

Метод генерации управляющих программ для швейных полуавтоматов с микропроцессорным управлением на основе принципа референциальной независимости

А. Э. Буевич,
Т. В. Буевич

Учреждение образования «Витебский государственный университет имени П.М. Машерова», г. Витебск, Республика Беларусь

Аннотация. Современные требования к качеству и себестоимости обуви обусловливают переход на швейные полуавтоматы с микропроцессорным управлением (МПУ), однако их внедрение ограничено низкой точностью соединительных строчек. Проблема заключается в кумулятивных погрешностях традиционной технологии, где контуры строчек, оснастка и управляющие программы проектируются по разным чертежам без учета реальных контуров вырубленных деталей. Целью исследования является разработка принципиально нового технологического подхода, обеспечивающего высокую воспроизводимость строчек. В работе применены методы математического моделирования, оптического сканирования с коррекцией теневых искажений и анализа статистических распределений погрешностей. Предложен принцип референциальной независимости, согласно которому векторный контур эталона (картонного шаблона, вырубленного тем же резаком, что и детали) становится единственным источником данных для проектирования оснастки и генерации управляющих программ [1]. Разработана математическая модель суммарной погрешности прокладывания соединительных строчек, основанная на методе Монте-Карло, и экспериментально подтверждена эффективность предложенного подхода [1, 2]. Достигнуто снижение поля рассеивания погрешности прокладывания строчки с $\pm 1,68$ мм до $\pm 0,17$ мм. Результаты применимы в обувной промышленности, а также в других отраслях, требующих точной сборки деталей по сложным контурам. Предложенный подход формирует новую парадигму автоматизированного производства, исключающую накопление погрешностей и обеспечивающую соответствие технологическим требованиям.

Ключевые слова: автоматизированная технология, швейный полуавтомат с МПУ, оснастка, референциальная независимость, метод Монте-Карло, оптическое сканирование, абсолютная система координат, погрешность прокладывания строчки.

Method for Generating Control Programs for Microprocessor-Controlled Sewing Semiautomatic Machines Based on the Principle of Referential Independence

Artur E. Buyevich,
Tatsiana V. Buyevich

Educational institution "Vitebsk State University
named after P.M. Masherov", Vitebsk, Republic of Belarus

Abstract. Modern requirements for footwear quality and cost-effectiveness necessitate the adoption of microprocessor-controlled semi-automatic sewing machines. However, their implementation is limited by low precision in stitching lines. The problem lies in cumulative errors of traditional technology, where stitching contours, fixtures, and control programs are designed from separate drawings without accounting for actual contours of cut parts. The objective of this study is to develop a fundamentally new technological approach ensuring high reproducibility of stitching lines. Mathematical modelling, optical scanning with shadow distortion correction, and statistical error distribution analysis were employed. The principle of reference independence was proposed, whereby the vector contour of a reference (cardboard template cut by the same cutter as the parts) becomes the sole

data source for fixture design and control program generation. A mathematical model of total stitching error was developed using the Monte Carlo method, and the effectiveness of the proposed approach was experimentally confirmed. The dispersion range of stitching positioning error was reduced from ± 1.68 mm to ± 0.17 mm. Results are applicable in the footwear industry and other sectors requiring precise assembly of complex contour parts. The proposed approach establishes a new paradigm of automated manufacturing that eliminates error accumulation and ensures compliance with technological requirements.

Keywords: automated technology, microprocessor-controlled sewing machine, fixture, reference independence, Monte Carlo method, optical scanning, absolute coordinate system, stitching positioning error.

ВВЕДЕНИЕ

Современные требования к качеству и себестоимости обуви обуславливают необходимость перехода от ручных и полуавтоматических методов сборки к полностью автоматизированным технологиям. Швейные полуавтоматы с микропроцессорным управлением представляют собой перспективное решение для автоматизации операции стачивания заготовок верха обуви, позволяя выполнять сложные краевые строчки за одну установку и повышая производительность труда. Однако широкое внедрение зарубежных систем (USM, «Дюрокопп и Адлер», «Джуки») ограничено не только высокой стоимостью оборудования (50–75 тыс. USD), но и сложностью этапа подготовки производства, который включает проектирование и изготовление технологической оснастки, разработку управляющих программ для швейного полуавтомата [3, 4].

