

УДК 681.5; 687.053.173

doi: 10.18698/0536-1044-2022-10-62-73

# Разработка мехатронного модуля обрезки ниток

Ю.В. Новиков, С.Ю. Краснер

Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет»

## Development of a Mechatronic Thread Trimmer

Yu.V. Novikov, S.Yu. Krasner

Educational institution Vitebsk State Technological University

При производстве швейных и обувных изделий широко применяют станки и полуавтоматы. Швейные предприятия и фабрики художественных изделий частично оборудованы одноигольными вышивальными полуавтоматами с микропроцессорным управлением. Основное же их оснащение — неавтоматизированные универсальные швейные машины челночного стежка, тамбурные швейные машины, машины зигзагообразного стежка, в которых вышивальщицы вручную перемещают пяльцы с заготовкой в процессе вышивки. Одним из перспективных направлений совершенствования швейных процессов и многоцветной вышивки является их автоматизация путем применения мехатронных модулей в оборудовании и вышивальных полуавтоматах. На оборудовании с мехатронными модулями основные операции выполняются в автоматическом режиме, благодаря чему сокращается их трудоемкость и улучшается внешний вид изделий вследствие более высокой точности укладки строчек. Возможность одновременного обслуживания нескольких полуавтоматов одним оператором повышает производительность труда. Предложена методика проектирования мехатронного модуля механизма обрезки ниток, которая базируется на расчетных и экспериментальных рекомендациях при проектировании новых вышивальных полуавтоматов или модернизации используемых на промышленных предприятиях.

**Ключевые слова:** методика проектирования, мехатронный модуль, подвижный нож, обрезка ниток, швейные полуавтоматы

In the production of clothing and footwear, machine tools and semi-automatic machines are widely used. Sewing enterprises and factories of art products are partially equipped with single-needle semi-automatic embroidery machines with microprocessor control modules. Their main equipment is non-automated universal lockstitch sewing machines, chain sewing machines, zigzag stitch machines, in which embroiderers manually move the hoop with the workpiece during the embroidery process. One of the promising areas for improving sewing processes and multi-color embroidery is their automation through the use of mechatronic modules in the equipment used and semi-automatic embroidery machines. On equipment with mechatronic modules, the main operations are performed automatically, which reduces their labor intensity and improves the appearance of products due to higher stitching accuracy. The possibility of simultaneous maintenance of several semi-automatic machines by one operator increases labor productivity. A method for designing a mechatronic module for a thread trimming mechanism is proposed, which is based on calculated and experimental recommendations when designing new semi-automatic embroidery machines or upgrading those used in industrial enterprises.

**Keywords:** design technique, mechatronic module, movable knife, thread trimming, semi-automatic sewing

В специальной литературе отсутствуют методики по разработке мехатронных модулей механизмов автоматической обрезки ниток (далее МО) швейных полуавтоматов. Результаты разработки и исследования некоторых видов механизмов мехатронных модулей приведены в научных трудах [1, 2]. Исследованию процессов резания швейных ниток посвящены работы [3, 4].

Цель статьи — разработка научно обоснованной методики проектирования мехатронного модуля МО, основанной на расчетных и экспериментальных рекомендациях по проектированию новых или модернизации существующих вышивальных полуавтоматов.

Методика разработана на базе механизма цикловой обрезки методом ножниц, так как она не требует дополнительного времени вне пределов цикла шитья. В производстве распространены МО с приводом от кулачковых механизмов. Согласно предварительным исследованиям, шаговые электродвигатели (ШЭД) могут оптимизировать процесс обрезки введением коротких остановок и временных пауз.

На основании материалов, приведенных в работах [3, 4], исследований структуры МО швейного оборудования, аналитического описания процесса резания швейной нитки и экспериментальных исследований процесса резания ниток сформулированы основные этапы проектирования, послужившие базой для методики проектирования мехатронного модуля МО вышивального полуавтомата.

Разработанная методика внедрена на предприятии республики Беларусь и может быть применена при проектировании мехатронных модулей.

**Основные этапы проектирования мехатронного модуля МО.** При проектировании МО к механизму предъявляются технологические, конструктивные и эксплуатационные требования.

*Технологические требования.* Длина нитки, остающейся в игле после обрезки, не должна превышать 80 мм, а остающейся на лицевой поверхности материала при выполнении первого стежка после обрезки — 50 мм. Время  $t$ , в течение которого срабатывает приспособление для обрезки ниток, должно быть минимальным.

*Конструктивные требования.* Так как модернизация осуществляется на базе существующего полуавтомата, мехатронный модуль МО

следует создавать по блочно-модульному принципу. МО должен содержать ШЭД, передаточный механизм и режущее устройство.

Систему управления ШЭД необходимо интегрировать в систему микропроцессорного управления полуавтоматом. Последний надо оснастить системой управления и автоматизированным приводом, обеспечивающим регулирование скорости и останов иглы в заданном положении.

Режущее устройство не должно препятствовать работе других механизмов полуавтомата. В МО должен быть обеспечен доступ к местам регулировки и смазки, а также натяг режущих кромок ножей.

*Эксплуатационные требования.* Стойкость ножей обрезки ниток без перезаточки составляет не менее 60 рабочих смен. На 100 циклов срабатываний автоматических устройств допускается не более одного из сбоев в работе, таких как необрезка ниток и ее выдергивание из ушка иглы.

Используя проведенный анализ аналогов и прототипов механизмов, подбирают конструкцию ножа. Экспериментально определяют механические характеристики сжатия исследуемой нитки по известной методике [3]. С помощью алгоритма, приведенного в работе [4], находят силы, действующие на нож со стороны нитки для условий резания нитки, расположенной на его лезвиях с натяжением.

На этом этапе можно проводить эксперименты, направленные на минимизацию натяжения игольной нитки в процессе ее захвата, выбирания и резания.

**Проектирование мехатронного модуля МО многоголовочного вышивального полуавтомата.** Разработана модернизированная механическая часть конструкции вышивального полуавтомата фирмы «Текстима», для которого сконструирован МО. Полуавтомат с разработанным механизмом внедрен в производство и находится в эксплуатации на предприятии республики Беларусь. Разработка МО на многоголовочном вышивальном полуавтомате проведена в соответствии с известной методикой.

**Определение сил резания и механических характеристик сжатия исследуемой нитки, для разработки конструкции режущих ножей.** Эту задачу решают с учетом конкретной швейной

головки полуавтомата, для которой разрабатывают мехатронный модуль.

