

# ВЕСТНИК

*Белорусско-Российского университета*

*Научно-методический журнал  
Издается с октября 2001 г.*

*Периодичность – 4 раза в год*

2(63) 2019

---

## СОДЕРЖАНИЕ

### МАШИНОСТРОЕНИЕ

<b>КОЖЕВНИКОВ М. М., ЧУМАКОВ О. А., ШЕМЕНКОВ В. М., ИЛЮШИН И. Э.</b> Методы и алгоритмы планирования траекторий роботов-манипуляторов для лазерной резки .....	4
<b>КОРОТЕЕВ А. О., ФЕТИСОВА Е. А., КУЛИКОВ В. П.</b> Технологические характеристики дуговой сварки с двухструйной коаксиальной подачей компонентов защитной газовой среды .....	14
<b>ЛУСТЕНКОВА Е. С., МЕТЕЛИЦА Я. Н., МОИСЕЕНКО А. Н.</b> Сравнительный анализ сферических роликовых передач с различными профилями беговых дорожек .....	23
<b>СВИРЕПА Д. М., СЕМЁНОВА А. С.</b> Влияние способов совмещенной обработки резанием и магнитно-динамическим накатыванием на шероховатость поверхности .....	34
<b>ТАРАСИК В. П.</b> Методика имитационного моделирования режима испытаний на управляемость и устойчивость автомобиля при входе в поворот .....	44
<b>ФУРМАНОВ С. М., ЮМАНОВ Д. Н., СМОЛЯР И. Н., КАМЧИЦКАЯ И. Д.</b> Компьютерное управление процессом контактной сварки с помощью среды графического программирования LabVIEW .....	54

<b>ШАТУРОВ Д. Г.</b> Определение скоростей резания, обеспечивающих наибольшую производительность и наименьшую себестоимость .....	63
---	----

### ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

<b>КОВАЛЬЧУК В. М.</b> Вероятностно-маржинальный инструмент оценки эффективности энергоменеджмента предприятия .....	72
--	----

### СТРОИТЕЛЬСТВО. АРХИТЕКТУРА

<b>ОПАНАСЮК И. Л., ДАНИЛОВ С. В.</b> Восстановление эксплуатационных качеств железобетонных колонн ОАО «Кричевцементношифер».....	80
---	----

### ЭКОНОМИКА. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

<b>ТОКМЕНИНОВ К. А.</b> Повышение конкурентоспособности продукции на промышленном предприятии на примере ОАО «Ольса» .....	92
--	----

- *Журнал включен в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим наукам*
- *Публикуемые материалы рецензируются*
- *Подписные индексы: для индивидуальных подписчиков – 00014  
для предприятий и организаций – 000142*

## CONTENTS

### MECHANICAL ENGINEERING

<b>KOZHEVNIKOV M. M., CHUMAKOV O. A., SHEMENKOV V. M., ILUSHIN I. E.</b> Methods and algorithms for robotic manipulator trajectory planning in laser cutting .....	4
<b>KOROTEYEV A. O., FETISOVA E. A., KULIKOV V. P.</b> Technological characteristics of arc welding with double-jet coaxial supply of protective gas medium components .....	14
<b>LUSTENKOVA E. S., METELITSA Y. N., MOISEENKO A. N.</b> Comparative analysis of spherical roller transmissions with different profiles of raceways .....	23
<b>SVIREPA D. M., SIAMIONAVA A. S.</b> Influence of processing methods Combining metal cutting and magneto-dynamic rolling on the surface roughness .....	34
<b>TARASIK V. P.</b> Technique for imitation modeling of testing controllability and stability of the vehicle entering a turn .....	44
<b>FURMANOV S. M., YUMANOV D. N., SMOLAR I. N., KAMCHITSKAYA I. D.</b> Computer control of the process of resistance welding in the LabVIEW graphical programming environment .....	54
<b>SHATUROV D. G.</b> Determination of cutting speeds ensuring the highest productivity and the lowest cost .....	63

### ELECTRICAL ENGINEERING

<b>KOVALCHUK V. M.</b> Probabilistic marginal tools for assessing the efficiency of enterprise energy management .....	72
--	----

### CIVIL ENGINEERING. ARCHITECTURE

<b>APANASIUK I. L., DANILOV S. V.</b> Restoraring performance of reinforced concrete columns at JSC Krichevtsementnoshifer .....	80
--	----

### ECONOMICS. ECONOMIC SCIENCES

<b>TOKMENINOV K. A.</b> Increase of products competitiveness at the industrial enterprise based on the example of JSC «Olsa».....	92
---	----

## МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.865

*М. М. Кожевников, О. А. Чумаков, В. М. Шеменков, И. Э. Илюшин*

### МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ПЛАНИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИЙ РОБОТОВ-МАНИПУЛЯТОРОВ ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ

UDC 621.865

*M. M. Kozhevnikov, O. A. Chumakov, V. M. Shemenkov, I. E. Ilushin*

### METHODS AND ALGORITHMS FOR ROBOTIC MANIPULATOR TRAJECTORY PLANNING IN LASER CUTTING

#### **Аннотация**

Рассмотрены новые методы и алгоритмы, обеспечивающие эффективное планирование траекторий роботов-манипуляторов в процессе лазерной резки. Предложенный подход обеспечивает сегментацию траектории режущего инструмента линейными и дугвыми участками максимальной длины и его движение с постоянной скоростью в точках сопряжения сегментов.

#### **Ключевые слова:**

робот-манипулятор, лазерная резка, планирование траекторий.

#### **Abstract**

The paper considers new methods and algorithms which ensure effective planning of trajectories for robotic manipulators in the process of laser cutting. The proposed approach provides the segmentation of the cutting tool trajectory into linear and arc sections of maximum length and its movement at a constant speed at the junction points of segments.

#### **Keywords:**

robotic manipulator, laser cutting, trajectory planning.

#### **Введение**

В условиях современного производства широкое применение находят технологические линии, автоматизированные с использованием промышленных роботов. При этом перспективным направлением является применение роботов-манипуляторов в технологическом процессе лазерной резки. В настоящее время лазерная резка в основном осуществляется портальными манипуляторами, работающими в декартовой системе координат и не позволяющими эффективно выполнять операции лазерной резки в трёхмерном пространстве [1].

Шестиосные роботы-манипуляторы обладают значительными возможностями по ориентированию режущего инструмента в пространстве, однако их внедрение в технологический процесс лазерной резки существенно ограничено из-за отсутствия эффективных методов и алгоритмов планирования траекторий в условиях высоких скоростей резки [2, 3].

Современные технологические процессы лазерной резки используют лазеры с мощностью 500...7500 Вт, которые позволяют достаточно эффективно резать металлические листы, пластик и керамические материалы толщиной от 0,1 до 40 мм. При этом должна обеспе-

чиваться точность позиционирования режущего инструмента от  $\pm 0,005$  до  $\pm 0,3$  мм в зависимости от толщины заготовки. Скорость при движении режущего инструмента по заданному контуру изменяется в диапазоне 800...3000 мм в минуту [1]. В качестве режущего инструмента обычно используется твердотельный лазер, при этом манипулятор обеспечивает ориентирование лазерного луча вдоль нормали к криволинейной поверхности заготовки.

Планирование траекторий движения робота-манипулятора может производиться посредством ручного обучения, при котором контур резки предварительно наносится на поверхность заготовки, а затем человек-оператор с помощью пульта управления робота перемещает режущий инструмент вдоль данного контура, сохраняя в память контроллера промежуточные точки. При этом для достижения требуемой степени точности позиционирования и соблюдения ограничений на положение, ориентацию и скорость режущего инструмента необходимы проведение многократных прогонов программы управления и значительные затраты времени. Альтернативой является автономный подход к планированию траектории, при котором управляющая программа формируется на основе трехмерных компьютерных моделей робота, режущего инструмента и заготовки [3, 4]. При создании таких систем возникает ряд новых научных задач, связанных методиками и алгоритмизацией задачи планирования траектории лазерной резки.

### Основная часть

Современные системы управления промышленными роботами-манипуляторами обеспечивают перемещение технологического инструмента в декартовых координатах с линейной, круговой либо сплайновой интерполяцией [1], что приводит к необходимости разбиения

любого сложного контура лазерной резки на небольшие участки с требуемой точностью построения траектории. С учетом этого предлагаемый подход к планированию траектории предполагает реализацию этапов сегментации контура резки и формирования узловых точек траектории, поиска допустимых локаций режущего инструмента в узловых точках, сглаживания траектории в окрестности узловых точек. Рассмотрим последовательно данные этапы.

*Сегментация контура резки и формирование узловых точек траектории.* Исходный контур для лазерной резки можно достаточно эффективно описать в виде так называемой обобщенной полилинии

$$\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_k\}, \quad (1)$$

где  $\omega_i = \{p_i, a_i\}$ ;  $p_i$  – радиус-вектор, соответствующий точке с номером  $i$ ,  $p_i = (p_{xi}, p_{yi}, p_{zi})$ ;  $a_i$  – вектор ориентации режущего инструмента в точке с номером  $i$ ,  $a_i = (a_{xi}, a_{yi}, a_{zi})$ .

Расстояние между двумя соседними точками контура равно  $\Delta s_{\min}$ :

$$|p_i - p_{i-1}| = \Delta s_{\min}. \quad (2)$$

Целью сегментации контура для лазерной резки является формирование новой последовательности  $\Omega'$ , образованной минимальным количеством точек  $m$  и соответствующей граничным условиям

$$\omega'_1 = \omega_1; \quad \omega'_m = \omega_k. \quad (3)$$

Для введения ограничения на точность обозначим через  $\rho(\Omega, \Omega')$  функцию вычисления максимального расстояния между исходным и сегментированным контуром. Тогда ограничение на точность сегментации будет иметь вид:

$$\rho(\Omega, \Omega') \leq \delta, \quad (4)$$

где  $\delta$  – предельно допустимое отклонение сегментированной траектории  $\Omega'$  от исходного контура (1).

Предложен метод сегментации контура резки, основанный на аппроксимации исходного избыточного множества точек линейными и дуговыми участками максимальной длины, причем начальная точка участка фиксируется. На первом этапе предполагается, что необходим дуговой сегмент и через точки с номерами  $i, m = i + 1, j = i + 2$  строится окружность. Радиус этой окружности сравнивается с предельно допустимым значением. Если радиус меньше предельно допустимого значения, то конечная точка участка передвигается в точку с номером  $j = j + 1$ , а также вычисляется номер средней точки  $m = \text{int}((i + j) / 2)$ , где  $\text{int}()$  – символическое обозначение функции округления до целого числа. Повторно рассчитывается радиус окружности и сравнивается с предельным значением. Помимо этого, вычисляется расстояние между промежуточными точками  $p_k$  (значение  $k$  изменяется в диапазоне от  $k = i + 1$  до  $j - 1$ ) и окружностью. Сдвиг конечной точки дугового участка продолжается до тех пор, пока радиус окружности не превышает предельного значения и расстояние между окружностью и промежуточными точками меньше допустимого значения.

Формирование линейного сегмента начинается с точек с номерами  $i, j = i + 1$ , при этом выполняется перемещение конечной точки линейного участка и контроль соответствия расстояния между промежуточными точками  $p_k$  (значение  $k$  изменяется в диапазоне от  $k = i + 1$  до  $j - 1$ ) и линией допустимому значению. Если данное расстояние превысило допустимое значение, процесс формирования линейного сегмента закончен. Алгоритм сегментации, построенный в соответствии с вышеописанным подходом, представлен

на рис. 1. Тестирование данного алгоритма сегментации выполнено с использованием пакета *Matlab*. Пример сегментации контура лазерной резки, образованного сплайном, приведен на рис. 2.

*Поиск допустимых локаций режущего инструмента в узловых точках.* Рассмотрим системы координат на примере роботизированной ячейки для лазерной резки на базе робота Fanuc 710iC/50. Для описания положения и ориентации всех элементов этой ячейки используются: мировая система координат (*World*); система координат режущего инструмента (*Tool*); базовая система координат робота (*Base*); система координат фланца для крепления режущего инструмента (*Flange*) (рис. 3).

С учетом перечисленных систем координат матрица, описывающая положение и ориентацию режущего инструмента в мировой системе координат, имеет вид:

$${}^0T_t = {}^0T_b \times {}^bT_1(q_1) \times {}^1T_2(q_2) \times \dots \times {}^4T_5(q_5) \times {}^5T_6(q_6) \times {}^FT_t, \quad (5)$$

где  ${}^0T_b$  – матрица положения и ориентации базы робота относительно мировой системы «*World*»;  ${}^FT_t$  – матрица положения и ориентации режущего инструмента относительно системы координат фланца робота «*Flange*»;  $T_i(q_i)$  – матрицы геометрической структуры робота-манипулятора, зависящие от величин обобщенных координат  $q_i$ .

В системах управления роботами-манипуляторами Fanuc 710iC матрицы  ${}^0T_b$  и  ${}^FT_t$  можно корректировать при помощи программных инструкций. В частности, матрица положения и ориентации базы робота может быть параметризована следующим образом:

$${}^0T_b = R_z(a_B) \times R_y(b_B) \times R_x(c_B) \times T_x(x_B) \times T_y(y_B) \times T_z(z_B), \quad (6)$$

где  $R_x, R_y, R_z$  – матрицы поворота относительно осей  $x, y, z$  в зависимости от соответствующих углов поворота базы манипулятора  $a_B, b_B, c_B$ ;  $T_x, T_y, T_z$  – мат-

рицы, описывающие сдвиг базы манипулятора вдоль осей  $x, y, z$  в зависимости от соответствующих линейных сдвигов  $x_B, y_B, z_B$ .