Традиционные подходы, основанные на последовательном проектировании: конструкторский чертеж \rightarrow шаблон \rightarrow резак \rightarrow деталь \rightarrow кассета \rightarrow программа, неизбежно порождают кумулятивную цепочку погрешностей. Каждый этап – от неточности резака до округления относительных координат – накапливает ошибку, требуя дорогостоящей корректировки и слесарной доводки. Эта проблема не решается улучшением отдельных компонентов; она требует реинжиниринга самой методологии проектирования [5, 6]. Таким образом, смена методологии проектирования технологического процесса сборки заготовок верха обуви на швейных полуавтоматах с МПУ становится стратегическим направлением для повышения эффективности автоматизированной технологии и конкурентоспособности отрасли.

В данной работе представлены теоретические основы автоматизированных технологий, основанных на принципе референциальной независимости. Эти подходы позволяют преодолеть фундаментальные ограничения традиционных методов, обеспечивая достижение высокой точности и воспроизводимости без увеличения затрат на оборудование.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Теоретической основой предложенного подхода является принцип референциальной независимости,

сущность которого заключается в формировании единого, непрерывного и замкнутого технологического цикла, где исходный контур является единственной, неизменной и референциальной точкой отсчета для всех последующих операций. Этот контур – не конструкторский чертеж, не CAD-модель, а векторное изображение эталона, полученного оптическим сканированием картонного шаблона, вырубленного тем же резаком, что и детали верха обуви.

Для математической формулировки этого принципа введем следующие обозначения.

C_{etalon} – векторный контур эталона:

$$C_{etalon} = \{p_i^{etalon} = (x_i^{etalon}, y_i^{etalon})\}_{i=1}^N,$$

где p_i^{etalon} – i -я точка контура в системе координат $X_{etalon} O_{etalon} Y_{etalon}$, жестко связанной с эталоном.

C_{cutout} – контур выреза в промежуточной пластине кассеты:

$$C_{cutout} = \{p_i^{cutout} = (x_i^{cutout}, y_i^{cutout})\}_{i=1}^N.$$

C_{seam} – контур соединительной строчки, эквидистантный к контуру детали на расстоянии a :

$$C_{seam} = \{p_i^{seam} = (x_i^{seam}, y_i^{seam})\}_{i=1}^M.$$

Принцип референциальной независимости требует, чтобы:

$$C_{cutout} = C_{etalon} \quad \text{и} \quad C_{seam} = \text{Equidistant}(C_{etalon}, a),$$

где оператор $\text{Equidistant}(C, a)$ генерирует множество точек, каждая из которых находится на расстоянии от соответствующей точки контура C вдоль нормали к нему.

Этот принцип означает, что все три ключевых компонента технологического процесса – оснастка, управляющая программа шитья и управляющая программа фрезерования – формируются одновременно и параллельно из одного и того же источника информации. Это исключает:

- погрешности, возникающие при изготовлении резаков по приближенному контуру;
- ошибки, связанные с интерполяцией и ап-

проксимацией контуров в CAD-системах;

- неизбежные расхождения между чертежом и реальным изделием;
- накопление погрешностей при переходе от относительных координат к абсолютным.

Математическое определение эквидистантной кривой для кусочно-гладкого контура C_{etalon} , состоящего из отрезков прямых и дуг окружностей, может быть выражено как:

$$p_i^{\text{seam}} = p_i^{\text{etalon}} + a \cdot n_i,$$

где n_i – единичный вектор нормали к контуру C_{etalon} в точке p_i^{etalon} , направленный в сторону, где должна быть проложена строчка. Его длина должна быть равна единице, чтобы при умножении на скаляр a получалось именно смещение на расстояние a .

Для прямолинейного участка контура, заданного двумя последовательными точками $p_{i-1}^{\text{etalon}} = (x_{i-1}^{\text{etalon}}, y_{i-1}^{\text{etalon}})$ и $p_i^{\text{etalon}} = (x_i^{\text{etalon}}, y_i^{\text{etalon}})$, вектор, направленный вдоль отрезка, вычисляется:

$$d_i = p_i^{\text{etalon}} - p_{i-1}^{\text{etalon}} = \begin{pmatrix} x_i^{\text{etalon}} - x_{i-1}^{\text{etalon}} \\ y_i^{\text{etalon}} - y_{i-1}^{\text{etalon}} \end{pmatrix}.$$

Этот вектор d_i называется вектором направления. Чтобы получить вектор, перпендикулярный ему (нормаль), мы меняем местами координаты и меняем знак одной из них. Для вектора $d_i = (dx, dy)$, перпендикулярный вектор может быть $(-dy, dx)$ или $(dy, -dx)$. Выбор зависит от того, в какую сторону от контура нужно отложить строчку. Для строчки, прокладываемой внутри контура детали, выбираем:

$$n_i^{\text{raw}} = \begin{pmatrix} -(y_i^{\text{etalon}} - y_{i-1}^{\text{etalon}}) \\ x_i^{\text{etalon}} - x_{i-1}^{\text{etalon}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_{i-1}^{\text{etalon}} - y_i^{\text{etalon}} \\ x_i^{\text{etalon}} - x_{i-1}^{\text{etalon}} \end{pmatrix}.$$

