЛИНЕЙНЫМ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМ МЕХАНИЗМОМ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ ГРАВИРОВКИ

## PRODUCTION OF DIALS FOR ANALOGUE ELECTRICAL MEASURING INSTRUMENTS WITH NON-LINEAR MEASURING MECHANISM BY MEANS OF LASER ENGRAVING

**А.Г. Кириллов\*, В.Н. Сакевич**

*Витебский государственный технологический университет*

УДК 621.31

**A. Kirillov\*, V. Sakevich**

*Vitebsk State Technological University*

### РЕФЕРАТ

*ШКАЛА, ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРИБОР, ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ МЕХАНИЗМ, ЛАЗЕРНАЯ ГРАВИРОВКА, ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС*

*Предметом исследования является сравнительный анализ способов единичного производства шкал электроизмерительных приборов. Исследование проводится с целью улучшения качества изготавливаемых шкал, а также повышения производительности операции нанесения на шкалу информационных знаков и меток.*

*В работе использовался математический аппарат цифровой обработки изображений и определения положения стрелочного индикатора приборов в режиме реального времени. Для повышения качества изготовления шкал использовался метод лазерной гравировки.*

*Разработана структура программно-аппаратного комплекса, а также программное обеспечение для управления его работой. Разработан и внедрен в производство программно-аппаратный комплекс для изготовления шкал.*

### ABSTRACT

*DIAL, ELECTRICAL MEASURING INSTRUMENT, MEASURING MECHANISM, LASER ENGRAVING, HARDWARE-SOFTWARE COMPLEX*

*The subject of this research is a benchmark analysis of methods for single-item production of dials for electrical measuring instruments. The research was held with the aim to improve the quality of produced dials and also to enhance efficiency of printing the information signs and labels onto the dial.*

*The research uses mathematical tool of digital image processing and the position detection of instrument's pointer indicator in real time. The laser engraving method is used to improve the production quality of dials.*

*The structure of hardware and software complex is developed as well as software for operation control. Hardware and software complex for production of dials is developed and introduced into manufacturing process.*

### ВВЕДЕНИЕ

Аналоговые электромеханические электроизмерительные приборы находят широкое применение в энергетике, связи, промышленности, медицине, на транспорте и в других отраслях экономики. Электромеханические измерительные приборы преобразуют входную электрическую величину в механическую энергию поворотного измерительного механизма, на котором

жестко закреплен стрелочный указатель (стрелка). Несмотря на широкое распространение приборов с цифровой шкалой, их основным недостатком является невозможность наглядно видеть быстрое изменение измеряемой величины.

При производстве электромеханических приборов сохраняется значительная доля ручного труда, что повышает себестоимость и снижает

\* E-mail: alexkirill@tut.by (A. Kirillov)

качество приборов. Так, нанесение меток и некоторых информационных знаков на шкалу при традиционном способе ее изготовления осуществляется вручную.

Целью работы является автоматизация изготовления шкал приборов, что позволяет значительно снизить или даже устранить фактор влияния квалификации сборщика на качество шкал, повысить производительность и улучшить качество продукции.

#### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

ОАО «Витебский завод электроизмерительных приборов» серийно выпускает линейку моделей амперметров и вольтметров переменного тока Э8030, Э8032. Типовой вид шкалы этих приборов показан на рисунке 1.

В таких приборах измеряемая величина (обычно сила тока или напряжение) преобразуется посредством измерительного механизма в показание отсчетного устройства. Отсчетное устройство содержит шкалу и стрелку, которая имеет возможность совершать качательное движение. Для того чтобы каждому значению измеряемой величины соответствовал определенный угол поворота стрелки, необходимо вращающий момент измерительного механизма  $M_{и.м.}$  уравновесить противодействующим моментом сил упругости возвратной пружины:

$$M_{и.м.} = c \cdot \Delta\alpha, \quad (1)$$

где  $c$  – жесткость возвратной пружины,  $\Delta\alpha$  – ее угловая деформация.

Уравнение шкалы прибора – это зависимость угла поворота стрелки от измеряемой физической величины

$$\alpha = f(x). \quad (2)$$

Сама шкала представляет собой пластину, изготовленную из листа стального холоднокатанного, с нанесенными на нее оцифрованными метками и информационными символами. Функция (2) нелинейна и уникальна для каждого экземпляра электромагнитного измерительного механизма данных приборов. Данное свойство измерительного механизма, с одной стороны, увеличивает трудозатраты на изготовление приборов, а с другой – снижает стоимость.