Этапы модернизации рассмотрены на примере вышивального полуавтомата «Текстима», который относится к швейным машинам с плоской платформой. Вид стежка — челночный, челнок — качающийся. Модернизируемая машина — вышивальная, над плоскостью игольной пластины двигаются пальца (устройство для закрепления ткани, на которой будет осуществляться вышивка), что делает применение отдельной обрезки нецелесообразным.

Модернизацию полуавтомата проводят путем внедрения мехатронного модуля перемещения координатного устройства с ШЭД, согласованного с приводом исполнительных механизмов. Использование для управления МО микропроцессорного управления не приводит к значительному усложнению управляющей системы и не влияет на программы вышивки.

Для упрощения конструкции выбран метод совместной обрезки игольной и челночной ниток. Используя возможности системы управления, выбирают цикловой способ обрезки, так как взаимная согласованность процессов обрезки нитки и петлеобразования дает дополнительный положительный эффект.

Расположение ножей — под игольной пластиной, так как их размещение над игольной пластиной значительно усложнит привод, а расположение в игольной пластине представляется нецелесообразным вследствие необхо-

димости формирования требуемых остатков свободных концов ниток.

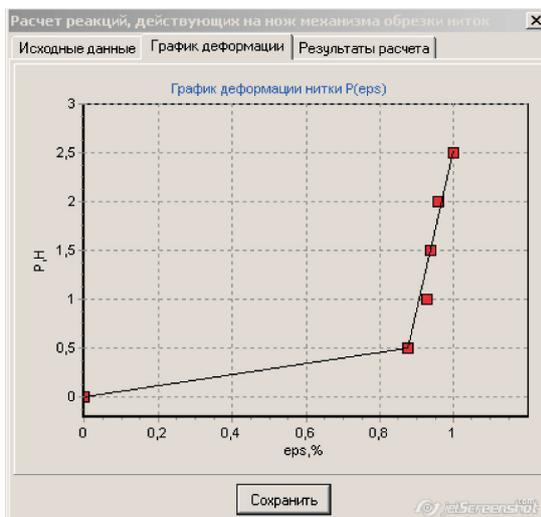
По количеству ножей устройство относится к многоножевому, так как состоит из шести пар подвижных (ПН) и неподвижных (НН) ножей. Обрезка ниток будет проводиться при прямом ходе ПН, поскольку нет необходимости минимизировать расстояние между НН и ПН. Форма ПН выбрана плоской с элементами объема.

Конструкцию ПН выбирают исходя из выполняемых функций. ПН должен захватить одну ветвь игольной нитки в момент образования петли напуска и челночную нитку, а также обеспечить их транспортирование для формирования достаточных остатков длины нитки в зону резания к НН.

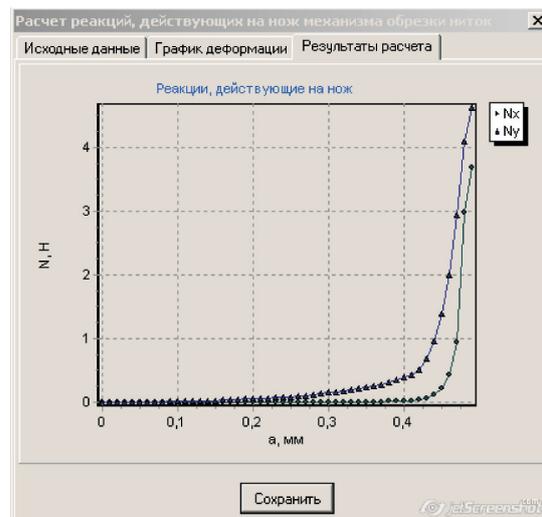
Механические характеристики сжатия исследуемой нитки определяют экспериментальным путем [5, 6]. Используя математический аппарат, находят силу, действующую на ПН со стороны нитки, для условий резания нитки, расположенной на лезвиях ножа с натяжением.

Чтобы реализовать алгоритм определения сил резания нитки, разработан программный продукт MechCut в среде объектно-ориентированного языка Delphi. Главное диалоговое окно программы MechCut показано на рис. 1, а.

В этом диалоговом окне можно ввести основные параметры проектируемого МО, такие как радиус скругления ножа ( $r = 0,001 \dots 1$  мм), координата центра его скругления, ширина лезвия и шаг перемещения. Также исходными



а



б

Рис. 1. Интерфейс программы MechCut:  
а — график деформации нитки  $P = f(\epsilon)$ ; б — график  $N = f(a)$

данными являются параметры нитки, для которой разрабатывают мехатронный модуль: ее диаметр и экспериментальные данные.

В автоматическом режиме строится график деформации нитки в виде зависимости силы  $P$ , действующей на нож, от относительной деформации нитки  $\epsilon$  (см. рис. 1, а), и вычисляются коэффициенты, которые выводятся в основном окне программы [7, 8]. Точки графика соединяются линией методом интерполяции.

На третьей вкладке (рис. 1, б) приведен график, отражающий расчетную зависимость суммарной силы  $N$ , действующей на ПН, от перемещения ПН  $a$ . Эта расчетная зависимость получена на основе математического дифференцирования функций:

$$dN_x = \begin{cases} \frac{k_1 r}{b} \epsilon \cos \psi d\psi & \text{при } 0 \leq \epsilon \leq \epsilon_0; \\ \frac{k_1 r}{b} \epsilon \cos \psi d\psi + \frac{hr}{b} \cos \psi d\psi & \text{при } \epsilon_0 \leq \epsilon \leq 1; \end{cases}$$

$$dN_y = \begin{cases} \frac{k_1 r}{b} \epsilon \sin \psi d\psi & \text{при } 0 \leq \epsilon \leq \epsilon_0; \\ \frac{k_1 r}{b} \epsilon \sin \psi d\psi + \frac{hr}{b} \sin \psi d\psi & \text{при } \epsilon_0 \leq \epsilon \leq 1; \end{cases}$$

где  $dN_x$  и  $dN_y$  — проекции элементарной силы  $dN$ , действующей на ПН со стороны нитки, на оси  $x$  и  $y$ ;  $k_1$ ,  $h$  — коэффициенты, определяемые экспериментальным путем;  $b$  — ширина режущей кромки ножа;  $\psi$  — текущий угол [5];  $\epsilon_0$  — относительная деформация начальной точки.

Точки являются результатом вычисления величин  $N_x$  и  $N_y$ . Данные в программу необходимо вводить для каждого из исследуемых образцов ниток.

**Разработка конструкции ПН с учетом минимизации натягов.** С использованием условия гарантированной обрезки нитки на МО швейного полуавтомата, учитывающего технологические и конструктивные параметры процесса и разрабатываемого мехатронного модуля, получают конструктивную схему ПН (рис. 2).