Этот вектор n_i^{raw} имеет длину, отличную от единицы. Чтобы получить единичный вектор, мы делим его на его собственную длину (модуль). Длина вектора вычисляется по теореме Пифагора:

$$|n_i^{\text{raw}}| = \sqrt{(y_{i-1}^{\text{etalon}} - y_i^{\text{etalon}})^2 + (x_i^{\text{etalon}} - x_{i-1}^{\text{etalon}})^2}.$$

Таким образом, единичный вектор нормали вычисляется как:

$$n_i = \frac{n_i^{\text{raw}}}{|n_i^{\text{raw}}|} = \frac{1}{\sqrt{(y_{i-1}^{\text{etalon}} - y_i^{\text{etalon}})^2 + (x_i^{\text{etalon}} - x_{i-1}^{\text{etalon}})^2}} \begin{pmatrix} y_{i-1}^{\text{etalon}} - y_i^{\text{etalon}} \\ x_i^{\text{etalon}} - x_{i-1}^{\text{etalon}} \end{pmatrix}.$$

Для дуги окружности с центром $c = (x_c, y_c)$ и радиусом R , нормаль в точке p_i^{etalon} является радиус-

вектором, направленным от центра к точке на окружности, и нормированным:

$$n_i = \frac{p_i^{\text{etalon}} - c}{\|p_i^{\text{etalon}} - c\|}.$$

Здесь $\|p_i^{\text{etalon}} - c\|$ – это евклидова норма (расстояние) между точкой p_i^{etalon} и центром c . Поскольку p_i^{etalon} лежит на окружности радиуса R , то $\|p_i^{\text{etalon}} - c\| = R$. Следовательно, формула упрощается до:

$$n_i = \frac{p_i^{\text{etalon}} - c}{R}.$$

Это означает, что вектор нормали для дуги просто равен вектору от центра окружности к точке на контуре, деленному на радиус. Это и есть единичный вектор.

Таким образом, математическая модель процесса становится детерминированной и обратимой: исходный контур C_{etalon} однозначно определяет все геометрические параметры оснастки и программы. Это фундаментальный сдвиг от эмпирического подхода к инженерной точности.

Для обоснования эффективности предложенного подхода была разработана и экспериментально верифицирована математическая модель расчета суммарной погрешности прокладывания соединительных строчек. Применен вероятностный метод, основанный на методе Монте-Карло, что позволяет учесть статистическую природу всех факторов, влияющих на точность.

Суммарная погрешность Δa_{Σ} прокладывания строчки, определяемая как отклонение фактического положения строчки от заданного расстояния a от края детали, является функцией четырех независимых составляющих:

$$\Delta a_{\Sigma} = f(\Delta a_b, \Delta a_u, \Delta a_i, \Delta a_k),$$

где Δa_b – погрешность базирования каретки координатного устройства; Δa_u – погрешность установки кассеты на каретке координатного устройства; Δa_i – погрешность позиционирования иглы швейной головки; Δa_k – кинематические погрешности перемещения каретки координатного устройства вследствие зазоров в кинематических парах и упругости звеньев [7, 8].

Для каждой компоненты были получены статистические характеристики (среднее значение μ , стандартное отклонение σ) на основе 200 повторных измерений. Эксперименты показали, что все составляющие имеют нормальный закон распределения:

$$\Delta a_j \sim N(\mu_j, \sigma_j^2), \quad j \in \{b, u, i, k\}.$$

Поскольку сумма независимых нормально распределенных случайных величин также является нормально распределенной, суммарная погрешность:

$$\Delta a_{\Sigma} \sim N \left(\sum_j \mu_j, \sum_j \sigma_j^2 \right).$$

Метод Монте-Карло был применен для моделирования распределения Δa_{Σ} в реальных условиях.