При традиционном способе изготовления шкал нанесение меток осуществляется вручную. Сборщик устанавливает на прибор заготовку шкалы, на которой уже нанесена методом высо-

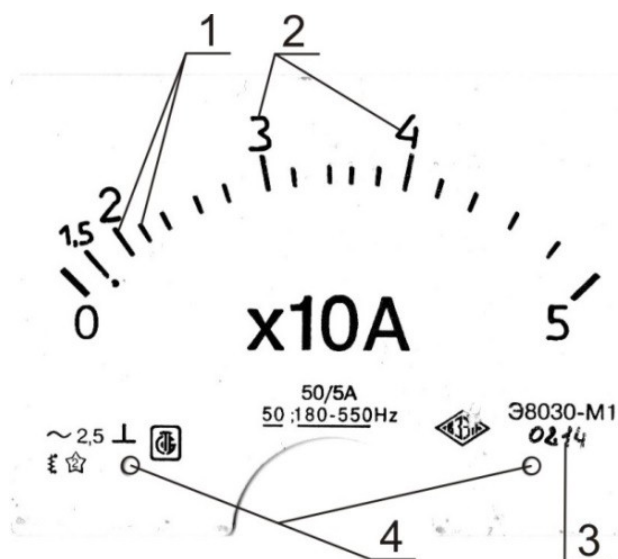


Рисунок 1 – Вид шкалы приборов типов Э8030, Э8032: 1 – метки, наносимые вручную; 2, 3 – информационные знаки, наносимые вручную; 4 – отверстия для крепления шкалы к прибору

кой печати большая часть информации: числа, обозначающие уровни сигнала, и информационные метки. Прибор подключается к калибратору, посредством которого вручную задаются уровни силы тока или напряжения. Сборщик карандашом отмечает метки на шкале по соответствующим положениям стрелки. По завершении этой операции другой сборщик тушью обводит метки, а также наносит некоторые информационные символы.

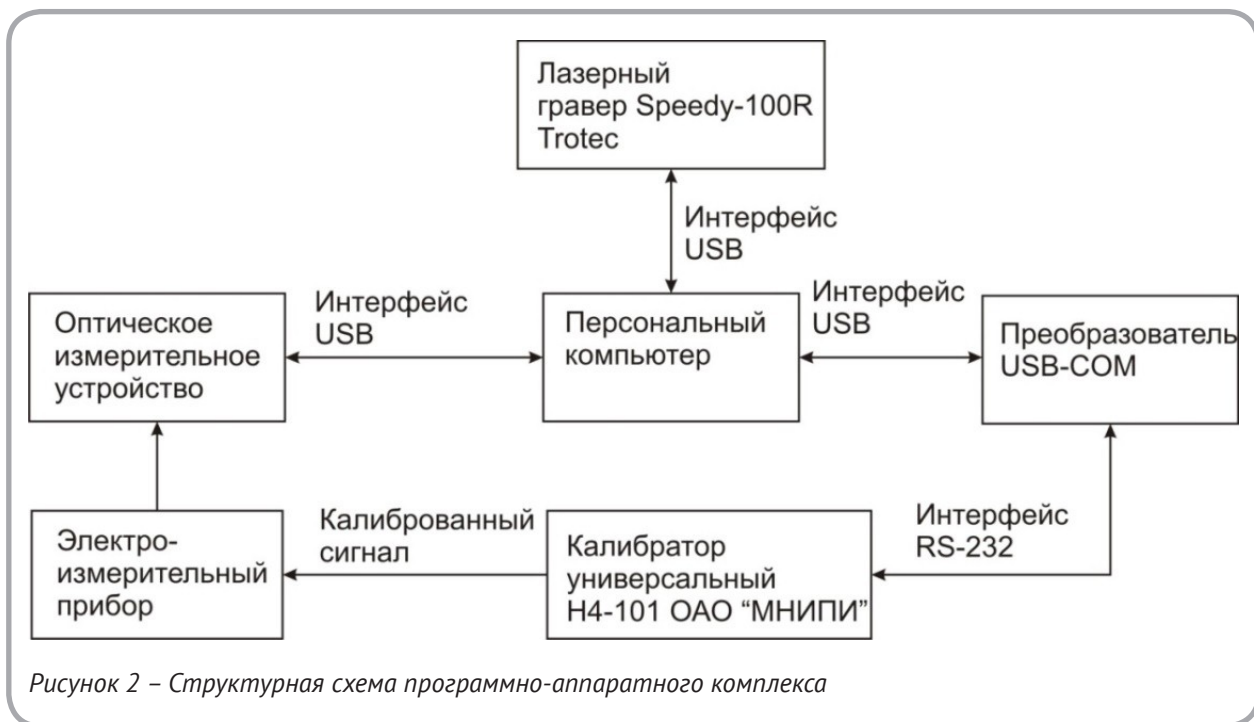
Такие известные методы нанесения изображений на шкалы приборов, как шелкография, металлографика, сублимационная печать, химическое травление и другие, являются либо непроизводительными при единичном производстве, либо не удовлетворяют требованиям абразивной и химической стойкости, долговечности под действием УФ-излучения и так далее. Предпочтение было отдано гравировальному способу изготовления шкал, который обеспечивает все необходимые показатели качества, точности, производительности, а также обладает положительным экономическим эффектом при внедрении. При сравнении современных лазерных и фрезерных гравёров зарубежных фирм преимущество было отдано первому в связи с более высокой производительностью и меньшей чувствительностью к качеству исходной заготов-