**Выбор механизма привода ножей с ШЭД.** Структуру МО выбирают исходя из принципа модульности механизмов. Их необходимо разработать так, чтобы они могли разместиться на съемных деталях швейной головки — фронто-

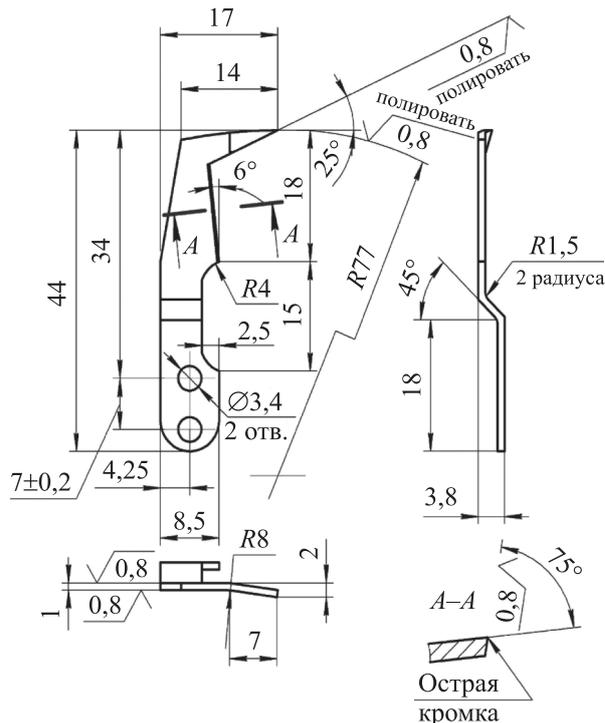


Рис. 2. Конструктивная схема ПН разрабатываемого механизма

вой доске и игольной пластине, что не потребует обработки рукава швейной головки. Привод механизма ножей желательно смонтировать на нижней поверхности стола.

**Расчет технологических параметров МО.** Расчет технологических параметров МО выполняют с учетом конструктивных и кинематических особенностей головки швейной машины (таких как кинематика челнока, нитепритягивателя и конструктивные особенности механизма игловодителя и диаграмм подачи и потребления) [9]. При этом необходимо обеспечить стабильность длин остатков нитки.

**Определение хода ножа.** Схема механизма обрезки нитки на различных тактах работы многоголовочного вышивального полуавтомата приведена на рис. 3. Здесь ПН показан в трех положениях (для наглядности показан вид снизу игольной пластины, описание выполнено для вида сверху на промышленный стол и игольную пластину): исходном крайнем правом, среднем в момент захвата петли игольной нитки и крайнем левом — после обрезки игольной и челночной ниток.

Рабочая часть ПН состоит из носика  $A$ , предназначенного для входа в петлю игольной

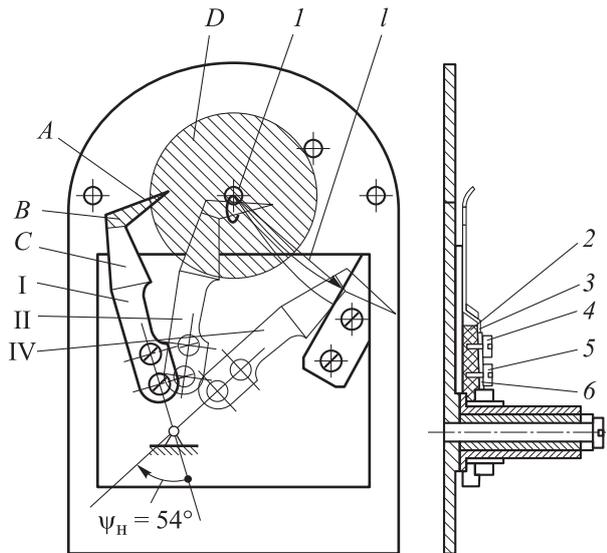


Рис. 3. Схема механизма обрезки нитки на различных тактах работы многоголовочного вышивального полуавтомата:

- 1 — игольное отверстие; 2 — кронштейн; 3 — ПН;  
4, 5 — винты; 6 — шайба; D — зона в которой не может располагаться ПН; I, II, IV — такты работы;  
l — ход ножа;  $\psi_n$  — угол поворота ПН

нитки, наклонной части B, предназначенной для удержания петли, и режущей кромки C, которая, взаимодействуя с режущей кромкой ПН выполняет обрезку игольной и челночной ниток.

Исходное положение ПН выбирают из конструктивных соображений: он должен находиться настолько правее, насколько позволяет конструкция игольной пластины и платформы.

В среднем положении ПН биссектриса угла, образуемого носиком, должна располагаться перпендикулярно плоскости, образуемой ветвями игольной нитки в момент входа носика.

В крайнем левом положении ПН наклонная режущая часть B должна обрезать игольную и челночную нитки так, чтобы длины ниток, остающихся в игле и шпулке, были достаточными для образования следующего после обрезки челночного стежка.

Винтами 4 и 5 (см. рис. 3) ПН 3 соединен с кронштейном 2. Усилие прижатия ПН к НН регулирует толщина шайбы 6.

**Разработка тактограммы работы МО.** Для обеспечения стабильности процесса обрезки разрабатывают тактограмму работы МО во взаимодействии с основными исполнительными механизмами машины. Для улучшения условий обрезки и минимизации натяжения

игольной нитки необходимо использовать возможности ШЭД для остановки главного вала.

Работу и взаимодействие механизмов обрезки ниток, освобождения игольных ниток и главного вала отражает тактограмма.

В такте I главный вал швейной головки вращается с рабочей угловой скоростью, происходит процесс вышивания, ПН находится в исходном крайнем левом положении (см. рис. 3), тарелочки регулятора натяжения игольной нитки обеспечивают натяжение.

В такте II главный вал останавливается в положении, соответствующем максимальному расширению ветвей игольной нитки в зоне захвата носиком ножа. ПН перемещается вправо, входит в пространство между ветвями игольной нитки, продолжает движение, удерживая петлю игольной нитки, и останавливается в промежуточном положении. Тарелочки регулятора натяжения игольной нитки разжаты, натяжение игольной нитки минимальное.

Остановка главного вала способствует оптимизации процесса выбора нитки, снижению ее натяжения, улучшает параметры процесса расширения игольной нитки челноком.