Алгоритм расчета для одной точки контура i включает следующие шаги:

1. Генерация элементарных погрешностей:

$$\Delta x_b \sim N(0,0011, 0,0312);$$

$$\Delta y_b \sim N(0,00375, 0,0372);$$

$$\Delta y_u \sim N(0,00001, 0,000012);$$

$$\Delta y_i \sim N(0,002, 0,0052);$$

$$\Delta x_k \sim N(0,0047, 0,00122);$$

$$\Delta y_k \sim N(0,0035, 0,00112).$$

Здесь $N(\mu, \sigma^2)$ означает, что случайная величина взята из нормального распределения с математическим ожиданием μ и дисперсией σ^2 . Эти значения получены экспериментально измерением реальных погрешностей на оборудовании.

2. Расчет вектора отклонения точки i от ее номинального положения из-за каждой погрешности.

Векторы отклонения точки i из-за погрешностей Δa_b , Δa_u , Δa_i , Δa_k обозначим соответственно $\Delta r_{b,i}$, $\Delta r_{u,i}$, $\Delta r_{i,i}$, $\Delta r_{k,i}$:

$$\Delta r_{b,i} = (\Delta x_b; \Delta y_b);$$

$$\Delta r_{u,i} = (\Delta x_u; \Delta y_u) = (R_i \sin(\Delta \gamma_u); (R_i \cos(\Delta \gamma_u) - 1));$$

$$\Delta r_{i,i} = (0; \Delta y_i);$$

$$\Delta r_{k,i} = (\Delta x_k; \Delta y_k).$$

Здесь $\Delta r_{b,i}$ – это вектор, на который смещается точка i на платформе из-за того, что вся каретка с кассетой сдвинулась в системе координат полуавтомата на Δx_b , Δy_b .

$\Delta r_{u,i}$ – это смещение точки i из-за поворота всей кассеты на угол $\Delta \gamma_u$ вокруг штифта (центра поворота). Для этого используется геометрия вращения. Если точка i находится на расстоянии R_i от центра поворота, то при повороте на малый угол $\Delta \gamma_u$ (в радианах) ее координаты изменяются.

Для малых углов $\sin(\Delta \gamma_u) \approx \Delta \gamma_u$ и $\cos(\Delta \gamma_u) \approx$

$$\approx 1 - \frac{(\Delta \gamma_u)^2}{2} \approx 1.$$

Поэтому смещение по оси x пропорционально $R_i \cdot \Delta \gamma_u$, а по оси y – почти нулевое. Для точности берется выражение $R_i (\cos(\Delta \gamma_u) - 1)$. R_i – расстояние от точки i до центра поворота вычисляется по формуле:

$$R_i = \sqrt{(x_i + x_a)^2 + (y_i + y_a)^2},$$

где (x_a, y_a) – координаты центра поворота (шифта) в системе координат кассеты.

$\Delta r_{i,i}$ – это смещение точки i из-за того, что координатное устройство сдвинуло кассету на Δx_k , Δy_k во время движения. Это смещение добавляется к позиции, которая уже была задана программой.

3. Проекция вектора суммарного смещения на нормаль к контуру строчки:

$$\Delta a_{j,i} = \Delta r_{j,i} \cdot n_i = \Delta x_{j,i} \cdot n_x + \Delta y_{j,i} \cdot n_y.$$

Здесь $\Delta a_{j,i}$ – это проекция вектора смещения $\Delta r_{j,i}$ на направление нормали n_i . Это критически важный шаг. Нас интересует не общее смещение точки в пространстве, а именно отклонение от номинального контура строчки. Это отклонение измеряется вдоль линии, перпендикулярной контуру, то есть вдоль нормали n_i . Скалярное произведение $\Delta r_{j,i} \cdot n_i$ как раз и дает нам эту проекцию. Например, если точка сдвинулась строго вдоль нормали, то $\Delta a_{j,i}$ будет равно модулю $\Delta r_{j,i}$. Если смещение было перпендикулярно нормали, то $\Delta a_{j,i} = 0$, что означает, что это смещение не повлияло на расстояние до строчки. Это позволяет точно оценить влияние каждой погрешности на итоговую точность.

4. Суммирование и определение суммарной погрешности:

$$\Delta a_{\Sigma,i} = \sum_{j \in \{b,u,i,k\}} \Delta a_{j,i}.$$

Это простое алгебраическое суммирование проекций всех четырех погрешностей на нормаль. Поскольку все они влияют на одно и то же – отклонение от номинального расстояния a – их эффекты складываются. Это и есть суммарная погрешность для конкретной точки i контура.