ки. Так, для лазерного твердотельного гравёра время обработки одной шкалы составило 6 с, для лазерного гравёра  $CO_2$  – порядка 20 с, в то время как на фрезерном гравёре при значительном времени обработки приемлемое качество не было достигнуто. Точность нанесения информационных меток на лазерном гравёре оценивается как 0,02..0,04 мм, что на порядок меньше погрешностей, вносимых на других технологических этапах изготовления шкалы.

#### РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Для улучшения качества шкал и повышения производительности их изготовления был предложен автоматизированный способ изготовления посредством программно-аппаратного комплекса, структурная схема которого показана на рисунке 2.

К персональному компьютеру посредством интерфейсов USB подключены: оптическое измерительное устройство, калибратор универсальный Н4-101 и лазерный гравёр Speedy-100R. Оптическое измерительное устройство служит для видеосъёмки шкалы прибора со стрелкой и передачи цифрового видео в режиме реального времени в программу управления комплексом. Калибратор универсальный пред-



назначен для преобразования численного значения воспроизводимого сигнала, задаваемого автоматически программой, в аналоговый сигнал с помощью цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) и формирования из этого сигнала выходного тока или напряжения в зависимости от типа прибора. Лазерный гравер служит для нанесения на заготовку шкалы меток и информационных знаков, после чего шкала готова к использованию в приборе.

Схема оптического измерительного устройства показана на рисунке 3.

Электроизмерительный прибор 6 устанавливается в держатель 3, закрепленный в корпусе 12 устройства, и фиксируется поворотными механическими зажимами 1. К корпусу прикреплен также кронштейн 11 с камерой 10, положение которой регулируется по трем координатным осям. Во избежание воздействия внешних источников света на съемку камерой корпус выполнен светонепроницаемым. Искусственное освещение создается светодиодами 9, закрепленными на вертикальном экране 4, который имеет в средней части окно для камеры. Таким образом, исключается прямое попадание света от светодиодов на камеру, и последняя фиксирует только

отраженный от технологической шкалы 7 свет. Шкала крепится к прибору 6 вручную двумя нажимными винтами 2 с накатанной головкой. Камера 10 выполняет видеосъемку шкалы. Перед шкалой 7 находится стрелка 8, положение которой изменяется при подаче аналогового электрического сигнала на клеммы 5 прибора.

Пример снимка, полученного с помощью оптического измерительного устройства, показан на рисунке 4.

Для каждого снимка определяется угол наклона стрелки. Зная углы наклона стрелки для всех уровней сигнала, возможно сформировать рисунок шкалы. Необходимость использования технологической шкалы вызвана тем, что она является необходимым элементом воздушного успокоителя стрелки. Последний представляет собой флажок, который крепится на оси стрелки и перемещается в замкнутой полости, образованной дугообразным пазом на корпусе прибора и шкалой. Выпускаются два типа приборов – с воздушным и более эффективным жидкостным успокоителем.