В такте III главный вал вращается с пониженной угловой скоростью (скоростью доводки) и в конце такта останавливается в положении, соответствующем крайнему верхнему положению глазка нитепритягивателя. ПН находится в среднем положении, тарелочки регулятора натяжения разжаты.

В такте IV главный вал неподвижен, ПН движется из среднего положения в крайнее правое и обрезают игольную и челночную нитки. Тарелочки регулятора натяжения игольной нитки разжаты.

В такте V главный вал неподвижен, ПН перемещается из крайнего правого положения в исходное, тарелочки регулятора натяжения сжаты и удерживают игольную нитку.

Указанное взаимодействие главных валов швейной головки, ШЭД и электромагнитов освобождения игольных ниток обеспечивается автоматизированным электроприводом с микропроцессорным управлением и блоком микропроцессорного управления вышивального полуавтомата.

**Оптимизация кинематических и динамических параметров МО.** Для минимизации вре-

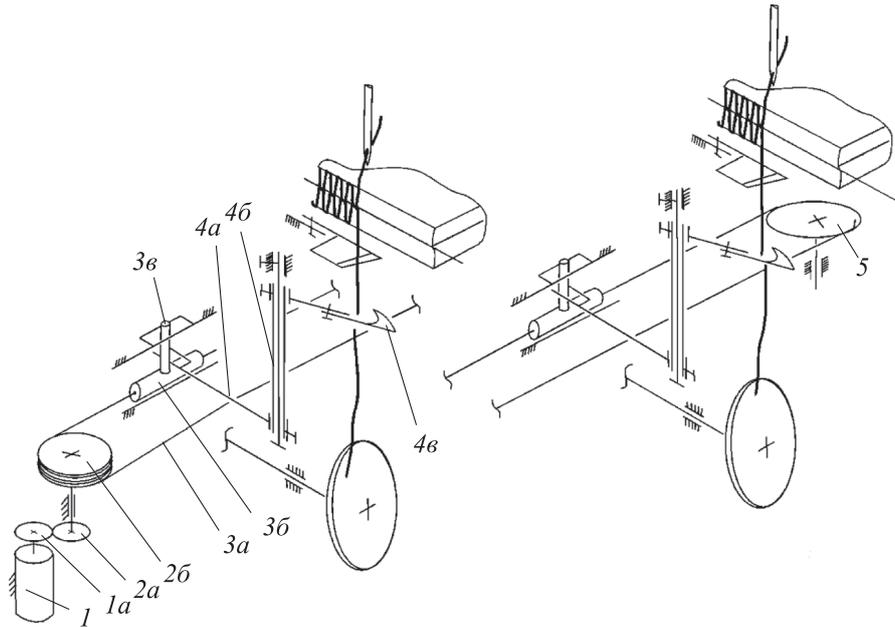


Рис. 4. Кинематическая схема МО на многоголовочном вышивальном полуавтомате

мени срабатывания механизма необходимо оптимизировать кинематические и динамические параметры МО.

**Постановка задачи.** В состав мехатронного модуля МО вышивального полуавтомата входят механическая часть с приводом от ШЭД и система управления с соответствующей программой.

Кинематическая схема МО на многоголовочном вышивальном полуавтомате показана на рис. 4. Зубчатое колесо *1а* зафиксировано на роторе ШЭД *1* и через зубчатое колесо *2а* передает движение на барабан *2б*, который с роликом *5*, тросом *3а*, ползунами *3б* образует тросовую передачу, сообщая поступательное движение пальцам *3в*,двигающимся в направляющих. Пальцы связаны с ПН *4в* через втулки *4б* и кулисные рычаги *4а*.

**Устройство обрезки ниток работает следующим образом.** При подаче определенного количества импульсов на ШЭД его ротор поворачивается на определенный угол и вместе с ним поворачиваются барабан и ролик. Трос получает поступательное движение. Вместе с тросом пальцы и ползуны перемещаются на величину, пропорциональную количеству импульсов, поданных на обмотку ШЭД.

Поступательное движение пальцев через систему кулисных рычагов, втулок, держателей трансформируется во вращательное движение ПН. Обрезка происходит при взаимодействии ПН с НН.

Кинематические диаграммы ротора ШЭД в виде графических зависимостей угла поворота  $\Phi$ , угловой скорости  $\omega$  и углового ускорения  $\varepsilon$  от времени  $t$  приведены на рис. 5.

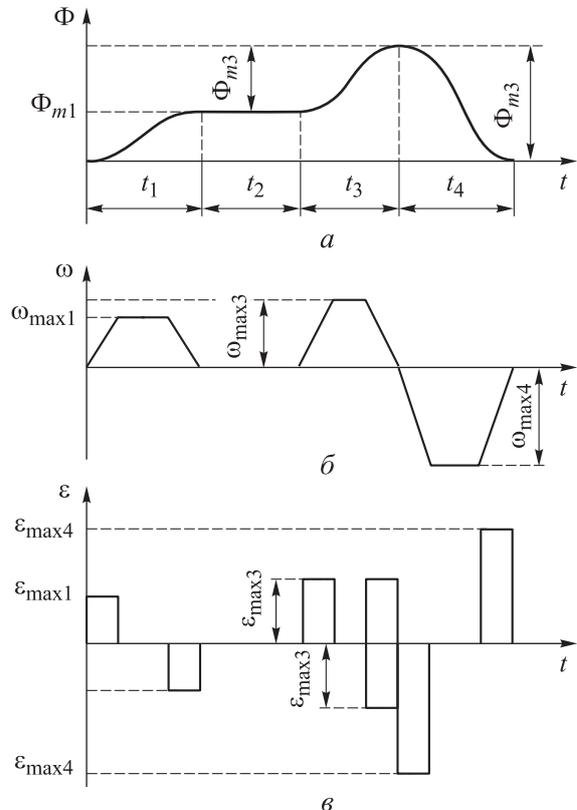


Рис. 5. Зависимости угла поворота  $\Phi$  (а), угловой скорости  $\omega$  (б) и углового ускорения  $\varepsilon$  (в) ротора ШЭД от времени  $t$

Отрезки времени  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ ,  $t_4$  соответствуют продолжительности тактов II, III, IV и V тактограммы. Время  $t_2$  такта II регламентировано скоростью вращения распределительного вала швейных головок и от ШЭД не зависит:  $t_2 = \pi/\omega_{\text{дов}}$ , где  $\omega_{\text{дов}}$  — угловая скорость доводки главного вала.