Для контрольного контура, описанного 378 точками, было сгенерировано 200 вариантов для каждой из 4 погрешностей, что дало 75 400 реализаций. Результаты моделирования показали, что Δa_{Σ} имеет нормальное распределение с параметрами:

$$\Delta a_{\Sigma} \sim N(0,002, 0,058^2).$$

Таким образом, 95 % всех реализаций (согласно правилу 2σ) попадают в интервал $[-0,114, 0,118]$ мм. Экспериментальная проверка на деталях верха обуви подтвердила, что поле рассеивания отклонения a сократилось с $\pm 1,68$ мм (традиционный метод) до $\pm 0,17$ мм, что согласуется с теоретической моделью [9].

Одним из ключевых элементов, обеспечивающих реализацию принципа референциальной независимости, является метод получения векторного изображения эталона. Традиционные методы, такие как дигитайзирование, имеют погрешность порядка $\pm 0,25$ мм. Предложен метод оптического сканирования с последующим преобразованием растрового изображения в векторное (метод контурной линии), который обеспечивает точность до $\pm 0,05$ мм.

Для устранения теневых артефактов, возникающих при сканировании толстых материалов, предложена модификация конструкции прижимной крышки сканера. Вместо подвижного источника света, в крышку интегрирован стационарный источник, обеспечивающий равномерное боковое освещение всей поверхности эталона. Это исключает зависимость результата от угла падения света [9, 10].

После сканирования растровое изображение преобразуется в векторную форму методом контурной линии. Математически это можно описать как:

$$C_{\text{etalon}} = \text{ContourExtract}(I_{\text{raster}}) = \{p_i\},$$

где I_{raster} – матрица пикселей растрового изображения, а оператор *ContourExtract* находит контур, представляющий границу между черным (деталь) и белым (фон) пикселями, и аппроксимирует его линейными и криволинейными сегментами.

$$I_{\text{raster}} \in R^{W \times H}.$$

Погрешность дискретизации при сканировании с плотностью n DPI определяется размером пикселя:

$$h = \frac{25,4}{n} \text{ мм.}$$

Погрешность измерения линейного размера составляет:

$$S = \pm \frac{h}{2} = \pm \frac{25,4}{2n} \text{ мм.}$$

Для $n = 300$ DPI: $S = \pm 0,042$ мм, что удовлетворяет требованиям точности. Погрешность $\pm h/2$ возникает потому, что контур может проходить где угодно внутри пикселя. Если пиксель имеет размер h , то максимальное отклонение центра контура от его истинного положения – это половина размера пикселя, то есть $h/2$.

Вторым критическим элементом, обеспечивающим точность, является переход от относительной системы координат к абсолютной системе координат в управляющей программе. В традиционных подходах, где программа генерируется на основе аппроксимированных контуров и координаты передаются в виде приращений ($\Delta X, \Delta Y$), каждое округление до целого импульса ($\pm 0,0125$ мм) накапливается. После N стежков ошибка может достигать $N \cdot \pm 0,0125$ мм.

В предложенной технологии, поскольку управляющая программа формируется напрямую из векторного изображения эталона, координаты каждого прокола иглы рассчитываются в абсолютной системе координат, жестко привязанной к платформе швейного полуавтомата. Пусть $p_i^{\text{seam}} = (x_i, y_i)$ – координаты i -го прокола в системе координат, привязанной к кассете. Тогда координаты в системе координат полуавтомата $p_i^{\text{sh}} = (x_i^{\text{sh}}, y_i^{\text{sh}})$ определяются как:

$$p_i^{\text{sh}} = R \cdot p_i^{\text{seam}} + T,$$

где R – матрица поворота (если есть угол поворота кассеты), а $T = (T_x, T_y)$ – вектор смещения центра кассеты. Матрица поворота для угла θ имеет вид:

$$R = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{pmatrix}.$$

Эта матрица преобразует координаты точки, заданные в системе кассеты, в координаты в системе полуавтомата, учитывая возможный поворот кассеты. Вектор T добавляет смещение центра кассеты относительно начала координат полуавтомата [11, 12].

Управляющая программа для швейного полуавтомата записывается в формате HP-GL, где каждая команда PD(PenDown), соответствующая точке прокола иглой, содержит абсолютные координаты в импульсах:

$$\text{PD}(x_i^{\text{sh}} \cdot \text{imp/mm}, y_i^{\text{sh}} \cdot \text{imp/mm}),$$

где imp/mm – количество импульсов на миллиметр, определяемое характеристиками шагового двигателя и редуктора.

Таким образом, каждый стежок независим и привязан к исходному эталону, а не к предыдущему проколу. Это полностью исключает кумулятивную ошибку округления.