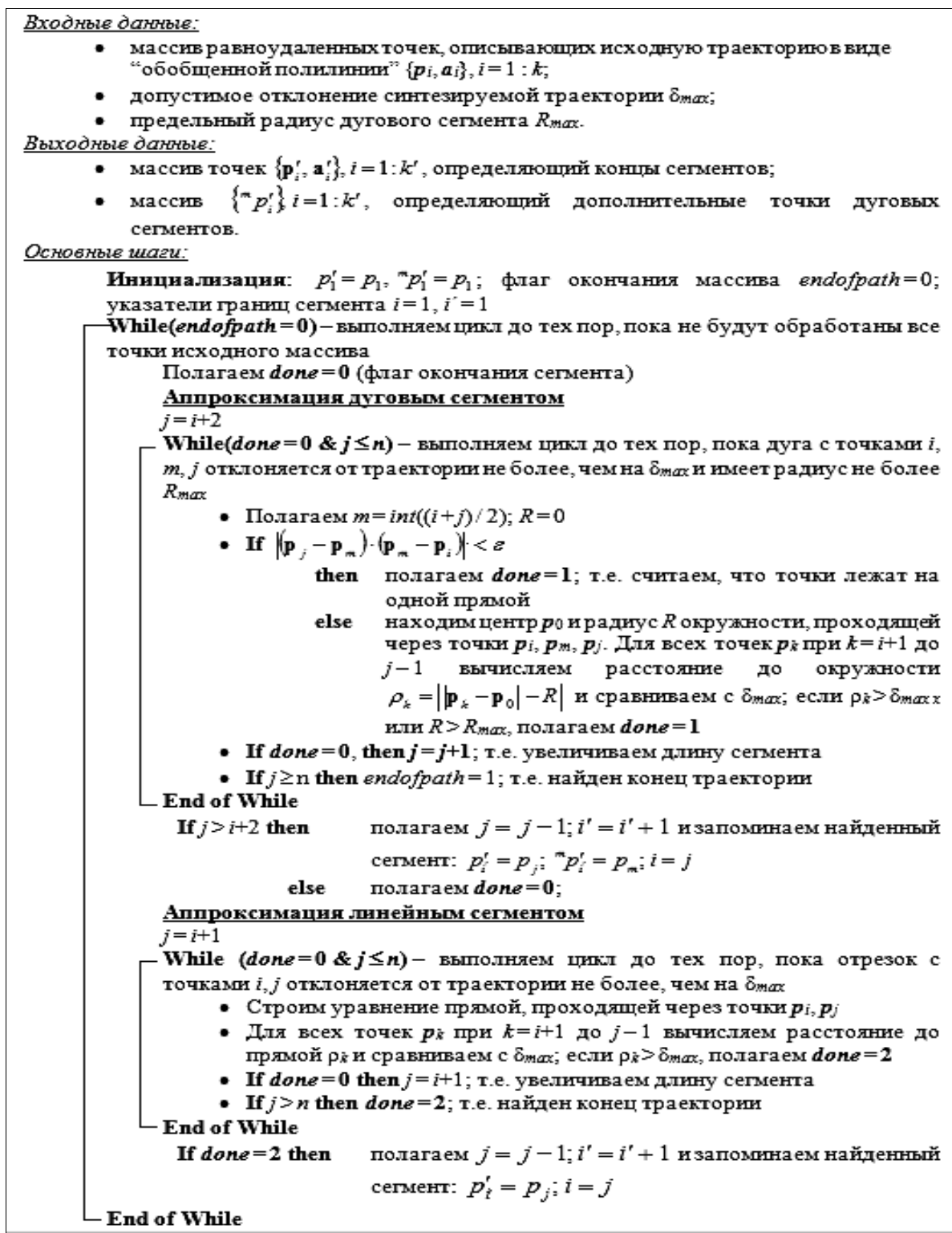


Рис. 1. Алгоритм сегментации контура лазерной резки

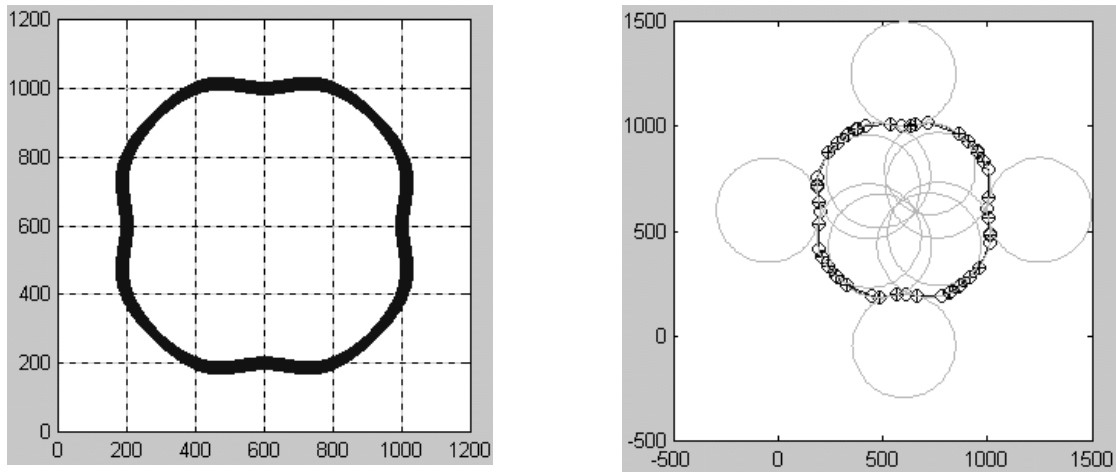


Рис. 2. Сегментация контура лазерной резки, образованного сплайном

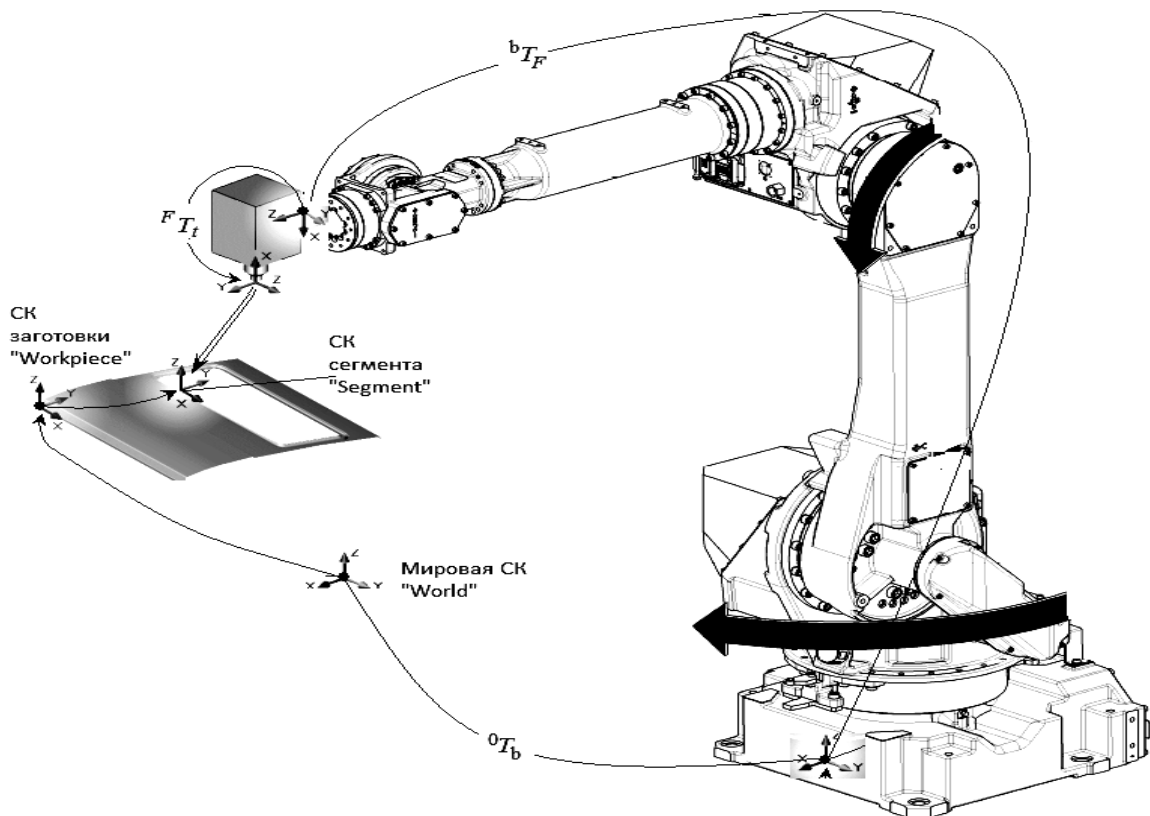


Рис. 3. Системы координат робота-манипулятора Fanuc 710iC/50 в процессе лазерной резки

Для параметризации режущего инструмента использованы следующие параметры (рис. 4):  $T$  – смещение режущего инструмента относительно фланца;  $L$  – длина режущего инструмента;  $D$  – угол, задающий поворот режущего инструмента вокруг фланца ро-

бота. С учетом этих параметров матрица положения и ориентации режущего инструмента относительно системы координат фланца будет иметь вид:



$${}^F T_t = \begin{bmatrix} \cos(D) & -\sin(D) & 0 & -L \\ \sin(D) & \cos(D) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Системы координат сегментов траектории резки формируются следующим образом: ось  $X_i$  всегда направляется вдоль траектории лазерной резки; ось  $Z_i$  представляет собой нормаль к поверхности заготовки; ось  $Y_i$  формирует совместно с осями  $X_i, Z_i$  правостороннюю систему координат. Тогда соответ-

ствующие матрицы преобразования имеют вид:

$${}^0 T_{Segm_i} = {}^{World} T_{Segm_i} = {}^{World} T_{Wpiece} \times {}^{Wpiece} T_{Segm_i}, \quad (8)$$

где  ${}^{Wpiece} T_{Segm_i}$  и  ${}^{World} T_{Wpiece}$  – матрицы, описывающие положение и ориентацию сегмента траектории с номером  $i$  относительно заготовки и системы координат заготовки относительно базовой координатной системы.

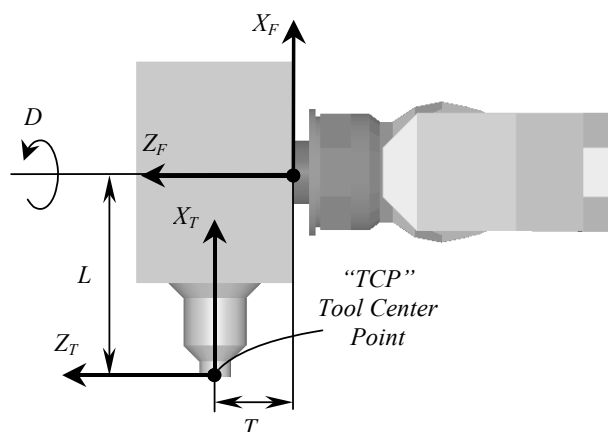


Рис. 4. Параметризация режущего инструмента

С учетом матриц преобразования (5)–(8) планирование траектории лазерной резки может быть произведено путем последовательного совмещения системы координат, связанной с рабочей точкой режущего инструмента, с системами координат сегментированного контура  ${}^0 T_{Segm_i}$ , причем угол поворота  $\gamma$  вокруг оси  $z_i$  остается свободным параметром:

$${}^0 T_{Segm_i} \times R_z(\gamma) = {}^0 T_{Robot}(\mathbf{q}), \quad (9)$$

где  ${}^0 T_{Robot}(\mathbf{q})$  – матрица, описывающая положение и ориентацию режущего инструмента в мировой системе координат в зависимости от вектора  $\mathbf{q}$ , задающего значения углов в сочленениях манипу-

лятора,  ${}^0 T_{Robot}(\mathbf{q}) = {}^0 T_t; R_z(\gamma)$  – матрица поворота режущего инструмента на угол  $\gamma$  вокруг нормали к поверхности заготовки.

Отметим, что изменения величины угла  $\gamma$  в диапазоне  $\gamma = 2\pi j/2; j = 0 \dots k$  могут быть использованы как для обхода столкновений при движении манипулятора, так и для оптимизации траектории.

Для перехода к обобщенным координатам решается обратная задача кинематики для робота-манипулятора

$$\mathbf{q} = k\left({}^0 T_{Segm_i} \times R_z(\gamma)\right), \quad (10)$$

где  $k()$  – функция вычисления обратной задачи кинематики робота-манипулятора;  $\mathbf{q}$  – вектор, задающий углы в со-

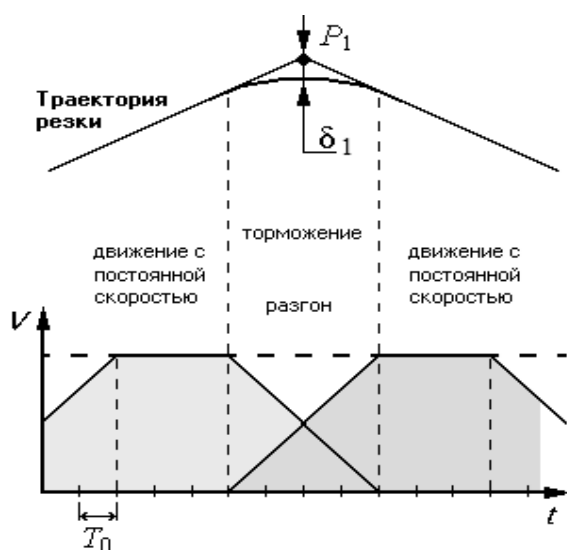
членениях манипулятора.

Применением преобразования (10) для всех ранее полученных сегментов вдоль контура резки формируются траектории робота в пространстве обобщенных координат, соответствующие допустимым локациям режущего инструмента.

*Сглаживание траектории в окрестности узловых точек.* Движение режущего инструмента вдоль участка траектории обычно делится на три этапа: разгон, движение с постоянной скоростью и торможение, длительность которых привязана к параметру квантования  $T_0$ , обеспечиваемому системой управления роботом. Каждый этап выполняется за 2...4 такта квантования  $T_0$ , при этом при планировании траектории

роботизированной лазерной резки важно соблюсти «качество» стыковки двух сегментов. Стыковка может быть реализована путем остановки режущего инструмента в точке стыковки, однако вместе с тем происходит пережигание материала заготовки. Поэтому целесообразно обеспечить движение режущего инструмента с постоянной скоростью, причем при приближении к точке стыковки необходимо выполнить сглаживание траектории для плавного перехода на следующий участок. При этом режущий инструмент проходит на расстоянии  $\delta_1$  от точки стыковки (рис. 5, а), причем  $\delta_1$  увеличивается с ростом угла между прямолинейными участками траектории (рис. 5, б).