Отрезки времени  $t_1$ ,  $t_3$  и  $t_4$  определяются следующими выражениями:

$$t_1 = \frac{\Phi_{m1}}{\omega_{\max 1}} + \frac{\omega_{\max 1}}{\epsilon_{\max 1}}; \quad (1)$$

$$t_3 = \frac{\Phi_{m3}}{\omega_{\max 3}} + \frac{\omega_{\max 3}}{\epsilon_{\max 3}}; \quad (2)$$

$$t_4 = \frac{\Phi_{m4}}{\omega_{\max 4}} + \frac{\omega_{\max 4}}{\epsilon_{\max 4}}; \quad (3)$$

где  $\Phi_{m1}$ ,  $\Phi_{m3}$  и  $\Phi_{m4}$  — угол поворота ротора на участке  $t_1$ ,  $t_3$  и  $t_4$  соответственно;  $\omega_{\max 1}$ ,  $\omega_{\max 3}$  и  $\omega_{\max 4}$  — максимальная угловая скорость ротора на участке  $t_1$ ,  $t_3$  и  $t_4$  соответственно;  $\epsilon_{\max 1}$ ,  $\epsilon_{\max 3}$  и  $\epsilon_{\max 4}$  — максимальный модуль углового ускорения ротора на участке  $t_1$ ,  $t_3$  и  $t_4$  соответственно.

Углы поворота ротора вычисляются по формулам

$$\Phi_{m1} = \frac{2S_1 U_{1-2}}{d_{26}}; \quad (4)$$

$$\Phi_{m3} = \frac{2S_3 U_{1-2}}{d_{26}}; \quad (5)$$

$$\Phi_{m4} = \frac{2(S_1 + S_3) U_{1-2}}{d_{26}}; \quad (6)$$

где  $S_1$  и  $S_3$  — перемещение ползунов при переходе ПН (см. рис. 3) из исходного крайнего левого положения в среднее и из него в крайнее правое;  $U_{1-2}$  — передаточное число от первого звена МО ко второму;  $d_{26}$  — диаметр делительных канавок барабана 26 привода (см. рис. 4).

Введем следующие обозначения:

$$2S_1/d_{26} = \psi_1; \quad 2S_3/d_{26} = \psi_3;$$

$$2(S_1 + S_3)/d_{26} = \psi_4.$$

Тогда формулы (4)–(6) принимают вид

$$\Phi_{m1} = \psi_1 U_{1-2};$$

$$\Phi_{m3} = \psi_3 U_{1-2};$$

$$\Phi_{m4} = \psi_4 U_{1-2},$$

а формулы (1)–(3)

$$t_1 = \frac{\psi_1 U_{1-2}}{\omega_{\max 1}} + \frac{\omega_{\max 1}}{\epsilon_{\max 1}};$$

$$t_3 = \frac{\psi_3 U_{1-2}}{\omega_{\max 3}} + \frac{\omega_{\max 3}}{\epsilon_{\max 3}};$$

$$t_4 = \frac{\psi_4 U_{1-2}}{\omega_{\max 4}} + \frac{\omega_{\max 4}}{\epsilon_{\max 4}},$$

где  $\psi_1$  и  $\psi_3$  — угол поворота ПН при переходе из исходного крайнего левого положения в среднее и из него в крайнее правое (см. рис. 3);  $\psi_4$  — угол поворота ПН при обратном ходе.

Поставим задачу определения таких значений параметров  $\omega_{\max 1}$ ,  $\omega_{\max 3}$ ,  $\omega_{\max 4}$ ,  $\epsilon_{\max 1}$ ,  $\epsilon_{\max 3}$ ,  $\epsilon_{\max 4}$ ,  $U_{1-2}$ , при которых сумма  $(t_1 + t_3 + t_4)$  минимальная и выполняются следующие ограничения:

$$M_d \geq M_{c, \text{пр}1} + I_{\text{пр}} \epsilon_{\max 1}; \quad (7)$$

$$M_d \geq M_{c, \text{пр}3} + I_{\text{пр}} \epsilon_{\max 3}; \quad (8)$$

$$M_d \geq M_{c, \text{пр}4} + I_{\text{пр}} \epsilon_{\max 4}, \quad (9)$$

где  $M_d$  — момент на валу ШЭД;  $M_{c, \text{пр}1}$ ,  $M_{c, \text{пр}3}$ ,  $M_{c, \text{пр}4}$  — приведенные к валу ШЭД моменты сил сопротивления;  $I_{\text{пр}}$  — приведенный момент инерции масс электропривода.

Для решения поставленной задачи необходимо минимизировать нелинейную целевую функцию

$$\sum t = \left( \frac{\psi_1}{\omega_{\max 1}} + \frac{\psi_3}{\omega_{\max 3}} + \frac{\psi_4}{\omega_{\max 4}} \right) U_{1-2} + \frac{\omega_{\max 1}}{\epsilon_{\max 1}} + \frac{\omega_{\max 3}}{\epsilon_{\max 3}} + \frac{\omega_{\max 4}}{\epsilon_{\max 4}} \quad (10)$$

с учетом ограничений (7)–(9).

Поставленная задача решена методами нелинейного программирования.

**Определение оптимальных значений кинематических и динамических параметров МО.** Рассмотрим решение поставленной задачи оптимизации на примере МО многоголовочного вышивального полуавтомата.

Исходными данными для оптимизации целевой функции (10) являются:

- углы поворота ПН при его переходе из исходного крайнего левого положения в среднее  $\psi_1$  (см. рис. 3) и из него в крайнее правое  $\psi_3$  (рис. 6);

- постоянные параметры схемы: делительный диаметр зубчатого колеса  $1a$  (см. рис. 4)

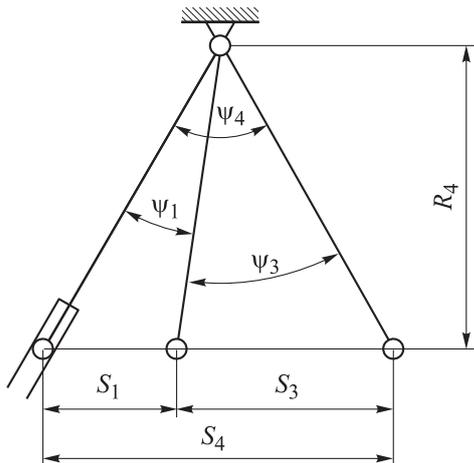


Рис. 6. Схема для оптимизации параметров хода ПН

$D_{1a} = 0,0125$  м; делительный диаметр барабана  $D_{2б} = 0,05$  м; расстояние между осью вращения кулисы и осью пальца  $R_4 = 0,041$  м;

- передаточные числа от второго звена привода к третьему  $U_{2-3} = 40$  рад/м и от третьего к четвертому  $U_{3-4} = 0,041$  м;

- моменты инерции и массы звеньев привода (табл. 1).