Транслятор (hp_progr.exe) выполняет следующие преобразования:

Input: $C_{\text{etalon}} \in DXF$,

Intermediate: $C_{\text{seam}} = \text{Equidistant}(C_{\text{etalon}}, a)$,

Output: $P_{\text{sh}} = \{\text{PD}(x_i^{\text{sh}}, y_i^{\text{sh}})\}_{i=1}^M \in \text{HP-GL}$,

где M – количество точек на контуре строчки.

Важно, что в этом процессе нет промежуточного округления. Координаты x_i^{sh} , y_i^{sh} вычисляются с высокой точностью (например, 6–8 знаков после запятой), а только потом, при генерации команды PD, они умножаются на imp/mm и округляются до целого числа. Это происходит один раз для каждой точки, а не последовательно для каждого стежка.

Приведем последовательность преобразований в трансляторе управляющей программы для швейного полуавтомата:

– Input (Вход). Исходными данными является векторный контур эталона, представленный в формате DXF (Drawing Exchange Format), который содержит точные координаты всех опорных точек контура;

– Intermediate (Промежуточный). На этом этапе вычисляется эквидистантная кривая (то есть кривая, параллельная исходному контуру на заданном расстоянии a), которая определяет траекторию, по которой должна прокладываться соединительная строчка. Функция «Equidistant» геометрически строит эту кривую, используя исходный контур «C_{etalon}» и заданное расстояние $a_{za0} = 1,5$.

– Output (Выход). Результатом является управляющая программа в формате HP-GL (Hewlett-Packard Graphics Language), состоящая из серии команд PD, каждая из которых задает абсолютные координаты (x_i^{sh}, y_i^{sh}) точки прокола иглы в системе координат полуавтомата. Индекс i изменяется от 1 до M , где M – общее количество точек (проколов) на контуре строчки. Этот формат напрямую понимается микропроцессором швейного полуавтомата.

Для верификации предложенного подхода были проведены сравнительные эксперименты на заготовках верха обуви. Были сшиты партии заготовок верха обуви двумя способами: по традиционной технологии и по предложенной.

Измерения расстояния a от края детали до строчки проводились микроскопом МПБ-2 (погрешность $\pm 0,05$ мм) на 150-и точках для пяти заготовок каждого типа. Результаты статистической обработки эксперимента при заданном расстоянии строчки от края детали $a_{za0} = 1,5$ мм представлены в таблице 1.

Статистическая проверка гипотезы о равенстве средних с использованием t -критерия Стьюдента для независимых выборок показала, что различие статистически значимо ($p < 0,001$).

Таблица 1 – Результаты эксперимента

Table 1 – Experimental results

Показатель	Традиционная технология	Предложенная технология
Среднее отклонение Δa_{cp}	0,32 мм	0,08 мм
Стандартное отклонение $\sigma_{\Delta a}$	0,41 мм	0,05 мм
Максимальное отклонение $ \Delta a_{max} $	1,68 мм	0,17 мм
Поле рассеивания (max–min)	1,96 мм	0,32 мм
Процент отклонений $> \pm 0,25$ мм	42 %	0 %

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные теоретические подходы представляют собой системный сдвиг в методологии автоматизации сборки обуви. Вместо улучшения отдельных элементов (более точные станки, лучшие датчики), предложенная методология переопределяет саму суть технологического процесса. Принцип референциальной независимости, реализованный через оптическое сканирование эталона, абсолютную систему координат и цифровую трансляцию, позволяет:

– исключить кумулятивные погрешности, присущие цепочкам «чертеж → резак → деталь → кассета → программа»;

– обеспечить стабильную точность проклады-

вания строчек в пределах $\pm 0,17$ мм, что превышает требования ГОСТ;

– создать интеллектуально-технологическую основу для гибкого автоматизированного производства, способного быстро переключаться на новые модели без значительных затрат на перенастойку [9].

Предложенный подход не является просто набором новых инструментов; это новая парадигма проектирования технологических процессов, основанная на прямом захвате реальности и ее цифровом отображении. Он демонстрирует, что достижение высокой точности в сложных технологических системах возможно не за счет увеличения сложности оборудования, а за счет устранения избыточных и

ошибкоемких этапов в цепочке преобразования информации.