При изменении уровня сигнала стрелка совершает затухающие колебания, описываемые уравнением

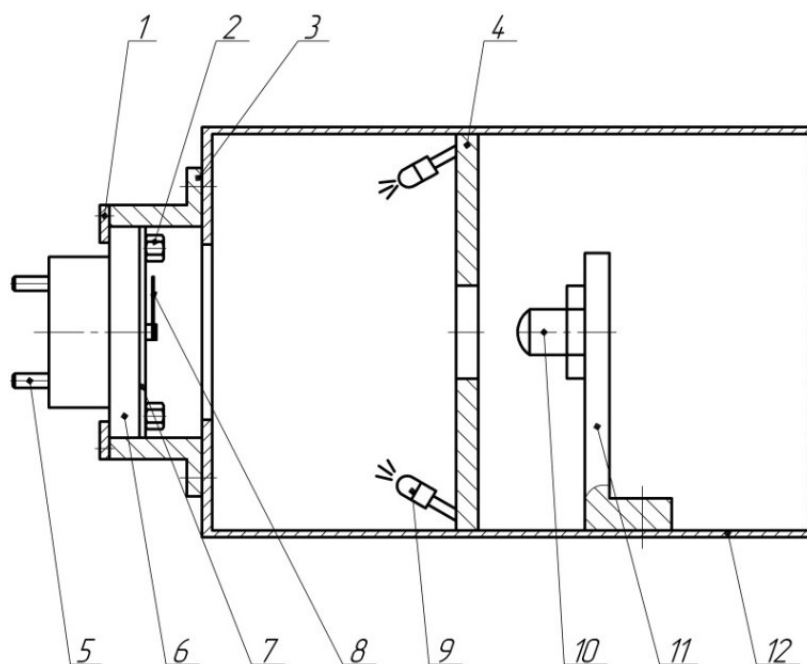


Рисунок 3 – Схема оптического измерительного устройства

$$I_0 \cdot \Delta \ddot{\alpha} + k \cdot \Delta \dot{\alpha} + c \cdot \Delta \alpha = 0, \quad (3)$$

где  $I_0$  – приведенный к оси стрелки момент инерции масс подвижных частей измерительного механизма;  $k$  – коэффициент сопротивле-

ния, зависящий от конструкции успокоителя и устанавливающий соотношение между угловой скоростью стрелки и возникающим при этом моментом сил сопротивления; см. также пояснения к формуле (1). График зависимости (3) изображен на рисунке 5.