а)



б)

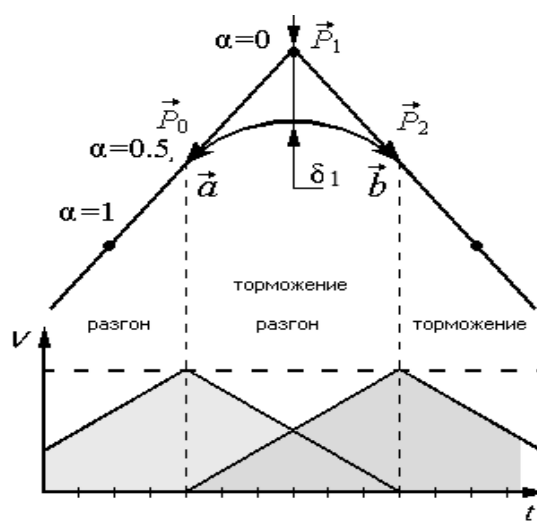


Рис. 5. Сопряжение сегментов траектории режущего инструмента

Современные системы управления роботами-манипуляторами позволяют достаточно эффективно реализовать сглаживание путем применения соответствующих программных инструкций. При этом на этапе планирования траектории лазерной резки необходимо определить минимально допустимую длину сегмента с учетом реальных ограничений системы управления.

Опишем два состыкованных прямолинейных сегмента векторами (см. рис. 5, б). При выполнении интерполяции траектории на каждом сегменте системой управления производится изменение параметра  $\alpha$ , причем в начальной точке сегмента этот параметр равен 1, а в конечной – 0. При сопряжении сегментов торможение на первом сегменте совмещено с разгоном на вто-

ром. Это позволяет обеспечить движение режущего инструмента в окрестности точки сопряжения сегментов. Тогда при движении без остановки в окрестности точки сопряжения результирующий вектор будет иметь вид:

$$\vec{P}_{0-2} = \alpha_1 \vec{P}_0 + (1 - \alpha_1) \vec{P}_1 + (1 - \alpha_2)(\vec{P}_2 - \vec{P}_1). \quad (11)$$

Выражение (11) можно перегруппировать относительно  $\vec{P}_1$ :

$$\vec{P}_1 - \vec{P}_2 = \alpha_1(\vec{P}_0 - \vec{P}_1) + (1 - \alpha_2)(\vec{P}_2 - \vec{P}_1). \quad (12)$$

Зависимости величины параметра  $\alpha$  от времени при торможении и разгоне имеют вид:

$$\alpha_1(t) = a(t - \tau)^2; \quad \alpha_2(t) = bt^2, \quad (13)$$

где  $t$  – время;  $a, b$  – коэффициенты;  $\tau$  – конечное значение времени на интервале разгона и торможения.

Тогда на интервале времени  $t \in [0, \tau]$

отклонение траектории определяется по формуле

$$\vec{P} - \vec{P}_1 = \alpha_1(P_0 - P_1) + \alpha_2(P_2 - P_1) = \alpha(t - \tau)^2 \vec{P}_{0-1} + bt^2 \vec{P}_{2-1}. \quad (14)$$

При равенстве пути разгона и пути торможения ( $a = b$ ) и  $t = \tau/2$  в точке стыковки сегментов величина отклонения

$$\vec{P} - \vec{P}_1 = a \frac{1}{4} \tau^2 \vec{P}_{0-1} + a \frac{1}{4} \tau^2 \vec{P}_{2-1}. \quad (15)$$

Каждое слагаемое выражения (15) равно  $S_P/4$ , где  $S_P$  – длина участка траектории, на которой происходит разгон режущего инструмента (рис. 6). Тогда максимальную величину отклонения  $\delta_1$  можно определить как

$$\delta_1 = 2 \frac{S_T}{4} \sin\left(90^\circ - \frac{\alpha}{2}\right) = \frac{S_T}{2} \cos \frac{\alpha}{2}, \quad (16)$$

где  $S_T$  – длина участка траектории, на которой происходит торможение режущего инструмента.

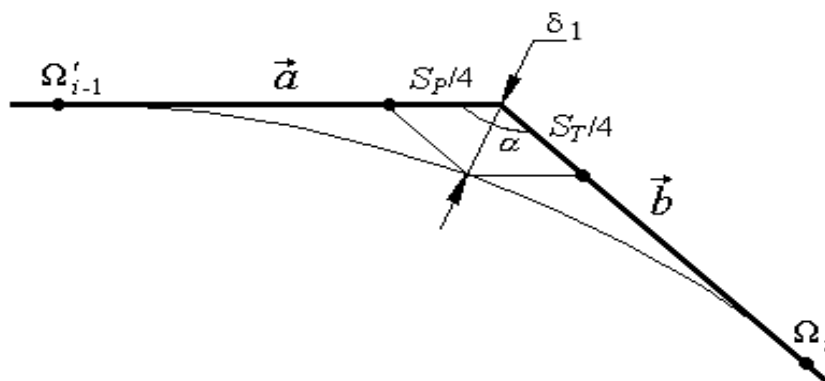


Рис. 6. Искажение траектории лазерной резки в точках сопряжения сегментов

Длительность участков разгона и торможения должна соответствовать ограничениям по скорости и ускорению

$$|\dot{s}(t)| \leq \dot{s}_{\max}; \quad |\ddot{s}(t)| \leq \ddot{s}_{\max},$$

$$|\dot{q}_i(t)| \leq \dot{q}_{i \max}; \quad |q_i(t)| \leq \ddot{q}_{i \max}; \quad i = 1 \dots 6, \quad (17)$$

где  $s(t)$  – закон движения рабочей точки режущего инструмента;  $q(t)$  – обобщенные координаты робота-манипулятора.

Ограничения (17) можно записать в виде

$$\tau \geq \max \left\{ \frac{\Delta s}{\dot{s}_{\max}}; \frac{\Delta q_1}{\dot{q}_{1\max}}; \frac{\Delta q_2}{\dot{q}_{2\max}}; \dots; \frac{\Delta q_6}{\dot{q}_{6\max}} \right\}. \quad (18)$$

Если  $(x^S y^S z^S)$  и  $(x^E y^E z^E)$  – координаты начальной и конечной точек участка разгона (торможения), то  $(q_1^S q_2^S \dots q_6^S)$  и  $(q_1^E q_2^E \dots q_6^E)$  – обобщенные координаты, соответствующие начальной и конечной точкам участка разгона (торможения).

$$\Delta s = \sqrt{(x^S - x^E)^2 + (y^S - y^E)^2 + (z^S - z^E)^2};$$

$$\Delta q = |q_i^S - q_i^E|. \quad (19)$$

При этом минимальная величина  $\tau$  ограничена количеством тактов квантования системы управления

$$\tau \geq n_{\min} \cdot T_0, \quad (20)$$

где  $n_{\min} = 2 \dots 4$ .

Тогда с учетом ограничений (18) и (20) выражение для определения минимальной длины сегмента будет иметь вид:

$$\Delta s_{\min} = \dot{s} T_0 \times$$

$$\times \max \left[ n_{\min}, 1 + \text{int} \left( \frac{\dot{s}_{\max}}{T_0 \cdot \dot{s}_{\max}} \right) \right]. \quad (21)$$

### Выводы

Разработаны новые эффективные методы и алгоритмы для планирования траекторий роботов-манипуляторов в технологическом процессе лазерной резки. Предложенный метод планирования траектории обеспечивает сегментацию контура движения режущего инструмента линейными и дугowymi участками, поиск допустимых локаций работа-манипулятора и сглаживание траектории с учетом ограничений системы управления. Приведенные алгоритмы позволяют учесть реализацию системой управления роботом команд движения по линейным и круговым сегментам. Разработанные методы и алгоритмы могут быть применены при создании интеллектуальных систем управления промышленными роботизированными технологическими комплексами для высокоскоростной лазерной резки.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Dolgui, A.** Multiobjective optimisation of robot motion for laser cutting application / A. Dolgui, A. Pashkevich, O. Chumakov // International Journal Of Computer Integrated Manufacturing. – Taylor and Francis, London. – 2004. – Vol. 17, № 2. – P. 171–183.
2. **Dolgui, A.** Manipulator motion planning for high speed robotic laser cutting / A. Dolgui, A. Pashkevich // International Journal of Production Research. – Taylor and Francis, London. – 2009. – Vol. 47, № 20. – P. 5691–5715.
3. **Moharana, B.** Optimization and Design of a Laser-Cutting Machine using Delta Robot / B. Moharana, R. Gupta, B. K. Kushawaha // International Journal of Engineering Trends and Technology. – 2014. – Vol. 10, № 4. – P. 176–179.
4. **Dolgui, A.** Manufacturing process planning for laser cutting robotic systems / A. Dolgui, A. Pashkevich // Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control Seoul, Korea, July 6–11, 2008. – P. 14822–14827.
5. **Кожевников, М. М.** Планирование оптимальных траекторий промышленных роботов-манипуляторов на основе статистических моделей конфигурационного пространства / М. М. Кожевников, О. А. Чумаков, И. Э. Илюшин // Информационные технологии и системы: материалы Междунар. науч. конф. – Минск: БГУИР, 2013. – С. 58–59.

Статья сдана в редакцию 20 марта 2019 года

**Михаил Михайлович Кожевников**, канд. техн. наук, Могилевский государственный университет продовольствия. Тел.: +375-222-64-96-76.

**Олег Анатольевич Чумаков**, канд. техн. наук, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. Тел.: +375-172-93-86-73.

**Владимир Михайлович Шеменков**, канд. техн. наук, Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-222-23-02-53.

**Игорь Эдуардович Илюшин**, Могилевский государственный университет продовольствия. Тел.: +375-222-64-96-76.

**Mikhail Mikhailovich Kozhevnikov**, PhD (Engineering), Mogilev State University of Food Technologies. Phone: +375-222-64-96-76.

**Oleg Anatolievich Chumakov**, PhD (Engineering), Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. Phone: +375-172-93-86-73.

**Vladimir Mikhailovich Shemenkov**, PhD (Engineering), Belarusian-Russian University. Phone: +375-222-23-02-53.

**Igor Eduardovich Pushin**, Mogilev State University of Food Technologies. Phone: +375-222-64-96-76.

---

---

УДК 621.791.763.2

*А. О. Коротеев, Е. А. Фетисова, В. П. Куликов*

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДУГОВОЙ СВАРКИ С ДВУХСТРУЙНОЙ КООКСИАЛЬНОЙ ПОДАЧЕЙ КОМПОНЕНТОВ ЗАЩИТНОЙ ГАЗОВОЙ СРЕДЫ

---

UDC 621.791.763.2

*A. O. Koroteyev, E. A. Fetisova, V. P. Kulikov*

## TECHNOLOGICAL CHARACTERISTICS OF ARC WELDING WITH DOUBLE-JET COAXIAL SUPPLY OF PROTECTIVE GAS MEDIUM COMPONENTS

### **Аннотация**

Исследованы технологические характеристики способа дуговой сварки с двухструйной коаксиальной подачей компонентов защитной газовой среды в зону горения дуги. Определены основные факторы, влияющие на частоту и характер переноса электродного металла. Даны рекомендации по выбору значенных параметров режима и областям эффективного применения предлагаемой технологии.

### **Ключевые слова:**

технологические характеристики, перенос электродного металла, двухструйная газовая защита, коаксиальная подача газов в зону сварки, газовые смеси.

### **Abstract**

Technological characteristics of the process of arc welding with a two-jet coaxial feed of components of protective gas medium into the arc burning zone have been investigated. The main factors affecting the frequency and the nature of the electrode metal transfer have been determined. Recommendations for choosing the values of welding parameters are given, as well as the areas of effective application of the proposed technology.

### **Keywords:**

technological characteristics, transfer of electrode metal, double-jet gas protection, coaxial gas supply to the welding zone, gas mixtures.

---

Дуговая сварка в среде защитных газов является самым распространенным способом, применяемым на предприятиях Республики Беларусь. В последнее время все большее количество предприятий переходит на использование для защиты зоны горения дуги и сварочной ванны вместо углекислого газа смесей на основе аргона ( $Ar + CO_2$ ). Главная причина такого перехода связана с повышением требований, предъявляемых к сварным конструкциям, а также распространением сталей, сплавов и сварочных присадочных материа-

лов зарубежного производства со сложными системами легирования и микролегирования, для которых использование чистого углекислого газа в качестве защитного при сварке является нецелесообразным вследствие окислительных реакций в зоне сварочной ванны.

Преимущества применения смесей на основе аргона заключаются в первую очередь в повышении ударной вязкости металла шва сварного соединения и его пластичности, а также снижении потерь электродного металла на разбрызгивание, обусловленном уменьшением раз-

меров капле электродного металла [1].

В общем случае, рассматривая строение защитной атмосферы при сварке, можно выделить несколько зон: зону плавления электродной проволоки, зону столба дуги, зону сварочной ванны и периферийное пространство (рис. 1). В каждой из этих зон происходят различные по своему характеру процессы, для которых наиболее эффективной является газовая среда с различным соотношением компонентов.

Для плавления сварочной проволоки, например, наиболее эффективной по ряду показателей является защитная газовая смесь с содержанием углекислого газа около 5...10 %. Такой состав будет способствовать снижению силы поверхностного натяжения расплавленного металла капли и уменьшению её размеров в связи с меньшим временем пребывания на торце электродной проволоки. Для столба дуги количество углекислого газа можно несколько увеличить по сравнению с областью плавления проволоки, что будет приводить к некоторому его сжатию и стабилизации в пространстве. Область сварочной ванны защищается традиционной смесью, состоящей из 82 % Ar и 18 % CO<sub>2</sub>.