Таким образом, разработанные теоретические подходы не только решают конкретную задачу

обувной промышленности, но и предлагают универсальную методологию для автоматизации других отраслей, где требуется высокая точность технологической обработки по сложным контурам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буевич, А. Э. Автоматизированное проектирование и изготовление оснастки и разработка управляющих программ к швейному полуавтомату с микропроцессорным управлением / А. Э. Буевич, Б. С. Сункуев // *Вестник Витебского государственного технологического университета*. – 2001. – № 3. – С. 43–47.
2. Буевич, А. Э. Компьютерное моделирования погрешностей сборки деталей верха обуви в заготовку на полуавтоматах с микропроцессорным управлением / А. Э. Буевич, Т. В. Буевич // Наука и образование в условиях социально-экономической трансформации общества: Материалы VI Международной научно-методической конференции. Часть II. Минск, 2003. – С.142–145.
3. Сункуев, Б. С. Швейный полуавтомат с МПУ для сборки заготовок верха обуви / Б. С. Сункуев, А. Э. Буевич, А. П. Давыдько, А. В. Морозов // Каталог «В мире оборудования». – №9(14). – 2001. – С. 20-21.
4. Буевич, А. Э. Автоматизированное проектирование оснастки для швейного полу-автомата с микропроцессорным управлением / А. Э. Буевич // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы науки, техники и экономики легкой промышленности», г. Москва, 19–21 апреля 2000 г. – Москва, 2000. – С. 85.
5. Краснер, С. Ю. Оценка качества процессов в механизмах вышивальных полуавтоматов : монография / С. Ю. Краснер, Ю. В. Новиков. – Витебск : УО «ВГТУ», 2019. – 190 с.
6. Новиков, Ю. В. Оценка процессов в швейных полуавтоматах под мехатронные модули : монография / Ю. В. Новиков. – Saarbrucken : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2022. – 200 с.
7. Новиков, Ю. В. Исследование погрешности перемещения координатного устройства / Ю. В. Новиков, В. Ф. Куксевич // *Материалы и технологии*. – 2023. – № 2 (12). – С. 12–16. DOI: 10.24412/2617-149X-2023-2-12-16.
8. Борисов, Е. А. Исследование механизма позиционирования каретки / Е. А. Борисов, Ю. В. Новиков // Материалы докладов 56-й Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов : в 2 т. – Витебск : УО «ВГТУ», 2023. – Т. 2. – С. 7–9.
9. Буевич, А. Э. Разработка автоматизированного комплекса для проектирования и изготовления оснастки и подготовки управляющих программ к швейному полуавтомату с микропроцессорным управлением : автореф. дисс. ... канд. техн. наук : 05.02.13 – машины, агрегаты и процессы (легкая промышленность) / А. Э. Буевич. – Витебск, 2003. – 25 с.
10. Костин, П. А. Методика повышения точности оцифровки исходных контуров деталей верха обуви при автоматизированном проектировании технологической оснастки к швейному полуавтомату с числовым программным управлением / П. А. Костин, Б. С. Сункуев, А. Э. Буевич // Инновационные технологии в текстильной и легкой промышленности : материалы Международной научно-технической конференции, Витебск, 13–14 ноября 2019 г. – Витебск: УО «ВГТУ», 2019. – С. 161–163.
11. Костин, П. А. Разработка методики сборки верха обуви с использованием САПР КОМПАС 3D / П. А. Костин, Б. С. Сункуев, Е. О. Ремша // Материалы докладов 53-й Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов : в 2 т. – Витебск : УО «ВГТУ», 2020. – Т. 1. – С. 259–261.
12. Костин, П. А. Разработка методики повышения точности сборки верха обуви при использовании САПР Компас-3D / П. А. Костин, Б. С. Сункуев, В. С. Асташенок // Материалы докладов 54-й Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов : в 2 т. – Витебск : УО «ВГТУ», 2021. – Т. 1. – С. 252–255.

REFERENCES

1. Buevich AE, Sunkuev BS. Automated design and manufacturing of fixtures and development of control programs for semi-automatic sewing machines with microprocessor control. *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta = Bulletin of Vitebsk state technological university*. 2001;3:43–47. (In Russ.)
2. Buevich AE, Buevich TV. Computer modeling

of assembly errors of upper shoe parts in blanks on semi-automatic machines with microprocessor control. In: Nauka i obrazovanie v usloviyakh sotsial'no-ekonomiceskoy transformatsii obshchestva: Materialy VI Mezhdunarodnoy nauchno-metodicheskoy konferentsii. Chast' II = Science and education in the conditions of socio-economic transformation of society: Materials of the VI International Scientific and Methodological Conference. Part II, Minsk; 2003: 142–145. (In Russ.)

3. Sunkeev BS, Buevich AE, Davydko AP, Morozov AV. Semi-automatic sewing machine with MPU for assembly of upper shoe blanks. *Katalog «V mire oborudovaniya»*. 2001;9:20–21. (In Russ.)