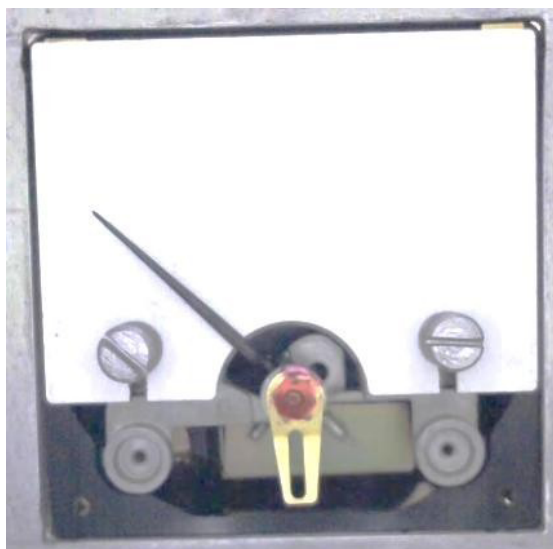


Рисунок 4 – Снимок, полученный с помощью измерительного устройства

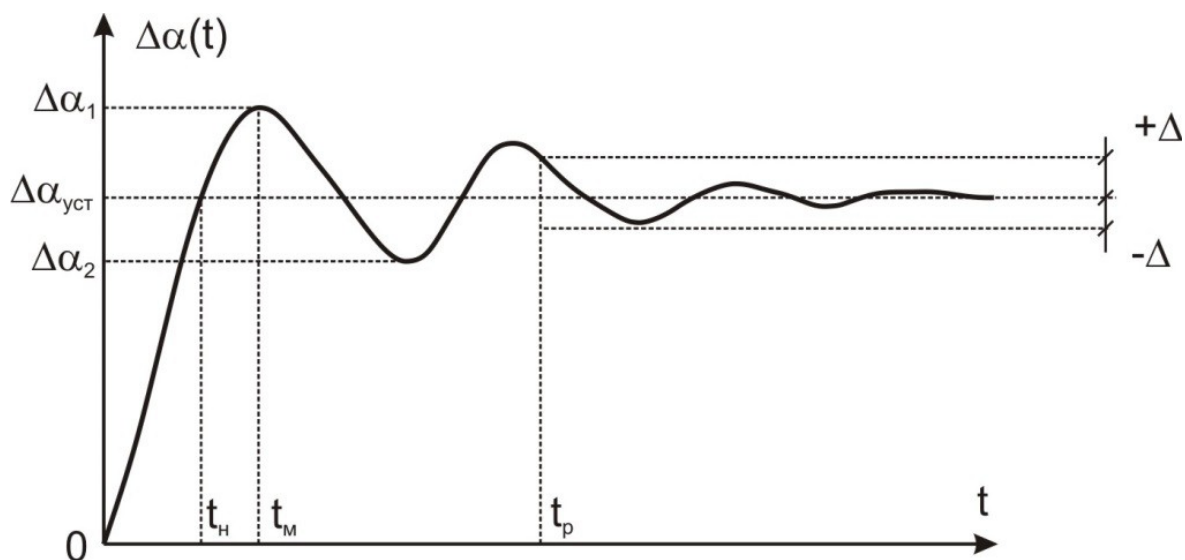


Рисунок 5 – График движения стрелки

Как видно по графику, минимально допустимое время измерения  $t_p$  – это время, по истечении которого угол наклона стрелки будет оставаться близким к установившемуся значению с допустимой точностью. Момент времени, при котором угол наклона стрелки достигнет первого максимума, обозначен как  $t_m$ . Время нарастания переходного процесса  $t_n$  – это время от начала переходного процесса до момента первого пересечения графиком линии установившегося значения.

Возникает задача определения абсолютного угла поворота стрелки  $\alpha$  с максимальной точностью за минимально возможное время. Решение задачи осложняется следующими факторами: неизвестно начало движения стрелки, что связано с особенностью работы калибратора; постоянные в уравнении (3) для различных приборов существенно различаются; видеокамера при съемке обладает невысоким быстродействием, что может привести к появлению стробоскопического эффекта (кажущейся неподвижности стрелки), а также размытому изображению стрелки. Самое простое решение – установить фиксированную задержку между подачей сигнала на калибратор и моментом обработки кадра – оказалось ненадежным и непроизводительным. Так, калибратор может подавать первые сигналы на прибор с достаточно длительной задержкой, а последующие – с меньшей; успокоение стрелки происходит быстрее в начале шкалы и медленнее – в конце и так далее. Таким образом, требуется гарантированная фиксация следующих событий: стрелка начала движения, то есть угол ее наклона изменился по сравнению с первоначальным; стрелка остановилась, то есть угол ее наклона практически не изменялся на протяжении нескольких последних кадров. Также для повышения точности определения угла наклона стрелки нужно учитывать углы ее наклона на предыдущих кадрах. Учитывая эти соображения, для определения угла наклона стрелки была использована формула экспоненциального скользящего среднего (ЕМА):

$$\Delta\alpha_t = \beta \cdot p_t + (1 - \beta) \cdot \Delta\alpha_{t-1}, \quad (4)$$

где  $\Delta\alpha_t$ ,  $\Delta\alpha_{t-1}$  – значения экспоненциального скользящего среднего в точке  $t$  и  $t-1$  (последнее и предыдущее измеренное значение угла наклона стрелки соответственно);  $p_t$  – значение исходной функции в момент времени  $t$ ;  $\beta$  – сглаживающая константа или, другими словами, коэффициент, характеризующий скорость уменьшения весов исходной функции, принимающий значение в интервале (0; 1) и подбираемый экспериментально. Использование зависимости (3) в алгоритме обработки видеокадров шкалы позволило в первую очередь отсеивать некоторое количество бракованных приборов на стадии калибровки, например, имеющих дефекты устройства успокоителя.

Проведенные на приборах экспериментальные исследования показали, что погрешность программного определения угла стрелки составляет 0,12° (в линейном измерении 0,08 мм для конца стрелки), в то время как для изготавливаемых приборов класса точности 2,5 допустимая погрешность положения стрелки равна 2,2°. Что касается точности изготовления шкалы, то на нее влияют в первую очередь такие факторы, как погрешность изготовления отверстий для крепления шкалы, погрешность установки прибора в измерительном устройстве, погрешность установки шкалы на плиту лазерного гравера, погрешность изготовления плиты и другие, то есть факторы, носящие механический характер. Тем не менее внедрение комплекса позволило улучшить класс точности приборов с 2,5 до 1,5.