При этом наличие аргона в пери-

ферийной части защитной газовой атмосферы, выполняющей исключительно защитную функцию вытеснения воздуха, является необязательным.

Таким образом, создание различной по своему составу защитной атмосферы в различных зонах позволит максимально эффективно использовать технологические особенности и процессы, в них происходящие. Кроме того, это даст возможность существенно снизить суммарный расход аргона в смеси Ar + CO<sub>2</sub> как наиболее дорогостоящего компонента, формирующего высокую конечную стоимость.

Одним из перспективных направлений развития способа, позволяющим не только преодолеть этот недостаток, но и существенно изменить технологические характеристики процесса, является реализация независимой коаксиальной подачи компонентов газовой защитной среды в зону сварки (рис. 2). Ранее была установлена целесообразность и эффективность такого способа [2–5]. Далее будут приведены результаты исследований технологических характеристик и, в частности, характера плавления присадочной проволоки и переноса электродного металла через дуговой промежуток в сварочную ванну.

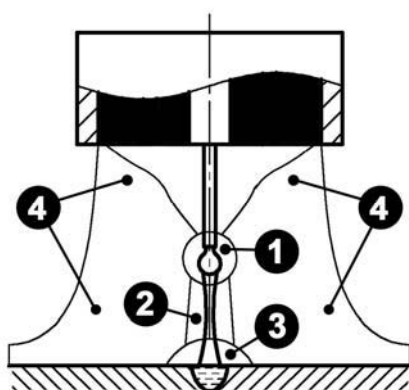


Рис. 1. Строение защитной газовой атмосферы при сварке по традиционной технологии: 1 – область плавления электродной проволоки; 2 – область столба дуги; 3 – область сварочной ванны; 4 – периферийное пространство

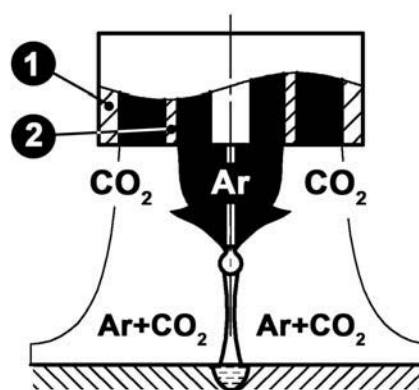


Рис. 2. Строение защитной газовой атмосферы при сварке по традиционной технологии: 1 – наружный кольцевой канал сопла сварочной горелки (для подачи углекислого газа); 2 – внутренний канал сопла горелки (для подачи аргона)

Как правило, разделяют четыре основных вида переноса электродного металла при сварке: перенос с короткими замыканиями дугового промежутка, крупнокапельный, мелкокапельный и так называемый струйный перенос. Каждый из указанных видов характеризуется своими особенностями, областью существования, потерями на разбрызгивание, воздействием на жидкую сварочную ванну и формирующийся сварной шов. Наилучшим считается струйный и мелкокапельный перенос, при котором потери электродного металла минимальны, происходит хорошее формирование шва, отсутствует грубая чешуйчатость его поверхности.

В свою очередь характер переноса электродного металла зависит от множества факторов, не последнюю роль в числе которых играет состав защитной газовой среды. В связи с этим представляют интерес исследования, позволяющие установить, как влияет двухструйная газовая защита на характер переноса электродного металла.

Как указывалось ранее, при использовании предлагаемой технологии реализации газовой защиты состав образующейся смеси  $Ar + CO_2$  формируется путем смешивания инертного ( $Ar$ ) и активного ( $CO_2$ ) газов в зоне горения дуги в отличие от традиционного варианта подачи в зону сварки смеси этих газов стабильного состава. Причем по вертикальной оси данный состав будет различен. С удалением от среза сопла количество  $Ar$  в составе образующейся смеси будет уменьшаться от 100-процентной концентрации до некоторого значения, обусловленного расходом газов, а также расстоянием от сопла до поверхности свариваемого изделия.

Наиболее информативным показателем при изучении характера переноса электродного металла является его частота, которая позволяет косвенно судить о размере капель. Для исследования характера горения дуги и переноса электродного металла в условиях двух-

струйной газовой защиты применялся метод осциллографирования электрических параметров режима в процессе наплавки в автоматическом режиме одиночного валика на пластину. По характерным участкам осциллограмм, обладающих наибольшей стабильностью процесса, фиксировались пиковые значения силы тока и напряжения на дуге, соответствующие отрыву капли электродного металла либо короткому замыканию дугового промежутка. По полученным данным строились зависимости частоты отрыва капель от силы сварочного тока и напряжения на дуге.

Наплавка осуществлялась с использованием сварочного полуавтомата FRONIUS TransSteel 3500. Для стабилизации вылета электродной проволоки и поддержания постоянства скорости наплавки горелка фиксировалась на тракторе сварочного автомата. Таким образом, процесс осуществлялся в автоматическом режиме. Расход газов перед их подачей в соответствующие каналы сопла контролировался при помощи поплавковых ротаметров. Задание значений параметров режима наплавки осуществлялось непосредственно через панель управления сварочным аппаратом, а их фактические величины фиксировались при помощи регистратора сварочных процессов РДКП -0401.

Внешний вид образцов с наплавленными валиками представлен на рис. 3. Напряжение на дуге при проведении экспериментов изменялось в диапазоне значений от 15 до 28 В в зависимости от силы сварочного тока.

Анализируя полученные результаты, следует отметить, что при наплавке со значениями напряжения на дуге ( $U_d \leq 15$  В) наблюдаются длительные короткие замыкания дугового промежутка. Это способствует возрастанию потерь электродного металла на разбрызгивание. Валик наплавленного металла не является сплошным, а представляет собой цепочку отдельных закристаллизовавшихся объемов с выраженными



участками длительных коротких замыканий между ними (см. рис. 3, б). При наплавке со значением напряжения дуги ( $U_d \geq 28$  В) её длина, а также время образования и роста капли на торце электродной проволоки увеличиваются.

В случае использования относительно малых значений силы сварочного тока (до 150 А), это будет приводить к формированию валика из отдельных капель порционно, и его поверхность будет приобретать чешуйчатый вид (см. рис. 3, в).

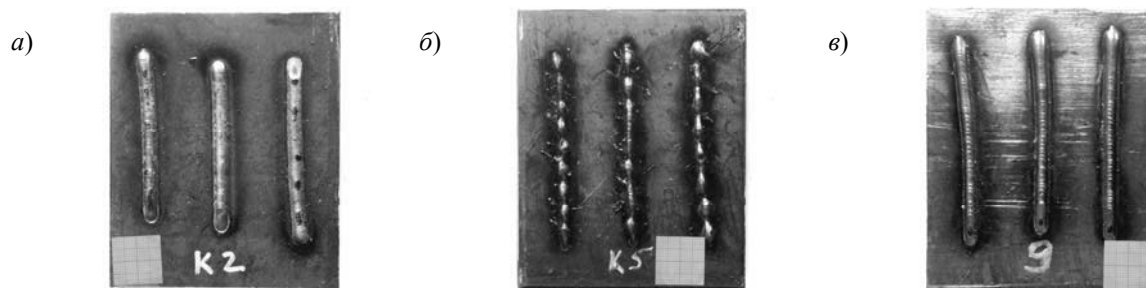


Рис. 3. Внешний вид образцов после наплавки: а –  $I_{св} = 100$  А;  $U_d = 19$  В; б –  $I_{св} = 100$  А;  $U_d = 15$  В (наплавка с низким напряжением на дуге); в –  $I_{св} = 100$  А;  $U_d = 28$  В (наплавка с крупнокапельным переносом электродного металла)

По результатам экспериментов получены осциллограммы изменения силы сварочного тока и напряжения на дуге. В качестве примера на рис. 4 и 5 представлен внешний вид осциллограмм для силы сварочного тока 150 А. Осциллограммы имеют характерный вид с повторяющимися циклами между отдельными пиковыми значениями силы тока и напряжения на дуге. Время такого цикла  $t_{ц}$  состоит из времени короткого замыкания и времени горения дуги и роста капли расплавленного металла на торце проволоки. При этом необходимо отметить, что в случаях наплавки по традиционной технологии с использованием струйной защиты смесью 82 % Ar + 18 % CO<sub>2</sub> и с двухструйной подачей компонентов защитной газовой среды, последняя характеризуется существенно меньшим значением времени цикла  $t_{ц}$  (рис. 6).

На рис. 7 изображены графики и зависимости частоты переноса электродного металла  $f_n$  от напряжения на дуге  $U_d$ . Анализ полученных данных показал, что при наплавке с двухструйной подачей газов в зону горения дуги частота переноса электродного металла при малых зна-

чениях силы тока выше в 1,5...2 раза (кривая 1, рис. 7, б). Этот диапазон значений соответствует переносу с короткими замыканиями дугового промежутка. Вместе с тем частота коротких замыканий оказывает непосредственное влияние на стабильность процесса и размер капель электродного металла, переходящих в сварочную ванну.

Повышение частоты переноса, вероятно, связано с особенностями формирования защитной атмосферы дуги и направлением газовых потоков, в результате чего восходящий турбулентный вихрь образующейся защитной газовой смеси оказывает газодинамическое воздействие на процесс плавления проволоки электродного металла, а также перераспределение теплоты в области столба дуги. При возрастании значения силы сварочного тока и, как следствие, напряжения на дуге перенос становится капельным. При этом длина дуги увеличивается. В данных условиях напряжение оказывает большее влияние на частоту переноса при двухструйной подаче газов (кривые 2, 3 и 4, рис. 7, б имеют больший угол наклона к горизонтальной оси координат). Это объяс-

няется неоднородностью атмосферы по вертикальной оси, связанной с турбулентным взаимодействием и смешива-

нием двух газовых потоков аргона и углекислого газа (рис. 8).

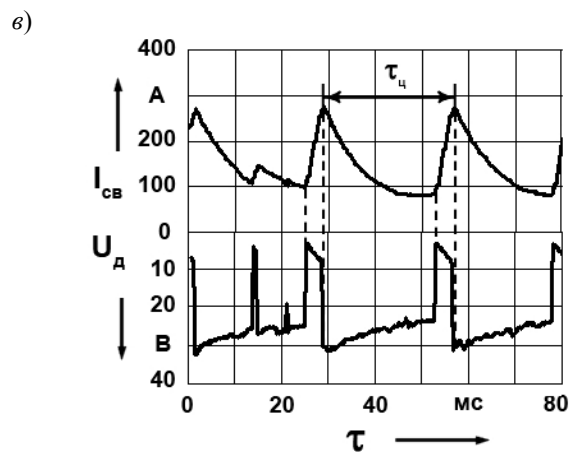
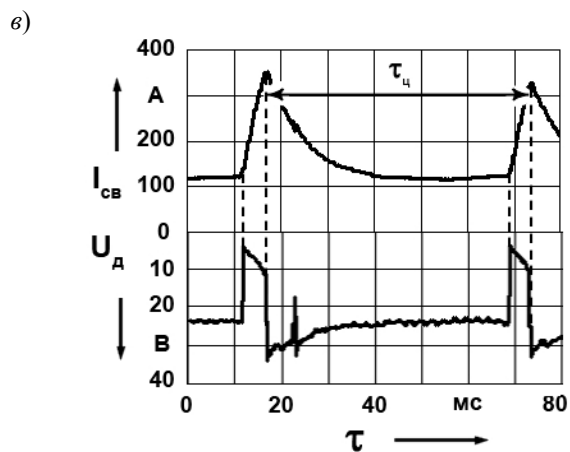
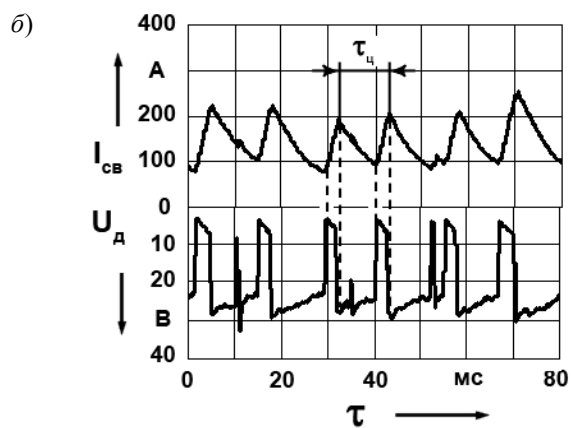
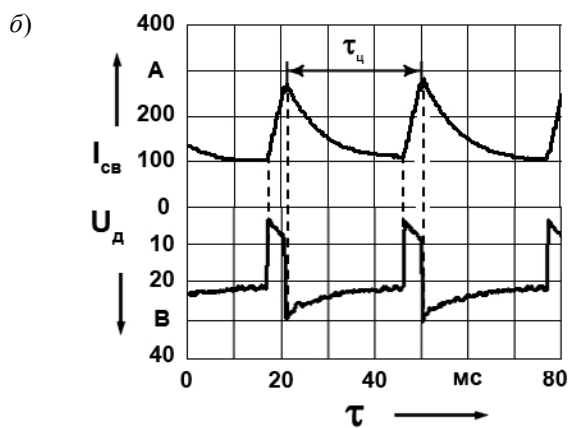
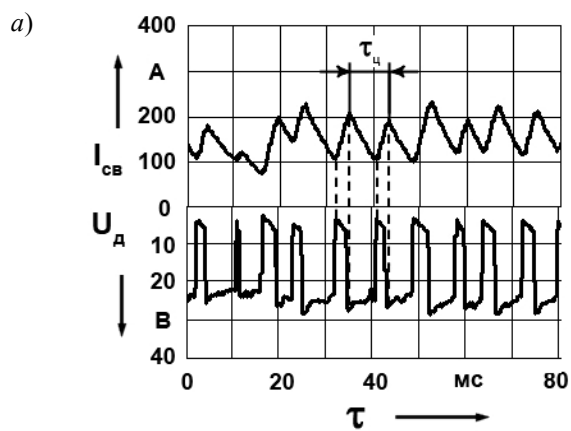
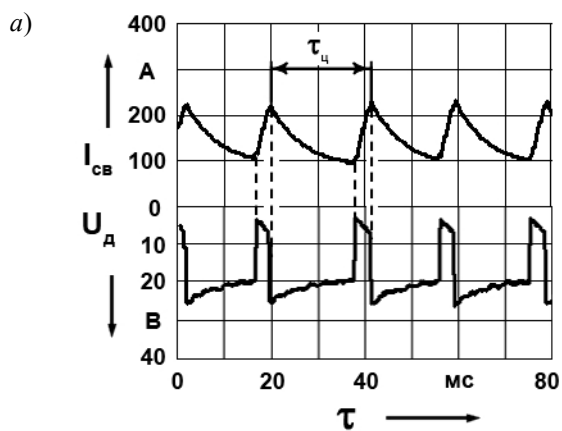