4. Buevich AE. Automated design of fixtures for semi-automatic sewing machines with microprocessor control. In: Tezisy dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Aktual'nye problemy nauki, tekhniki i ekonomiki legkoy promyshlennosti» = Abstracts of the International scientific and technical conference «Actual problems of science, technology and economy of light industry». 19–21 April, 2000, Moscow; 2000:85. (In Russ.)

5. Krasner SY, Novikov YV. Otsenka kachestva protsessov v mekhanizmakh vyshival'nykh poluavtomatov = Evaluation of quality processes in embroidery semi-automatic machines mechanisms. Vitebsk: Vitebskiy gosudarstvennyy tekhnologicheskiy universitet; 2019:190. (In Russ.)

6. Novikov YV. Otsenka protsessov v shveynykh poluavtomatakh pod mekhatronnye moduli = Evaluation of processes in sewing semi-automatic machines under mechatronic modules. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing; 2022:200. (In Russ.)

7. Novikov YV, Kuksevich VF. Investigation of coordinate device positioning error. *Materialy i tehnologii = Materials and Technologies*. 2023;2(12): 12–16. DOI: 10.24412/2617-149X-2023-2-12-16. (In Russ.)

8. Borisov EA, Novikov YV. Investigation of carriage positioning mechanism. In: Materialy dokladov 56-y Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii prepodavateley i studentov : v 2 t. = Materials of the 56th International scientific and technical conference of teachers and students: in 2 vols.

Vitebsk: Vitebskiy gosudarstvennyy tekhnologicheskiy universitet; 2023;2:7–9. (In Russ.)

9. Buevich AE. Razrabotka avtomatizirovannogo kompleksa dlya proektirovaniya i izgotovleniya osnastki i podgotovki upravlyayushchikh programm k shveynomu poluavtomatu s mikroprotsessornym upravleniem :avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk : 05.02.13 – mashiny, agregaty i protsessy (legkaya promyshlennost') = Development of an automated complex for the design and manufacture of fixtures and preparation of control programs for semi-automatic sewing machines with microprocessor control: author's abstract of dissertation ... cand. tech. sci.: 05.02.13 – machines, units and processes (light industry). Vitebsk; 2003:25. (In Russ.)

10. Kostin PA, Sunkeev BS, Buevich AE. Methodology for improving the accuracy of digitizing initial contours of upper shoe parts during automated design of technological fixtures for semi-automatic sewing machines with numerical control. In: Innovative technologies in textile and light industry: Materials of the International Scientific and Technical Conference, 13–14 November 2019, Vitebsk. Vitebsk: Vitebskiy gosudarstvennyy tekhnologicheskiy universitet; 2019:161–163. (In Russ.)

11. Kostin PA, Sunkeev BS, Remsha EO. Development of a method for assembling upper shoe parts using CAD COMPAS 3D. In: Materialy dokladov 53-y Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii prepodavateley i studentov : v 2 t. = Materials of the 53rd International Scientific and Technical Conference of Teachers and Students: in 2 vols. Vitebsk: Vitebskiy gosudarstvennyy tekhnologicheskiy universitet; 2020;1:259–261. (In Russ.)

12. Kostin PA, Sunkeev BS, Astashenok VS. Development of a methodology for improving the accuracy of upper shoe assembly using CAD COMPAS-3D. In: Materialy dokladov 54-y Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii prepodavateley i studentov : v 2 t. = Materials of the 54th International Scientific and Technical Conference of Teachers and Students: in 2 vols. Vitebsk: Vitebskiy gosudarstvennyy tekhnologicheskiy universitet; 2021;1:252–255. (In Russ.)

Сведения об авторах

Буевич Артур Эдуардович

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры инженерной физика учреждения образования «Витебский государственный университет имени П.М. Машерова», г. Витебск, Республика Беларусь

E-mail: arturby@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8361-3336>

Буевич Татьяна Владимировна

Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой инженерной физика учреждения образования «Витебский государственный университет имени П.М. Машерова», г. Витебск, Республика Беларусь

E-mail: buevih.tv@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6283-257X>

Information about the authors

Artur E. Buyevich

Cand. Sc. in Eng., Assoc. Prof., Department of Engineering Physics, Vitebsk State University named after P.M. Masherov, Vitebsk, Republic of Belarus

E-mail: arturby@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8361-3336>

Tatsiana V. Buyevich

Cand. Sc. in Eng., Assoc. Prof., Head of Department of Engineering Physics, Vitebsk State University named after P.M. Masherov, Vitebsk, Republic of Belarus

E-mail: buevih.tv@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6283-257X>

Статья поступила в редакцию 25.11.2025.