Ключевым в плане программного обеспечения комплекса является также алгоритм определения положения стрелки, описанный ниже и реализованный в пакете прикладных программ Matlab фирмы MathWorks. Данный программный продукт содержит пакет Image Processing Toolbox, который предоставляет широкий спектр средств для цифровой обработки и анализа изображений. Функции этого пакета были использованы для обработки изображений шкал.

Из потокового видео выделяется одиночный снимок (рисунок 6), который имеет формат аддитивной световой модели RGB. Выполняется преобразование снимка в формат шкалы серого цвета Grayscale, так как цветовая обработка не требуется. Далее производится обрезка изображения таким образом, чтобы на нем оста-



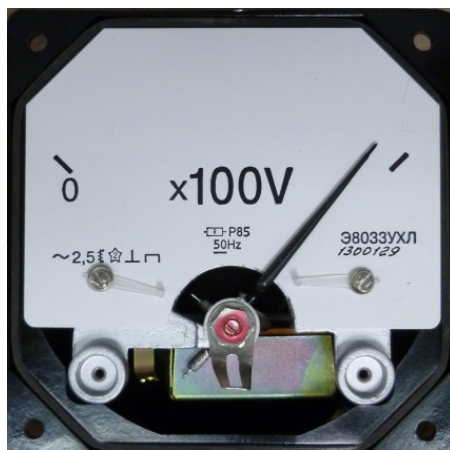
лась только стрелка на белом фоне. Выполняется преобразование изображения в бинарное таким образом, чтобы добиться наибольшей контрастности изображения стрелки на фоне шкалы.

В результате изображение принимает вид, показанный на рисунке 6.

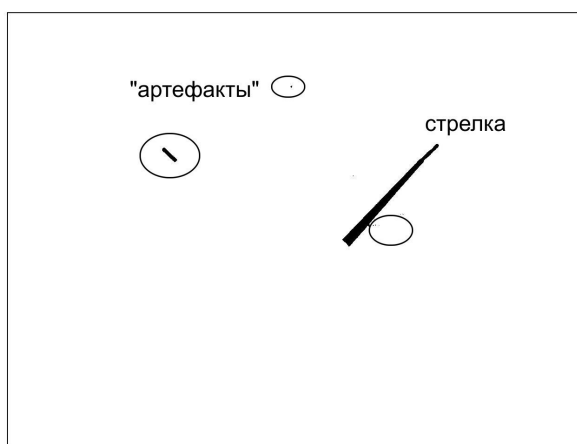
Как видно на рисунке 6, после выполненных этапов обработки изображения имеются так называемые «артефакты», в частности техноло-

гические метки, которые необходимо удалить. Вначале вызывается функция, определяющая площадь каждой области изображения, а затем все области, кроме имеющей максимальную площадь, удаляются. После того как на изображении остается только стрелка, определяется угол ее наклона.

На рисунке 7 показаны: вид главного окна и окна выбора шкалы программы управления программно-аппаратным комплексом.



а



б

Рисунок 6 – Обработка изображения шкалы прибора со стрелкой: а – исходное изображение, б – полученное изображение стрелки и «артефактов», которые обведены кругами