Рис. 4. Осциллограммы значений силы тока  $I_{св}$  и напряжения на дуге  $U_d$  при наплавке по традиционной технологии: а -  $U_d = 18$  В; б -  $U_d = 20$  В; в -  $U_d = 22$  В

Рис. 5. Осциллограммы значений силы тока  $I_{св}$  и напряжения на дуге  $U_d$  при наплавке с двухструйной подачей газов в зону горения дуги: а -  $U_d = 18$  В; б -  $U_d = 20$  В; в -  $U_d = 22$  В

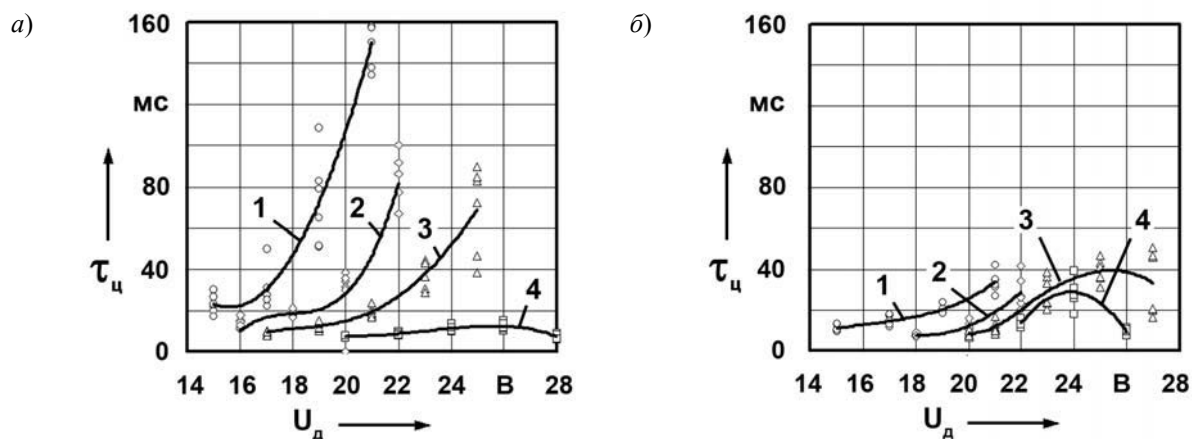


Рис. 6. Длительность цикла между короткими замыканиями и переходами капель через дуговой промежуток: *a* – традиционная технология газовой защиты; *б* – двухструйная подача защитных газов в зону горения дуги; 1 –  $I_{cb} = 100$  А; 2 –  $I_{cb} = 150$  А; 3 –  $I_{cb} = 200$  А; 4 –  $I_{cb} = 250$  А

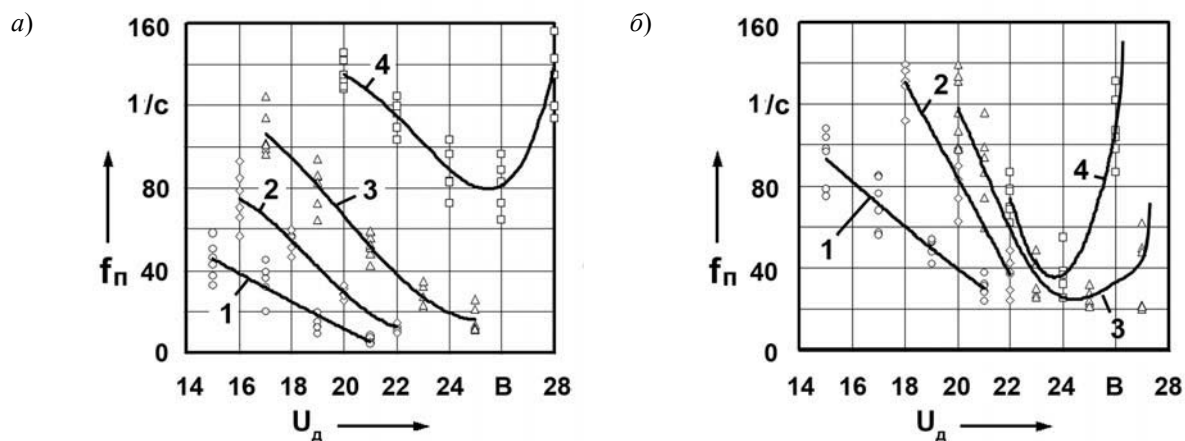


Рис. 7. Частота переноса капель электродного металла в зависимости от напряжения на дуге  $U_d$  и силы тока  $I_{cb}$ : *a* – традиционная технология газовой защиты; *б* – двухструйная подача защитных газов в зону горения дуги; 1 –  $I_{cb} = 100$  А; 2 –  $I_{cb} = 150$  А; 3 –  $I_{cb} = 200$  А; 4 –  $I_{cb} = 250$  А

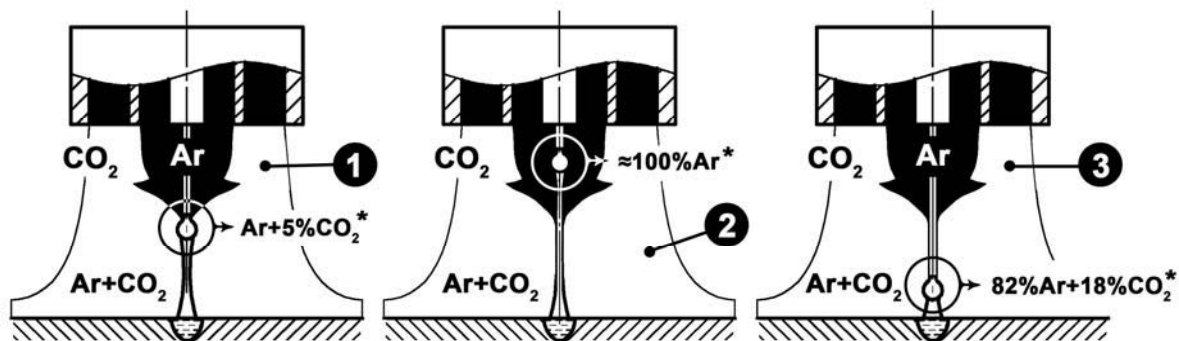


Рис. 8. Изменение состава защитной атмосферы в области торца плавящейся электродной проволоки при изменении длины дуги (\* – состав газа указан ориентировочно): 1 – сварка на средней длине дуги (оптимальное соотношение между значением напряжения и силой сварочного тока); 2 – сварка с повышенным напряжением на дуге; 3 – сварка с напряжением на дуге, существенно меньшим оптимального значения

Кривые 3 и 4, соответствующие значениям силы сварочного тока 200 и 250 А, имеют характерный участок с резким повышением частоты в области напряжений 24...26 В. Данный участок графиков свидетельствует о переходе к струйному переносу электродного металла, при котором капли имеют настолько малый размер, что визуально объединяются в сплошную непрерывную струю. При этом кривая 4, соответствующая значению силы тока 250 А, характеризуется меньшей частотой, чем при сварке по традиционной технологии, однако переход к струйному переносу наблюдается при меньших значениях напряжения на дуге (24 и 27 В для токов 250 и 270 А соответственно).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что изменение напряжения, например, его возрастание,

будет приводить к тому, что характер плавления проволоки будет изменяться и становиться похожим на сварку в защитных смесях с большим количеством аргона либо в чистом аргоне (кривая 2, рис. 8). Это обусловлено повышением содержания аргона в защитной атмосфере при увеличении расстояния от поверхности изделия, что позволяет получить струйный перенос на меньших критических значениях силы тока и может быть использовано в некоторых случаях на практике.

Анализируя полученные данные, были определены области оптимальных значений параметров режима для процесса наплавки и сварки с двухструйной подачей защитного газа в зону горения дуги и традиционного способа сварки в среде 82 % Ar + 18 % CO<sub>2</sub> (рис. 9).

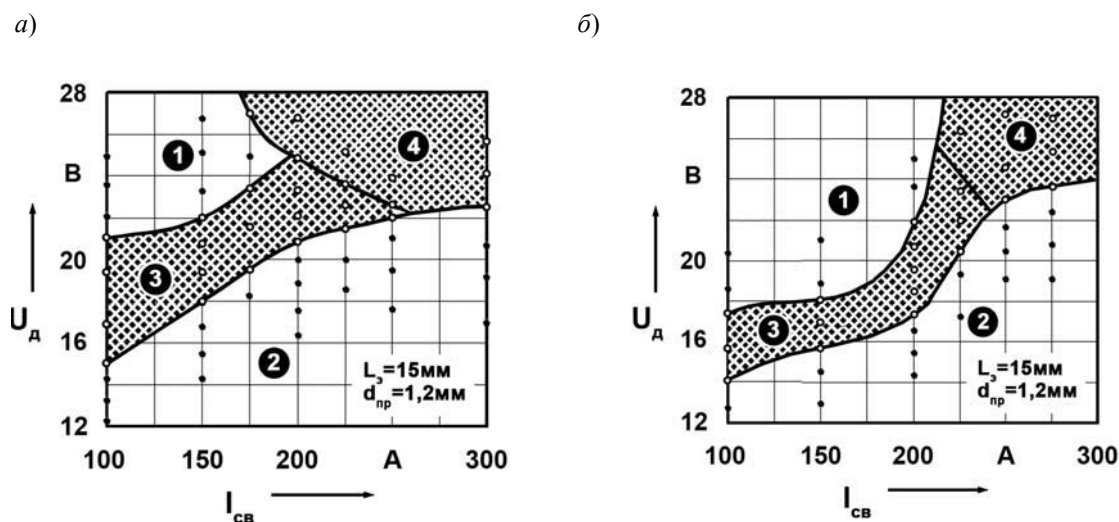


Рис. 9. Области оптимальных значений параметров режима сварки: *а* – сварка с двухструйной подачей защитных газов в зону горения дуги; *б* – сварка с использованием традиционной технологии газовой защиты смесью 82 % Ar + 18 % CO<sub>2</sub> ( $L_s = 12...15$  мм); 1 – область крупнокапельного переноса электродного металла (нестабильное горение дуги); 2 – область обрыва дуги вследствие длительных коротких замыканий дугового промежутка; 3 – область оптимальных значений параметров режима; 4 – область струйного переноса электродного металла

Полученные результаты показали, что для предлагаемой технологии рекомендуется несколько повысить напряжение в области значений силы тока 100...200 А по сравнению с традиционной. Вместе с тем использование двухструйной коаксиальной подачи га-

зов в зону горения дуги позволяет существенно расширить диапазон регулирования значений напряжения и сдвинуть область перехода к струйному характеру переноса электродного металла к более низким значениям критической силы сварочного тока.

На графиках имеется по несколько областей, характеризующихся различными условиями горения дуги и технологическими особенностями переноса электродного металла. Области 1 и 2 на рис. 9 являются диапазонами значений параметров режима с нестабильным горением дуги, её частыми обрывами вследствие коротких замыканий либо возмущений из-за крупнокапельного переноса металла. Области 3 и 4 – диапазоны оптимальных значений параметров режима, характеризующихся наибольшей стабильностью процесса. Область 4 соответствует струйному переносу электродного металла. При этом повышение значения напряжения не приводит к снижению стабильности горения дуги, но в то же время является нежелательным, т. к. процесс сварки трудноконтролируемый, особенно при небольших (12...14 мм) расстояниях от поверхности изделия до сопла сварочной горелки. Валик наплавленного металла имеет достаточно большую ширину, и тепло дуги используется менее эффективно.

Необходимо также отметить, что струйный характер переноса электродного металла можно наблюдать и на токах 170 А, что существенно меньше критического значения силы тока струйного переноса (225...250 А). Это становится возможным благодаря большим значениям напряжения на дуге. Однако такой процесс нельзя назвать стабильным, т. к. незначительные возмущения приводят к изменению характера плавления проволоки и образованию крупных капель электродного металла с последующим ростом потерь на разбрызгивание.

В результате проведенных исследований определены оптимальные значения параметров режима сварки с точки зрения стабильности процесса горения дуги, а также переноса электродного металла. При двухструйной газовой защите переход к струйному переносу наблюдается при меньших токах, что

расширяет диапазон благоприятных значений параметров режима сварки. Это объясняется повышением содержания аргона в защитной газовой среде вблизи торца плавящейся электродной проволоки при увеличении длины дуги. Причем атмосфера, в которой образуются капли электродного металла, становится более инертной. На достаточно больших токах (более 170...200 А) характер распределения действующих на каплю сил становится таким, что равнодействующая сила направлена вертикально вниз. Данное распределение обусловлено снижением степени сжатия дуги в связи с уменьшением интенсивного теплоотвода, основной причиной которого являются эндотермические процессы диссоциации  $\text{CO}_2$ . Величина направленной вертикально вверх реакционной силы давления столба дуги, затрудняющей отрыв капель электродного металла, снижается. Таким образом, более инертная смесь с этой точки зрения является предпочтительной и способствует созданию условий для возникновения струйного переноса электродного металла при сварке и наплавке на токах, значительно меньших критического тока струйного переноса в случае использования в качестве газовой защиты смесей 82 % Ar + 18 %  $\text{CO}_2$ , традиционно подаваемых в зону горения дуги.