Углы поворота и верхней части ножа при его переходе из исходного крайнего левого положения в среднее  $\alpha_1$  и из среднего в крайнее правое  $\alpha_3$  определены экспериментально на макете ПН:  $\psi_1 = 28^\circ$ ;  $\psi_3 = 26^\circ$ . Угол поворота при обратном ходе  $\psi_4 = \psi_1 + \psi_3 = 54^\circ$ .

Нижнее плечо рычага в виде кулисы, жестко связанной с ПН, установлено так, чтобы оси кулисы в крайних положениях (см. рис. 6) располагались симметрично относительно вертикальной оси. Тогда перемещения оси пальца привода и ползуна определяются выражениями

$$S_1 = R_4 \left[ \operatorname{tg} \frac{\psi_4}{2} + \operatorname{tg} \left( \frac{\psi_4}{2} - \psi_1 \right) \right];$$

$$S_3 = S_4 - S_1.$$

После подстановки в формулы значений  $\psi_4$ ,  $R_4$ ,  $\psi_1$  находим значения перемещений:  $S_1 = 0,022$  м;  $S_3 = 0,02$  м;  $S_4 = 0,042$  м.

Определяем углы поворотов ПН:

$$\psi_1 = \frac{2S_1}{d_{2б}} = 0,44 \text{ рад}; \quad \psi_3 = \frac{2S_3}{d_{2б}} = 0,4 \text{ рад};$$

$$\psi_4 = \frac{2S_4}{d_{2б}} = 0,84 \text{ рад}.$$

Таблица 1

Значения моментов инерции и массы деталей звеньев привода механизма ножей

Название детали или звена	Момент инерции $I \cdot 10^6$ , кг·м <sup>2</sup>	Масса, кг
Зубчатое колесо 1а	20,000	–
Шестерня 1б	0,160	–
Первое звено	20,160	–
Зубчатое колесо 2а	Расчет по формуле (14)	–
Барабан 2б	3,702	–
Второе звено	Расчет по формуле (12)	–
Ползун 3б	–	0,0886
Палец 3в	–	0,0044
Третье звено	–	0,5600
Кулисный рычаг 4а	7,557	–
Втулка 4б	0,596	–
Подвижный нож 4в	5,480	–
Четвертое звено	81,800	–
Пятое звено	0,460	–

Приведенный к ротору ШЭД момент инерции звеньев МО вычисляем по выражению

$$I_{пр} = I_{1a} + I_{1б} + \frac{I_2}{U_{1-2}^2} + \frac{m_3}{U_{1-3}^2} + \frac{I_4}{U_{1-4}^2} + \frac{I_5}{U_{1-2}^2}, \quad (11)$$

где  $I_{1a}$ ,  $I_4$  и  $I_5$  — неизменные при оптимизации целевой функции (10) моменты инерции зубчатого колеса 1а (см. рис. 4), четвертого и пятого звеньев привода (см. табл. 1);  $m_3$  — неизменяемая при оптимизации целевой функции масса третьего звена привода (см. табл. 1);  $I_{1б}$  — момент инерции шестерни 1б (на рис. 4 не показана), при  $U_{1-2} = 1$  шестерня отсутствует и  $I_{1б} = 0$ , при  $U_{1-2} > 1$  значения  $I_{1б}$  постоянны (см. табл. 1);  $I_2$  — изменяемый при оптимизации целевой функции момент инерции второго звена привода.

Момент инерции второго звена привода

$$I_2 = I_{2a} + I_{2б}, \quad (12)$$

где  $I_{2a}$  — изменяемый момент инерции зубчатого колеса 2а (см. рис. 4);  $I_{2б}$  — постоянный момент инерции барабана.

Конструктивная схема зубчатого колеса 2а с размерами конструктивных элементов приведена на рис. 7.

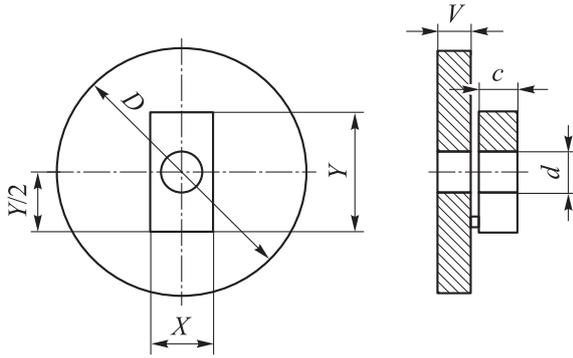


Рис. 7. Схема зубчатого колеса 2а (см. рис. 4) с размерами конструктивных элементов

Согласно схеме привода, имеем

$$I_{2a} = m_1 \frac{X^2 + Y^2 + c^2}{12} + \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} V \rho \frac{D^2 - d^2}{8} =$$

$$= m_1 \frac{X^2 + Y^2 + c^2}{12} + \frac{\pi V \rho}{32} (D^2 - d^4), \quad (13)$$

где  $m_1$  — масса призмы,  $m_1 = XYc\rho$  ( $X$ ,  $Y$ ,  $c$  — размеры призмы);  $D$  — диаметр основной окружности;  $d$  — посадочный диаметр;  $V$  — ширина зубчатого венца;  $\rho$  — плотность материала (капролона) колеса,  $\rho = 1,5 \text{ кг/м}^3$ ;

Выражая  $D$  через  $U_{1-2}$  и делительный диаметр шестерни  $d_{16}$  привода, получаем момент

$$I_{2a} = m_1 \frac{X^2 + Y^2 + c^2}{12} + \frac{\pi V \rho}{32} (U_{1-2}^4 d_{16}^4 - d^4). \quad (14)$$

После подстановки в формулы (12)–(14) значений величин получаем

$$I_2 = 3,702 \cdot 10^{-6} + 18,84(1525,9U_{12}^4 - 625) \cdot 10^{-6}, \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Изменяемые передаточные числа определяются выражениями

$$U_{1-3} = U_{1-2}U_{2-3} = 40U_{1-2}, \text{ рад/м};$$

$$U_{1-4} = U_{1-2}U_{2-3}U_{3-4} = 1,64U_{1-2}.$$

Подставляя полученные значения  $I_2$ ,  $U_{1-3}$ ,  $U_{1-4}$  в выражение (11), получаем

$$I_{\text{пр}} = I_{1a} + I_{16} +$$

$$+ \frac{3,702 \cdot 10^{-6} + 18,84 \cdot (1525,9 \cdot U_{1-2}^4 - 625) \cdot 10^{-6}}{U_{1-2}^2} +$$

$$+ \frac{m_3}{1600U_{1-2}^2} + \frac{I_4}{2,69U_{1-2}^2} + \frac{I_5}{U_{1-2}^2}. \quad (15)$$