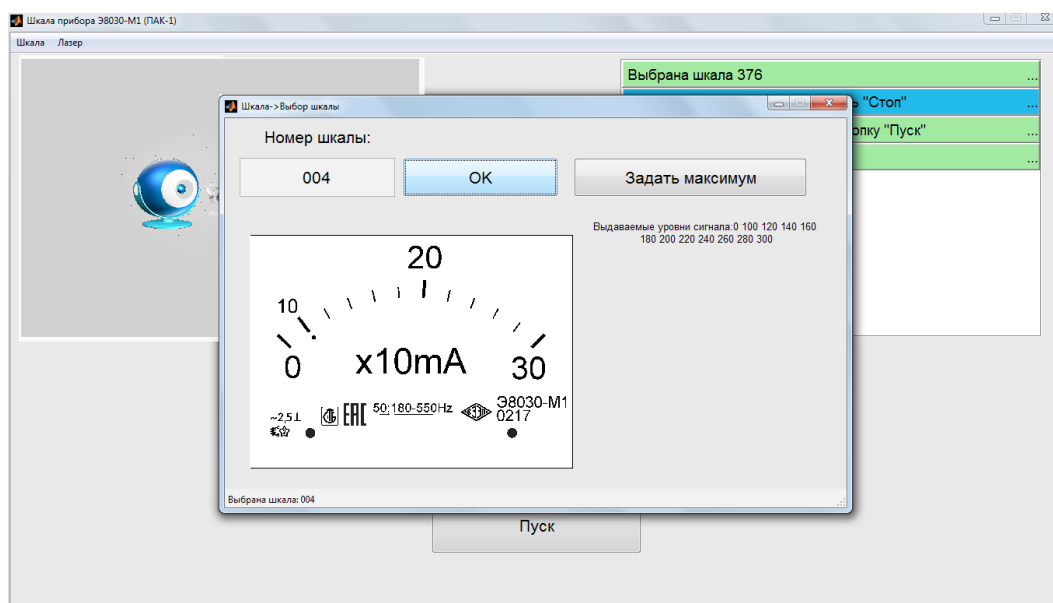


Рисунок 7 – Вид главного окна и окна выбора шкалы

Информация о графических элементах всех изготавливаемых шкал хранится в базе данных. С помощью окна выбора шкалы (рисунок 6) осуществляется выбор шкалы из базы и ее предварительный просмотр. После этого осуществляется подача сигналов на прибор с помощью калибратора в автоматическом режиме. Определяются углы наклона стрелок для каждого сигнала. После этого формируется индивидуальный рисунок шкалы, который ставится в очередь для печати на лазерном гравере.

В настоящее время ручное изготовление индивидуальной шкалы для стрелочного прибора серии Э занимает в среднем 11 мин/шт., а на других сериях ещё больше. После внедрения программно-аппаратного комплекса для автоматизированного изготовления циферблата, настройки и поверки стрелочных указателей время изготовления одной шкалы заняло порядка 50 с, то есть сократилось в 13,2 раза. Анализ источников информации показал, что аналоги готовых автоматизированных систем изготовления циферблата, настройки и поверки стрелочных указателей с индивидуальной шкалой в РФ и за рубежом отсутствуют. Идеи, положенные в созданную инновацию, защищены патентом РФ

№ 13628 от 2008.04.23 «Способ автоматической поверки стрелочного измерительного прибора с матричной системой отображения информации и устройство для его осуществления».

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнен сравнительный анализ способов и технологий изготовления шкал электроизмерительных приборов. Выяснено, что наиболее производительным при единичном производстве является способ лазерной гравировки. Разработан и изготовлен программно-аппаратный комплекс для лазерной гравировки шкал приборов с электромагнитным нелинейным измерительным механизмом. Производительность изготовления шкалы по сравнению с используемым способом повысилась в 13,2 раза. Класс точности приборов благодаря используемому алгоритму определения угла поворота стрелки, а также применению способа лазерной гравировки улучшен с 2,5 до 1,5. Значительно улучшилось визуальное качество печати шкал. Программно-аппаратный комплекс расположен на одном рабочем месте и в настоящее время применяется на ОАО «ВЗЭП» при изготовлении шкал амперметров и вольтметров переменного тока типов Э8030 и Э8032.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гонсалес, Р., Вудс, Р., Эддинс, С. (2006), *Цифровая обработка изображений в среде MATLAB*, Москва, Техносфера, 616 с.
2. Лайонз, Р. (2006), *Цифровая обработка сигналов*, Москва, ООО «Бином пресс», 656 с.
3. Демидова-Панферова, Р. М., Малиновский, В. Н., Попов, В. С. и др. (1982), *Электрические измерения*, Москва, Энергоиздат, 392 с.

#### REFERENCES

1. Gonsales, R., Vuds, R., EHddins, S. (2006), *Cifrovaya obrabotka izobrazhenij v srede MATLAB* [Digital Image Processing using MATLAB], Moscow, Tekhnosfera, 616 p.
2. Lajonz, R. (2006), *Cifrovaya obrabotka signalov* [Digital Signal Processing], Moscow, ООО «Binom press», 656 p.
3. Demidova-Panferova, R. M., Malinovskij, V. N., Popov, V. S. (1982), *EHlektricheskie izmereniya* [Electrical measurements], Moscow, EHnergoizdat, 392 p.

Статья поступила в редакцию 23. 02. 2017 г.