### **Выводы**

1. В области значений напряжения на дуге 14...28 В процесс сварки с двухструйной коаксиальной подачей компонентов защитной газовой среды характеризуется в 1,5...2 раза большей частотой переноса электродного металла по сравнению с традиционной технологией, что объясняется изменением условий плавления присадочной проволоки и неравномерным соотношением компонентов смеси Ar +  $\text{CO}_2$  по вертикальной оси потока газа. Состав защитной среды в области образования капли ме-

талла на торце проволоки при этом будет сильно зависеть от напряжения на дуге, регулируя которое, можно воздействовать на характер её плавления.

2. При сварке с двухструйной подачей защитных газов происходит уменьшение значений критической силы сварочного тока, при которой наблюдается переход к струйному переносу электродного металла. Это объясняется снижением количества  $\text{CO}_2$

в анодной части дуги и степени её сжатия, происходящего из-за эндотермической реакции диссоциации углекислого газа. Таким образом, двухструйная коаксиальная подача защитных газов обеспечивает более широкий диапазон значений токов для струйного характера переноса электродного металла, характеризующегося минимальными потерями металла на разбрызгивание.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Куликов, В. П.** Технология сварки плавлением и термической резки: учебник / В. П. Куликов. – Минск: Новое знание; Москва: ИНФРА-М, 2016. – 463 с.: ил.
2. **Коротеев, А. О.** Особенности реализации кольцевого способа подачи защитного газа в зону горения дуги при сварке / А. О. Коротеев, В. П. Куликов, М. А. Кадров // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2014. – № 1. – С. 23–31.
3. **Коротеев, А. О.** О потерях электродного металла при дуговой сварке в условиях комбинированной газовой защиты / А. О. Коротеев, В. П. Куликов, М. А. Кадров // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2014. – № 3. – С. 25–34.
4. **Коротеев, А. О.** Моделирование газодинамических процессов в защитной атмосфере дуги при сварке в смеси коаксиально подаваемых газов / А. О. Коротеев, В. П. Куликов, В. П. Долячко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2017. – № 3. – С. 54–64.
5. **Коротеев, А. О.** Особенности выбора сварочных проволок при дуговой сварке в среде  $\text{Ar} + \text{CO}_2$  с двухструйной коаксиальной подачей защитных газов в зону горения дуги / А. О. Коротеев, В. П. Куликов, В. П. Долячко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2017. – № 3. – С. 65–73.

*Статья сдана в редакцию 20 марта 2019 года*

**Артур Олегович Коротеев**, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.  
**Екатерина Анатольевна Фетисова**, инженер, Белорусско-Российский университет.  
**Валерий Петрович Куликов**, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет.

**Artur Olegovich Koroteyev**, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.  
**Ekaterina Anatolyevna Fetisova**, engineer, Belarusian-Russian University.  
**Valery Petrovich Kulikov**, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University.

---

УДК 621.83.06

*Е. С. Лустенкова, Я. Н. Метелица, А. Н. Моисеенко*

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СФЕРИЧЕСКИХ РОЛИКОВЫХ ПЕРЕДАЧ С РАЗЛИЧНЫМИ ПРОФИЛЯМИ БЕГОВЫХ ДОРОЖЕК

---

UDC 621.83.06

*E. S. Lustenkova, Y. N. Metelitsa, A. N. Moiseenko*

## COMPARATIVE ANALYSIS OF SPHERICAL ROLLER TRANSMISSIONS WITH DIFFERENT PROFILES OF RACEWAYS

---

### Аннотация

Рассмотрены вопросы проектирования и компьютерного моделирования сферических роликовых передач в системе NX, а также структура, конструкция, основные геометрические и кинематические параметры сферической роликовой передачи с двухрядным сателлитом. Приведена компьютерная модель исследуемой передачи с цилиндрическими концами роликов и прямоугольным профилем беговых дорожек. Рассмотрены алгоритмы компьютерного моделирования замкнутых периодических беговых дорожек для малого числа периодов и большого с наличием самопересечений. Приведены результаты силового анализа для передач с роликами различных типов.

### Ключевые слова:

сферическая роликовая передача, сферический механизм, компьютерная модель, ролик, силовой анализ.

### Abstract

The article deals with the design and computer modeling of spherical roller transmissions in the NX system, as well as with the structure, design, basic geometric and kinematic parameters of spherical roller transmissions with a two-row satellite. A computer model of the studied transmission with cylindrically-shaped ends of rollers and a rectangular profile of raceways is presented. Algorithms are considered for computer simulation of closed periodic raceways for a small number of periods, as well as for a large number in presence of self-intersections. The results of force analysis for transmissions with rollers of various types are given.

### Keywords:

spherical roller transmission, spherical mechanism, computer model, roller, force analysis.

---

### *Введение и постановка задачи*

С помощью сферических роликовых передач (СРП) с двухрядным сателлитом можно получить значительную редукцию скорости вращения и увеличение вращающего момента при малых габаритах передаточного устройства, что востребовано в приводах точных перемещений, следящих систем, поворотных устройств и др. СРП обеспечивают реализацию широкого диапазона передаточных отношений (2...200) для силовых приводов. Разработан ряд экс-

периментальных образцов редукторных передач с максимальным диаметром корпуса, не превышающим 200 мм [1]. Они нашли применение в качестве усилителей момента механизированного инструмента [2], а также в механизмах с пересекающимися осями валов [3]. В отличие от передач известных типов, имеющих аналогичные области применения (планетарных зубчатых передач с двухвенцовым сателлитом, червячных и волновых, а также прецессионных зубчатых передач), СРП с двухрядным сателлитом более технологичны в изго-

товлении, уравновешены и обеспечивают большой коэффициент перекрытия. По отношению массы редуктора к передаваемому вращающему моменту их можно отнести к передачам высокого технического уровня. В рассматриваемых передачах отсутствуют детали из дорогостоящих материалов, в отличие от червячных передач. Большинство деталей изготавливаются на универсальном оборудовании. Корпуса передач имеют цилиндрическую форму, могут быть изготовлены на металлорежущих станках токарной группы без применения сварочных операций с последующей расточкой отверстий под подшипники.

В СРП ролики контактируют с поверхностями пространственных замкнутых периодических беговых дорожек, образованными рабочими поверхностями торцовых кулачков. Для повышения технологичности изготовления у разработанных СРП рабочие концы роликов были выполнены сферическими, для того чтобы кулачковые поверхности могли быть изготовлены сферическими фрезами на фрезерных станках с ЧПУ, широко применяемых на различных

производствах. Целью работы было определение характеристик передачи с роликами, имеющими цилиндрические рабочие поверхности, и их сравнительный анализ с ранее разработанными передачами по критериям контактной прочности и КПД на основе результатов компьютерного моделирования.

### **Конструкция и основные геометрические параметры СРП с двухрядным сателлитом**

Схема СРП показана на рис. 1. Передача содержит ведущий вал 1 с наклонным участком (кривошипом) 2. Этот наклон может обеспечиваться установкой эксцентриковой втулки на ведущий вал. С возможностью относительного вращения на кривошипе установлен составной сателлит 3. Сателлит содержит наружную 4 и внутреннюю 5 поверхности с отверстиями. Отверстия распределены равномерно. В эти отверстия установлены два ряда роликов 6 и 7. Ряд роликов 6 контактирует своими поверхностями сферической формы с замкнутой беговой дорожкой 8.

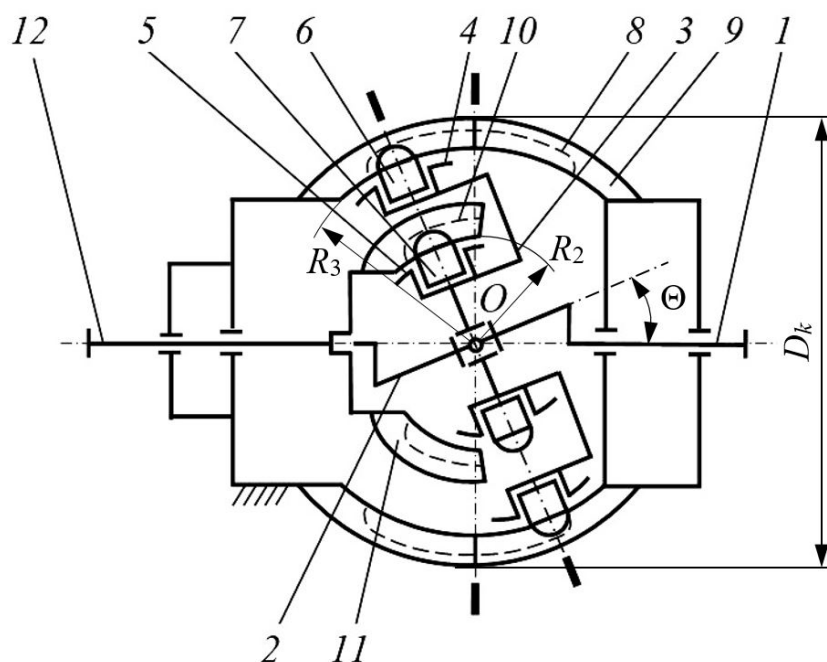


Рис. 1. Кинематическая схема сферической роликовой передачи с двухрядным сателлитом



Данная беговая дорожка образована двумя неподвижными сферическими кулачками, закрепленными в корпусе 9. Ряд роликов 7 контактирует своими сферическими поверхностями с беговой дорожкой 10 ведомого сферического кулачка 11, соединенного с ведомым валом.

У ведущего и ведомого валов общая ось вращения, которая является осью передачи. Оси всех роликов 6 и 7 лежат в одной плоскости. Проходящая через центр сферического движения  $O$  сателлита (его центр масс) плоскость является экваториальной плоскостью для всех сферических кулачков. Она перпендикулярна оси передачи.

К основным параметрам передачи относят радиусы сферических поверхностей (основных сфер)  $R_3$  и  $R_2$ , где располагаются центры сферических концов роликов первого и второго рядов соответственно, а также угол наклона кривошипа  $\Theta$ .

Рассматриваемая передача относится к передачам с промежуточными телами качения (ПТК), т. к. ролики,

установленные по переходным посадкам, могут вращаться в отверстиях сателлита относительно своих осей. При движении роликов по беговым дорожкам снижаются потери мощности, т. к. трение скольжения частично заменяется трением качения.

Передаточное отношение исследуемой СРП определяется числом периодов (волн)  $Z_3$  неподвижной беговой дорожки 8 и числом периодов  $Z_2$  беговой дорожки (кулачкового профиля) 10 сферического ведомого кулачка. Его можно вычислить по формуле

$$i = \frac{(Z_3 + 1) \cdot Z_2}{Z_2 - Z_3}. \quad (1)$$

На рис. 1 показана схема СРП с роликами, имеющими сферические консольные участки, контактирующие с беговыми дорожками. Рассмотрим компьютерную параметрическую модель передачи, разработанную в системе NX [4] (рис. 2).

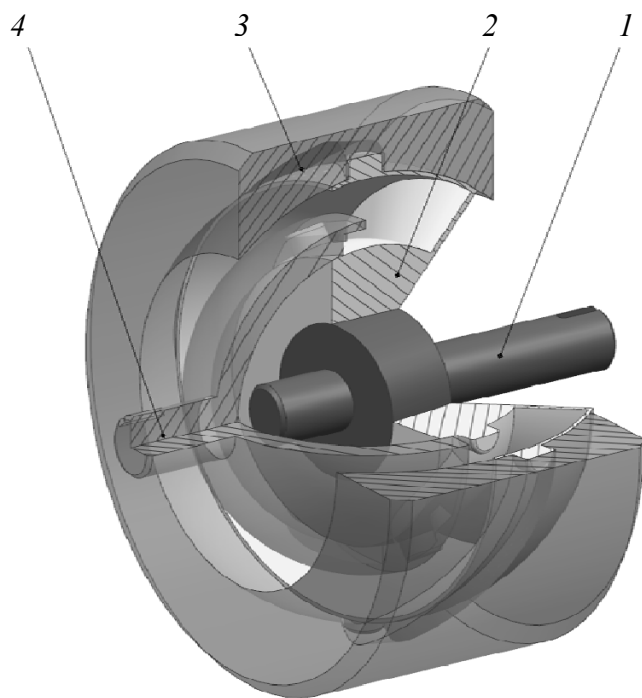


Рис. 2. Компьютерная модель сферической роликовой передачи с двухрядным сателлитом: 1 – ведущий вал; 2 – сателлит, совмещенный с телами качения; 3 – корпус; 4 – ведомый вал

В данной модели ролики имеют цилиндрические рабочие поверхности. Для последующего кинематического анализа модель передачи существенно упрощена, ролики смоделированы за одно целое с сателлитом как два ряда выступов.

### Сравнительный силовой анализ СРП с различными типами роликов

На основе уравнений кинестатики установлено, что в СРП с роликами

$$N_{m3} = \frac{T_2 \cdot K_{nsf} \cdot \cos(\psi)}{K_n \cdot K_{p3} \cdot (R_3 + 0,707 \cdot r_s) \cdot 10^{-3} \cdot n_{s3} \cdot \sin(\alpha_{m3} - \psi) \cdot \cos(\pi/4)}, \quad (2)$$

где  $T_2$  – вращающий момент на ведомом валу передачи, Н·м;  $K_{nsf}$  – коэффициент, учитывающий сферическую форму поверхности расположения центров выступающих участков роликов;  $K_n$  – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения нагрузки по телам качения и зависящий от степени точности изготовления передачи;  $K_{p3}$  – коэффициент, учитывающий тип замыкания высших пар (геометрического либо силового), т. е. количество роликов, одновременно

со сферическими концами действуют нормальные силы между телами качения и беговыми дорожками, значения которых определяют контактную прочность передачи [5].