**Механические характеристики ШЭД.** В приводе МО используют ШЭД типа ДШИ-200-3.

Таблица 2

Значения коэффициентов  $Z$  и  $F$  динамических характеристик ШЭД типа ДШИ-200-3

Максимальный модуль углового ускорения ротора $\varepsilon_{\text{max}}$ , рад/с <sup>2</sup>	Коэффициенты	
	$Z$	$F \cdot 10^{-3}$
2000	1,38	28,9
4000	1,67	20,0
6000	1,50	17,7
8000	1,58	12,5
10 000	1,58	12,4
12 000	1,44	14,0
14 000	1,45	12,5
16 000	1,32	10,1
18 000	1,32	7,8
20 000	1,60	4,2

Динамические механические характеристики ШЭД можно описать дробно-рациональной функцией [2, 3]

$$M_d = \frac{1}{Z + F\omega_{\text{max}}}, \quad (16)$$

где  $Z$  и  $F$  — коэффициенты, зависящие от максимального модуля углового ускорения ротора  $\varepsilon_{\text{max}}$  (табл. 2);  $\omega_{\text{max}}$  — максимальная угловая скорость ротора.

**Оптимизация целевой функции.** Проведена численная оптимизация кинематических и динамических параметров МО [10, 11].

Программное обеспечение блока микропроцессорного управления опытного образца многоголовочного вышивального полуавтомата не предусматривает оперативного изменения углового ускорения  $\varepsilon_{\text{max}}$  ротора ШЭД типа ДШИ-200-3. Поэтому угловое ускорение  $\varepsilon_{\text{max}}$  на всех участках движения является одинаковым. При этом целевая функция (10) принимает вид

$$\sum t = \left( \frac{\Psi_1}{\omega_{\text{max}1}} + \frac{\Psi_3}{\omega_{\text{max}3}} + \frac{\Psi_4}{\omega_{\text{max}4}} \right) U_{1-2} +$$

$$+ \frac{\omega_{\text{max}1} + \omega_{\text{max}3} + \omega_{\text{max}4}}{\varepsilon_{\text{max}}}.$$

С учетом ограничений оптимизируем целевую функцию следующим образом:

$$M_d \geq M_{\text{с.пр}1} + I_{\text{пр}}\varepsilon_{\text{max}};$$

$$M_d \geq M_{\text{с.пр}3} + I_{\text{пр}}\varepsilon_{\text{max}};$$

$$M_d \geq M_{\text{с.пр}4} + I_{\text{пр}}\varepsilon_{\text{max}}.$$

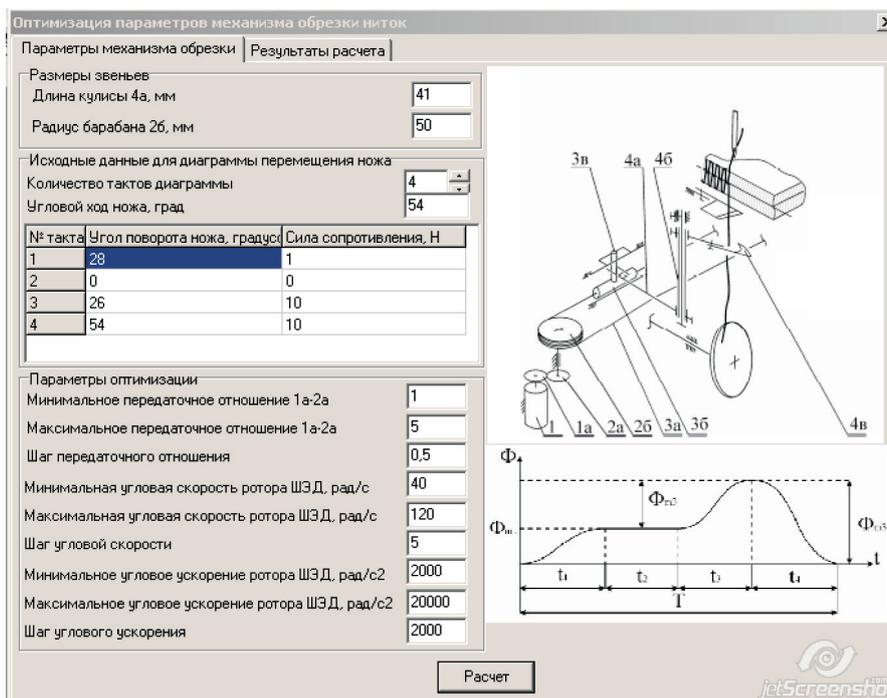


Рис. 8. Главное диалоговое окно программы MechCut2

Момент на валу ШЭД  $M_d$  вычисляем по выражению (16), приведенный к ротору ШЭД момент инерции звеньев МО  $I_{пр}$  — по формуле (15).

Приведенный к валу ШЭД момент сил сопротивления  $M_{с.пр1}$  принят равным нулю. Значения приведенных к валу ШЭД моментов сил сопротивления  $M_{с.пр3}$  и  $M_{с.пр4}$  определены по формуле

$$M_{с.пр3} = M_{с.пр4} = \frac{P_{с.пр}}{U_{1-3}} = \frac{P_{с.пр}}{40U_{1-2}},$$

где  $P_{с.пр}$  — приведенная к ротору ШЭД сила сопротивления, измеренная экспериментальным путем,  $P_{с.пр} = 10$  Н.

Минимизация целевой функции выполнена на компьютере. В результате минимизации получены следующие параметры, соответствующие минимальному времени цикла при  $\epsilon_{max} = 4000$  рад/с<sup>2</sup>:

- передаточное отношение — 3,5;
- $\omega_{max} = 95$  рад/с;
- $\sum t = 0,195$  с.

**Оптимизация кинематических и динамических параметров МО.** Для оптимизации в среде объектно-ориентированного языка Delphi

разработан программный продукт MechCut2 (рис. 8).

Оптимизация заключается в минимизации времени срабатывания МО  $t$  на многоголовочном вышивальном полуавтомате с микропроцессорным управлением. В главном диалоговом окне программного продукта MechCut2 (см. рис. 8) можно ввести исходные параметры МО, оптимизируемые с целью минимизации времени срабатывания МО.