При взаимодействии сферических концов роликов (рис. 3, а) с беговой дорожкой, образованной кулачками, закрепленными в корпусе, на каждый ролик действует усилие, описываемое уравнением

передающих нагрузку;  $R_3$  – радиус сферической поверхности, где располагаются центры сферических концов тел качения, мм;  $r_s$  – радиусы сферических концов роликов, мм;  $n_{s3}$  – число роликов, контактирующих с неподвижной беговой дорожкой;  $\alpha_{m3}$  – среднее значение угла подъема беговой дорожки при ее развертке на плоскость, рад;  $\psi$  – угол трения, равный  $\arctg(f)$ , где  $f$  – приведенный коэффициент трения.

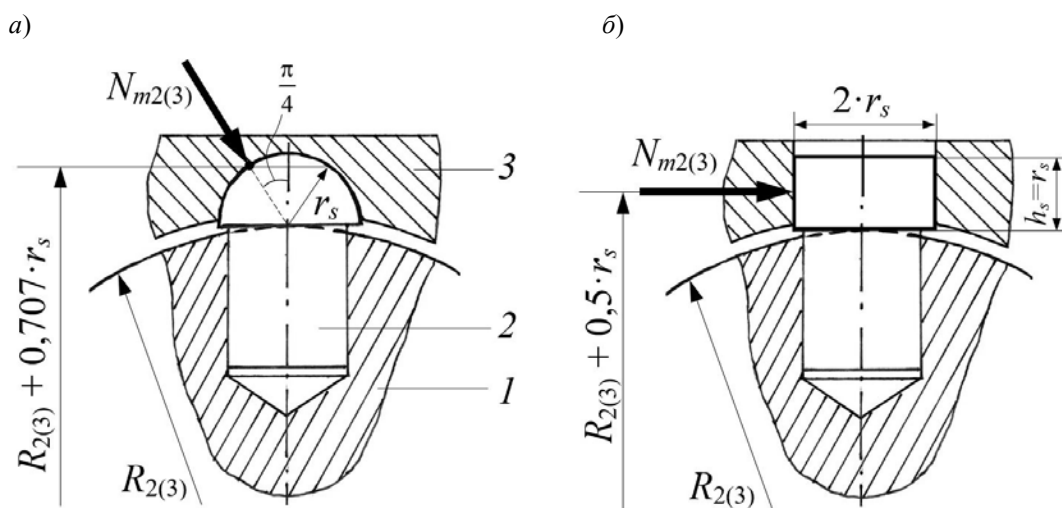


Рис. 3. Схема силового взаимодействия ролика и беговой дорожки: а – ролик со сферическим концом; б – ролик с цилиндрическим концом; 1 – сателлит; 2 – ролик; 3 – кулачки, образующие беговую дорожку

В контакте роликов и беговой дорожки, изготовленной на кулачке, со-

единенном с ведомым валом передачи, возникает усилие

$$N_{m2} = \frac{T_2 \cdot K_{nsf} \cdot \cos(\psi)}{K_n \cdot K_{p2} \cdot (R_2 + 0,707 \cdot r_s) \cdot 10^{-3} \cdot n_{s2} \cdot \sin(\alpha_{m2} + \psi) \cdot \cos(\pi/4)}, \quad (3)$$

где  $K_{p2}$ ,  $R_2$ ,  $n_{s2}$  и  $\alpha_{m2}$  – те же параметры, что и в описании к формуле (2), но применяемые к ведомому кулачку.

Рассмотрим численный пример. СРП имеет следующие параметры: передаточное отношение  $i = 105$ ;  $R_2 = 38$  мм;  $R_3 = 57$  мм;  $r_s = 5$  мм;  $\alpha_{m2} = 0,788$  рад;  $\alpha_{m3} = 0,717$  рад;  $n_{s2} = 16$ ;  $n_{s3} = 14$ . Приведенный коэффициент трения во всех контактирующих парах принят одинаковым:  $f = 0,02$ . Коэффициенты в формулах (1) и (2) рассчитаны по соответствующим зависимостям [1] и приняты

следующими:  $K_{nsf} = 1,003$ ;  $K_n = 0,9$ ;  $K_{p2} = 0,185$ ;  $K_{p3} = 0,663$ . На ведомый вал передачи действует постоянный вращающий момент  $T_2 = 50$  Н·м.

По результатам вычислений установлено, что при указанных параметрах значения нормальных сил  $N_{m2} = 886$  Н;  $N_{m3} = 219$  Н.

Для роликов с цилиндрическими концами формулы (2) и (3), в соответствии с силовой схемой (рис. 3, б), преобразуются:

$$N_{m3} = \frac{T_2 \cdot K_{nsf} \cdot \cos(\psi)}{K_n \cdot K_{p3} \cdot (R_3 + 0,5 \cdot r_s) \cdot 10^{-3} \cdot n_{s3} \cdot \sin(\alpha_{m3} - \psi)}; \quad (4)$$

$$N_{m2} = \frac{T_2 \cdot K_{nsf} \cdot \cos(\psi)}{K_n \cdot K_{p2} \cdot (R_2 + 0,5 \cdot r_s) \cdot 10^{-3} \cdot n_{s2} \cdot \sin(\alpha_{m2} + \psi)}. \quad (5)$$

В данном случае необходимо делать перерасчет коэффициентов  $K_{p2}$  и  $K_{p3}$ , т. к. для роликов со сферическими концами они рассчитывались по формуле

$$K_{pj} = 1 - \frac{r_s \cdot \cos(\pi/4) \cdot \operatorname{tg}(\alpha_{mj}) \cdot \sin(\alpha_{mj})}{A_j}, \quad (6)$$

где  $A_j$  – амплитуда периодических беговых дорожек ( $j = 2$  – для беговой дорожки ведомого кулачка;  $j = 3$  – для беговой дорожки, образованной остановленными кулачками). Для рассматриваемого примера принято  $A_2 = 4$  мм;  $A_3 = 6$  мм.

При вышеуказанных геометрических, кинематических и силовых параметрах СРП значения коэффициентов  $K_{p2} = 0,055$ ;  $K_{p3} = 0,523$ . Значения сил  $N_{m2} = 2177$  Н;  $N_{m3} = 199$  Н. Таким образом, замена поверхности роликов со сферических на цилиндрические теоре-

тически приведет к возрастанию нормальных сил, действующих на беговую дорожку ведомого кулачка, на 151 % и незначительному (на 9 %) снижению нагрузки на неподвижные кулачки и контактирующие с ними ролики соответственно. Так как контактная прочность определяется по наиболее слабому элементу, данная замена поверхностей не является целесообразной.

Анализируя причины, приводящие к резкому росту нормальных реакций, можно прийти к выводу о существенном влиянии коэффициентов  $K_{pj}$ , выполняющих функции коэффициентов перекрытия. При увеличении числа периодов кривых, радиуса  $r_s$  и малом радиусе  $R_j$  (что наблюдается для ведомого кулачка) коэффициент перекрытия резко снижается из-за срезания вершин беговых дорожек по причине самопересечения профилей.

Рассмотрим передачу с относительно небольшим передаточным отношением ( $i = 16$ ) и следующими параметрами:  $R_2 = 19$  мм;  $R_3 = 35$  мм;  $r_s = 3$  мм;  $\alpha_{m2} = 0,919$  рад;  $\alpha_{m3} = 0,686$  рад;  $n_{s2} = 9$ ;  $n_{s3} = 6$ ;  $f = 0,02$ . Коэффициенты  $K_{nsf} = 1,017$ ;  $K_n = 0,9$ . Момент  $T_2 = 14$  Н·м.

В этом случае значения сил  $N_{m2} = 886$  Н;  $N_{m3} = 219$  Н ( $K_{p2} = 0,123$ ;  $K_{p3} = 0,796$ ) – для передачи со сферическими поверхностями роликов и  $N_{m2} = 589$  Н;  $N_{m3} = 141$  Н ( $K_{p2} = 0,18$ ;  $K_{p3} = 0,827$ ) – с цилиндрическими. Расчеты вновь подтвердили значимость коэффициентов перекрытия, т. к. для передачи с цилиндрическими роликами при прочих равных условиях увеличение радиуса  $r_s$  с 3 до 4 мм приводило к снижению коэффициента  $K_{p2}$  и двукратному увеличению нормальной реакции.

#### **Алгоритмы компьютерного моделирования СРП с беговыми дорожками различных типов**

Рассмотрим пример построения многопериодной сферической беговой дорожки на внутренней поверхности корпуса и на торце выходного вала в системе NX [2]. При моделировании использовалась русскоязычная версия программы. Ранее в [1] были представлены алгоритмы моделирования сферической беговой дорожки с круглым профилем (в сечении, нормальном к центральному профилю). В данном случае рассматриваются алгоритмы создания пространственных замкнутых беговых дорожек с прямоугольным профилем, контактирующих с цилиндрическими концами роликов.

Для создания беговых дорожек на детали необходимо построить вспомогательное тело-инструмент, с помощью которого в дальнейшем будет произведено вычитание из основной детали. Данное тело наиболее предпочтительно строить с помощью команды *Заметание*. Для этого необходимо создать простран-

ственную периодическую кривую, расположенную на сферической поверхности, – центральной профиль кулачковой поверхности. Методика его создания в NX также подробно изложена в [1].

Далее проектируется сечение, которое будет заметаться по траектории периодической кривой беговой дорожки [7]. При этом необходимо построить точку пересечения с одной из двух плоскостей  $ZX$ ,  $ZY$  (в примере  $ZY$ ) и пространственной кривой. Для этого нужно создать новый эскиз, активировав на панели инструментов во вкладке *Исходная* команду *Эскиз*. Далее необходимо выбрать плоскость  $ZY$ , кликнув по ней левой кнопкой мыши. Завершить команду кнопкой *OK*. Затем следует выбрать инструмент построения *Точка*, в списке способов построения выбрать пункт *Пересечения*, левой кнопкой мыши выбрать плоскость  $ZY$ , далее – периодическую пространственную кривую. Результатом построения сечения должен быть квадрат (рис. 4, а), в который вписана окружность диаметром эквивалентного сферического элемента (в примере  $d_s = 10$  мм). Это необходимо для последующего сравнительного анализа двух моделей передач – со сферическими и цилиндрическими концами роликов, их эквивалентности и быстрой перенастройки. Две стороны указанного квадрата должны быть параллельны отрезку, проведенному из центра системы координат в точку, построение которой было описано в пункте 2. Результат моделирования после завершения операции заметания показан на рис. 4, б.

Для моделирования беговой дорожки в корпусной детали необходимо активировать команду *Вычитание* на панели инструментов, в открывшемся диалоговом окне в пункте *Тело построения* выбрать деталь, а в пункте *Инструмент* – вспомогательное тело, построенное ранее. Завершить команду, нажав кнопку *OK* (рис. 5).

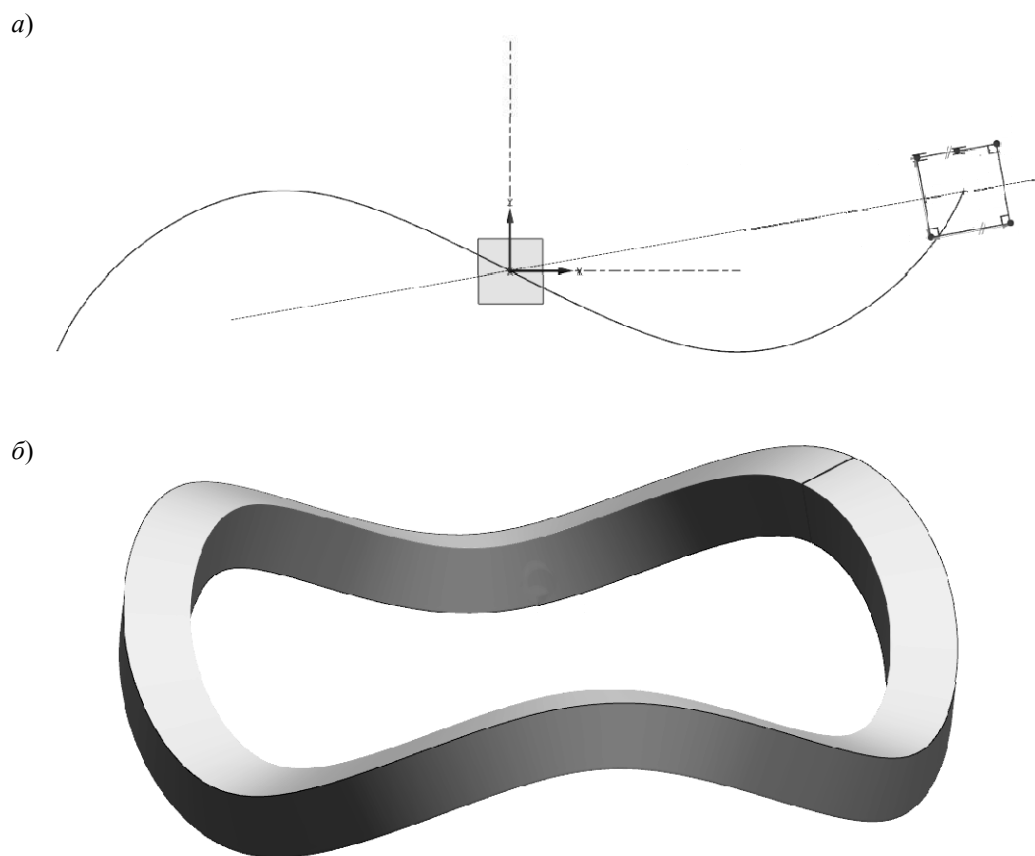


Рис. 4. Результаты построения: а – эскиза сечения; б – тела-инструмента

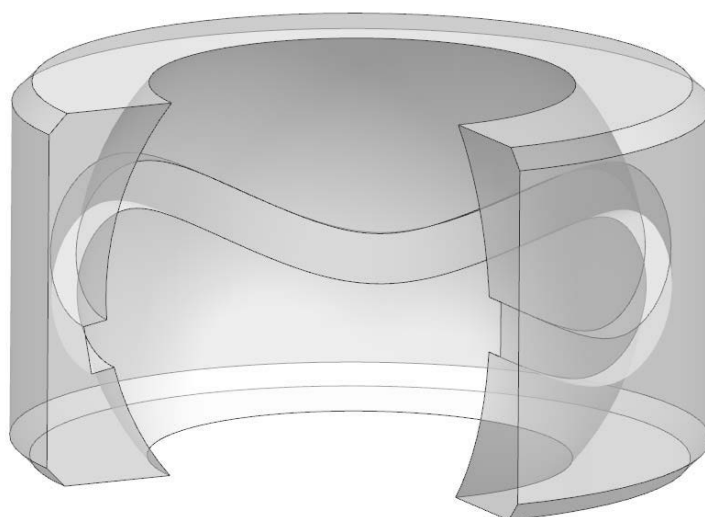


Рис. 5. Результаты построения тела с многопериодной пространственной беговой дорожкой с малым числом периодов

Как было отмечено, предпочтительным методом построения беговых дорожек является использование ко-

манды *Заметание*, но важным будет указать на то, что данный метод корректно работает только при построении

дорожек с малыми числами периодов, при увеличении количества периодов (а также при увеличении диаметра  $d_s$  и уменьшении радиуса сферической поверхности  $R_j$ ) происходит самопересечение тела-инструмента. В этом случае появляется необходимость построения более сложного тела-инструмента, состоящего из большого количества отдельных элементов. Причем поверхность получается негладкой и состоит из секций, что может увеличивать степень погрешности кинематического анализа.