### Выводы

1. Разработан мехатронный модуль МО швейных полуавтоматов, который нашел применение на предприятиях республики Беларусь. Предложенный вариант конструкции ориентирован на МО вышивального полуавтомата. Получены аналитические зависимости для определения длин остатков игольной и челночной ниток, остающихся в игле, челноке, лицевой и изнаночной сторонах материала.

2. Последовательность основных этапов проектирования мехатронного модуля МО может быть распространена для проектирования мехатронных модулей оборудования или полуавтоматов с микропроцессорным управлением.

## Литература

- [1] Мехатроника, автоматизация, управление. *Тр. первой всерос. науч.-тех. конф. с межд. уч.* Москва, Новые технологии, 2004. 508 с.
- [2] Хайман Б., Герт В., Попп Л. и др. Компоненты, методы, примеры. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2010.
- [3] Козлов В.А. *Исследование резания нитей и методика проектирования ножниц*. Автореф. дисс. ... канд. тех. наук. Кострома, Костромской технолог. инст., 1974. 18 с.
- [4] Дрюков В.В. *Разработка и исследование рабочих процессов и механизмов автоматизированной одноигльной швейной машины с плоской платформой для стачивания верха обуви*. Дисс. ... канд. тех. наук. Витебск, ВГТУ, 2000. 230 с.
- [5] Новиков Ю.В., Краснер С.Ю. Исследование параметров процесса резания швейных ниток. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2020, № 10, с. 3–12, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2020-10-3-12>
- [6] Троицкий В.А., ред. *Инженерные расчеты на ЭВМ*. Ленинград, Машиностроение, 1979. 288 с.
- [7] Мудров А.Е. *Численные методы для ПЭВМ на языках Бейсик, Фортран, Паскаль*. Томск, МП Раско, 1991. 272 с.
- [8] Бобровский С.И. *Delphi 7*. Санкт-Петербург. Питер, 2008. 736 с.
- [9] Новиков Ю.В., Краснер С.Ю., Смелков Д.В. Измерение параметров процесса резания швейных ниток. *Приборы*, 2019, № 8, с. 45–51.
- [10] Полухин В.П. *Проектирование механизмов швейно-обметочных машин*. Москва, Машиностроение, 1972. 280 с.
- [11] Комиссаров А.И., ред. *Проектирование и расчет машин обувных и швейных производств*. Москва, Машиностроение, 1978. 431 с.

## References

- [1] *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie. Tr. pervoy vseros. nauch.-tekh. konf. s mezhd. uch* [Mechatronics, automation, control. Proc. 1<sup>st</sup> Russ. Sci.-Tech. Conf. with Int. Participaton]. Moscow, Novye tekhnologii Publ., 2004. 508 p. (In Russ.).
- [2] Khayman B., Gert V., Popp L. et al. *Komponenty, metody, primery* [Components, methods, examples]. Novosibirsk, Izd-vo SO RAN Publ., 2010. (In Russ.).
- [3] Kozlov V.A. *Issledovanie rezaniya nitey i metodika proektirovaniya nozhnits*. Avtoref. diss. ... kand. tekh. nauk [Study on cutting of threads and method of designing scissors. Abs. kand. tech. sci. diss.]. Kostroma, Kostromskoy tekhnolog. inst. Publ., 1974. 18 p. (In Russ.).
- [4] Dryukov V.V. *Razrabotka i issledovanie rabochikh protsessov i mekhanizmov avtomatizirovannoy odnoigol'noy shveyonoy mashiny s ploskoy platformoy dlya stachivaniya verkha obuvi*. Diss. kand. tekh. nauk [Design and study on working processes and mechanisms of automated single-needle flat-bed machine for sewing shoe upper. Kand. tech. sci. diss.]. Vitebsk, VGTU Publ., 2000. 230 p. (In Russ.).
- [5] Novikov Yu.V., Krasner S.Yu. A study of parameters of the sewing thread cutting process. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2020, no. 10, pp. 3–12, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2020-10-3-12> (in Russ.).
- [6] Troitskiy V.A., ed. *Inzhenernye raschety na EVM* [Engineering computations using computer]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1979. 288 p. (In Russ.).
- [7] Mudrov A.E. *Chislennyye metody dlya PEVM na yazykakh Beysik, Fortran, Paskal'* [Computer numerical methods on Basic, Fortran, Pascal languages]. Tomsk, MP Rasko Publ., 1991. 272 p. (In Russ.).
- [8] Bobrovskiy S.I. *Delphi 7* [Delphi 7]. Sankt-Petersburg. Piter Publ., 2008. 736 p. (In Russ.).
- [9] Novikov Yu.V., Krasner S.Yu., Smelkov D.V. Measuring the parameters of the sewing thread cutting process. *Pribory* [Instruments], 2019, no. 8, pp. 45–51. (In Russ.).

- [10] Polukhin V.P. *Proektirovanie mekhanizmov shveyno-obmetochnykh mashin* [Design of sewing-whipping machine mechanisms]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972. 280 p. (In Russ.).
- [11] Komissarov A.I., ed. *Proektirovanie i raschet mashin obuvnykh i shveynykh proizvodstv* [Design and calculation of machines for footwear and garment manufacture]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978. 431 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 01.04.2022

## Информация об авторах

**НОВИКОВ Юрий Васильевич** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Автоматизация производственных процессов». Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет» (210035, Витебск, Республика Беларусь, Московский проспект, д. 72, e-mail: nov\_u\_vik@mail.ru).

**КРАСНЕР Стас Юрьевич** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Автоматизация производственных процессов». Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет» (210035, Витебск, Республика Беларусь, Московский проспект, д. 72, e-mail: stas@tut.by).

## Information about the authors

**NOVIKOV Yuri Vasilievich** — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Information systems and automation of production Department. Educational institution Vitebsk State Technological University (210035, Vitebsk, Republic of Belarus, Moskovskiy Ave., Bldg. 72, e-mail: nov\_u\_vik@mail.ru).

**KRASNER Stas Yurevich** — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Information systems and automation of production Department. Educational institution Vitebsk State Technological University (210035, Vitebsk, Republic of Belarus, Moskovskiy Ave., Bldg. 72, e-mail: stas@tut.by).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Новиков Ю.В., Краснер С.Ю. Разработка мехатронного модуля обрезки ниток. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 10, с. 62–73, doi: 10.18698/0536-1044-2022-10-62-73

### Please cite this article in English as:

Novikov Yu.V., Krasner S.Yu. Development of a Mechatronic Thread Trimmer. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2022, no. 10, pp. 62–73, doi: 10.18698/0536-1044-2022-10-62-73