Основная сложность построения подобной поверхности заключается в том, что ось тела-инструмента вынуждена совершать угловое перемещение относительно центра абсолютной системы координат вдоль оси  $OZ$ , т. к. тело-инструмент имеет форму цилиндра.

Алгоритм моделирования беговой дорожки в этом случае представляет собой следующую последовательность операций. Для построения беговой дорожки в первую очередь нужно создать тело-инструмент с помощью команды *Цилиндр*. При этом необходимо задать следующие параметры: тип (ось, диаметр и высота), ось (задан вектор), размеры (диаметр и высота).

Вектор цилиндра должен быть задан с помощью метода *Две точки*. Начальная точка должна быть задана контекстно и находиться в центре абсолютной системы координат (системы координат, относительно которой происходило построение синусоидальной сферической кривой). Конечная точка должна быть задана с помощью метода *Точка на кривой* и лежать на синусоидальной сферической кривой. Диаметр цилиндра задается в соответствии с диаметром рабочей поверхности ролика. Высота цилиндра должна равняться сумме значений радиуса кривой и высоты рабочей части ролика. Необходимо

выбрать пункт *Настройки – Ассоциативная ось*, т. к. при создании массива элементов оси последующих цилиндров будут совершать угловые перемещения, при этом начальная точка должна всегда находиться в центре системы координат.

Следующим этапом моделирования является создание массива элементов, реализуемое последовательным набором команд *Меню – Вставить – Ассоциативная копия – Массив элементов*. В поле выбора элемента необходимо выбрать заранее построенный цилиндр. Ссылочной точкой задать центр окружности цилиндра, которая направлена в сторону от системы координат. В списке *Компоновка* выбрать пункт *Вдоль*. Метод пути необходимо задать как *Смещение*. Следует выбрать периодическую кривую как траекторию, при задании начальной кривой применить для расстояния параметр «Число и шаг», для положения – «% Длины дуги». При этом параметр «Шаг % по» имеет значение  $100/N$ , где  $N$  – количество элементов. При возрастании количества элементов  $N$  в массиве увеличивается точность и гладкость конечной поверхности, но при задании количества свыше 300 значительно сокращается производительность расчётов и возможны ошибки в вычислениях, т. к. рядом расположенные точки имеют практически одинаковые координаты при округлении до тысячных значений после запятой. Это в свою очередь может привести к неопределенности при построении поверхностей. Необходимо отметить обязательным выбором пункта *Цилиндр – Ось цилиндра* в разделе *Метод массива – Переменный*. В окне *Повторно используемые ссылки* указать *Цилиндр* и *Ось*.

После построения тела-инструмента (рис. 6, а) производилось вычитание объема данного тела (инструмента) из тела-заготовки. Для этого ис-

пользовалась булева операция *Вычитание*. Результат моделирования показан на рис. 6, б.

Ранее были получены зависимости для определения КПД ППТК [6, 8]. В данной работе исследование КПД проводилось с помощью инструментов кинематической симуляции системы NX от формы промежуточных тел качения и амплитуды беговой дорожки. Так как модель СРП была упрощена

для уменьшения времени расчетов, абсолютное значение КПД механизма оказалось значительно меньше значений, полученных при испытаниях натуральных образцов. В модели СРП ролики были спроектированы с сателлитом как одно целое, без возможности вращения. Постоянными параметрами передач в эксперименте являлись:  $R_1 = 38$  мм;  $R_2 = 57$  мм;  $d_s = 10$  мм;  $Z_1 = 3$ ;  $Z_2 = 5$ .

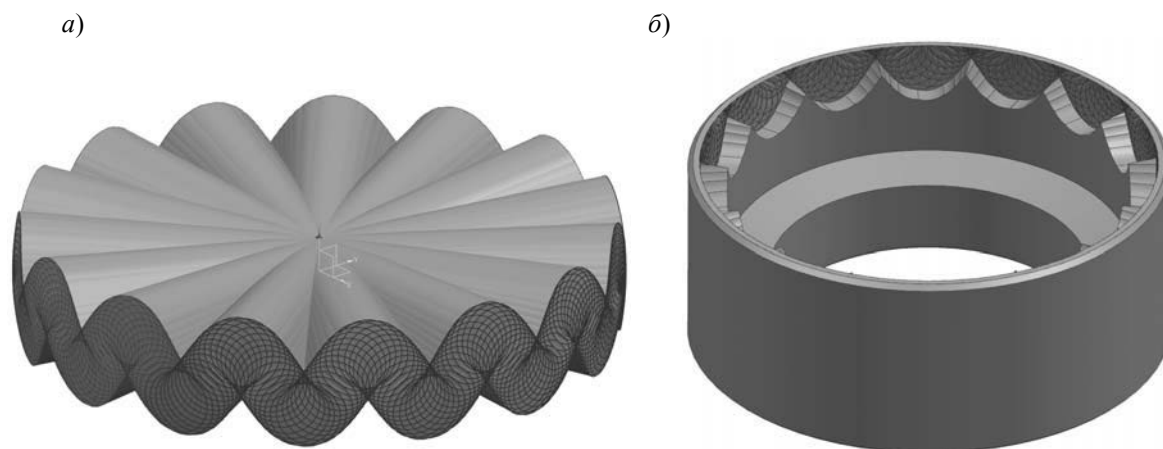


Рис. 6. Результат построения тела-инструмента (а) и поверхности беговой дорожки (б)

Моделирование кинематики проводилось по известным алгоритмам [1]. В создании проекта кинематической симуляции участвовало четыре тела: ведущий и ведомый валы, корпус и сателлит с цилиндрическими выступами, расположенными в два ряда. На валы были установлены вращательные шарниры: на ведущий – с драйвером, определяющим начальную скорость и равномерное вращение. Таким образом, моделировалась идеальная характеристика двигателя [9]. Корпус был зафиксирован, а сателлиту дана возможность вращения относительно ведущего вала. Использовались также два 3D-контакта: в парах сателлит – корпус и ведомый вал – сателлит. Были применены следующие параметры трения: жесткость ( $k = 1000000$  Н/мм); степень жесткос-

ти – 1,5; демпфирование материала ( $c_{\max} = 300$  Н с/мм); статический коэффициент ( $k_{ст} = 0,08$ ); скорость статического трения ( $V_{ст.тр} = 0,1$  мм/с); динамический коэффициент ( $k_d = 0,05$ ); скорость сдвига ( $V_{сдв} = 10$  мм/с).

На панели инструментов выбиралась команда *Вектор момента*. Этот вектор должен совпадать с осью вращения выходного вала, а направление приложения момента должно быть противоположным вращению вала.

Проводилось компьютерное моделирование зависимости КПД передачи от амплитуды беговой дорожки, изготовленной в корпусе. При ее изменении изменялась, соответственно, и амплитуда беговой дорожки ведомого вала, т. к. менялся угол наклона  $\Theta = A_j/R_j$ . Было проведено 20 вычис-

лительных экспериментов с диапазоном изменения амплитуды беговой дорожки от 2,5 до 25 мм с шагом 2,5.

Установлено, что КПД передачи с роликами цилиндрической формы выше, чем передачи со сферическими концами роликов, при этом разница КПД составляет 1,30...3,13 %, а средним является значение в 1,88 %. Данные значения следует признать несущественными, сопоставимыми с погрешностями вычислений. Стоит отметить, что максимальный КПД передачи с вышеуказанными параметрами был достигнут при амплитуде беговой дорожки 22,5 мм, что подтверждает наличие оптимальных значений геометрических параметров СРП по критерию минимальных потерь мощности в зацеплении [10].

### **Выводы**

На основе силового анализа установлено, что применение роликов с ци-

линдрическими концами при больших значениях передаточных чисел нецелесообразно, т. к. приведет к резкому, практически в 1,5 раза, увеличению нормальных усилий в зацеплении, определяющих контактную прочность передачи. Выявлено также, что наибольшее влияние на нагрузочную способность СРП оказывают коэффициенты перекрытия – отношения чисел роликов, одновременно контактирующих с беговыми дорожками, по отношению к общему числу в ряду. При этом методами компьютерного моделирования определено, что замена поверхностей роликов не приведет к существенному увеличению КПД исследуемых передач. Разработанные алгоритмы компьютерного моделирования беговых дорожек в системе NX позволяют проектировать сферические роликовые механизмы с цилиндрическими рабочими концами роликов с различным числом периодов беговых дорожек и исследовать кинематические характеристики данных СРП.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лустенков, М. Е.** Расчет и проектирование сферических роликовых передач: [монография] / М. Е. Лустенков, Е. С. Лустенкова. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2017. – 177 с. : ил.
2. **Лустенков, М. Е.** Ключ для демонтажа ведущих колес грузовых автомобилей ЗИЛ и ГАЗ / М. Е. Лустенков // Автомобильная промышленность. – 2003. – № 5. – С. 24–25.
3. **Лустенков, М. Е.** Механизм с изменяющимся углом между осями валов / М. Е. Лустенков, Е. С. Фитцова // Вестн. Брян. гос. техн. ун-та. – 2014. – № 1. – С. 46–50.
4. NX [Электронный ресурс] : официальный сайт компании Siemens PLM Software. – Режим доступа: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/ru/products/nx/>. – Дата доступа: 05.03.2019.
5. **Lustenkov, M. E.** Strength calculations for cylindrical transmissions with compound intermediate rolling elements / М. Е. Lustenkov // Int. J. of Mechanisms and Robotic Systems. – 2015. – Vol. 2, No. 2. – P. 111–121.
6. **Лустенков, М. Е.** Определение КПД передач с составными промежуточными телами качения / М. Е. Лустенков // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2014. – № 6. – С. 13–19.
7. Сравнительный анализ различных типов центровых кривых кулачковых профилей сферических роликовых передач / М. Е. Лустенков, И. И. Маковецкий, Е. С. Лустенкова, Ю. В. Машин, В. Л. Комар // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2017. – № 3 (56). – С. 74–82.
8. **Лустенков, М. Е.** Теоретические и экспериментальные исследования сферических роликовых передач / М. Е. Лустенков, Е. С. Лустенкова // Вестн. Ижев. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 20. – № 1. – С. 23–27.
9. **Лустенков, М. Е.** Выбор асинхронного электродвигателя для привода ленточного конвейера с цилиндрическим редуктором / М. Е. Лустенков, Б. Б. Скарыно, Е. С. Лустенкова // Изв. высш. учеб. заведений. Машиностроение. – 2019. – № 2 (707). – С. 3–10.



10. **Лустенков, М. Е.** Оценка кинематических возможностей и КПД сферической и роликовой передач / М. Е. Лустенков, Е. С. Лустенкова // Вестн. машиностроения. – 2019. – № 3. – С. 25–28.

*Статья сдана в редакцию 20 марта 2019 года*

**Екатерина Сергеевна Лустенкова**, ассистент, Белорусско-Российский университет.  
E-mail: fittsova@gmail.com.

**Ян Николаевич Метелица**, студент, Белорусско-Российский университет.

**Андрей Николаевич Моисеенко**, зам. начальника по тыловому обеспечению, Могилевский институт МВД Республики Беларусь.

**Ekaterina Sergeevna Lustenkova**, assistant, Belarusian-Russian University. E-mail: fittsova@gmail.com.

**Yan Nikolaevich Metelitsa**, student, Belarusian-Russian University.

**Andrey Nikolaevich Moiseenko**, deputy chief for logistics support, Mogilev Institute of the Ministry of Internal Affairs of the Republic of Belarus.

---

---

УДК 621.9

*Д. М. Свирепа, А. С. Семёнова*

## **ВЛИЯНИЕ СПОСОБОВ СОВМЕЩЕННОЙ ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ И МАГНИТНО-ДИНАМИЧЕСКИМ НАКАТЫВАНИЕМ НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ**

---

---

UDC 621.9

*D. M. Svirepa, A. S. Siamionava*

## **INFLUENCE OF PROCESSING METHODS COMBINING METAL CUTTING AND MAGNETO-DYNAMIC ROLLING ON THE SURFACE ROUGHNES**

---

---

### **Аннотация**

Способы совмещенной обработки резанием и магнитно-динамическим накатыванием с радиальным и осевым расположением магнитной системы могут быть реализованы на различном технологическом оборудовании и обладают рядом особенностей и преимуществ. Проведены исследования влияния режимов совмещенной обработки на шероховатость обрабатываемой поверхности и выявлены их оптимальные значения.

### **Ключевые слова:**

совмещенная обработка, шероховатость, упрочнение, накатывание.

### **Abstract**

Methods of combined processing by metal cutting and magneto-dynamic rolling with a radial and axial position of the magnetic system can be implemented with various manufacturing equipment and have a number of features and advantages. In the course of experimental research, dependences of the influence of cutting conditions on the surface roughness were obtained and their optimal values were found.

### **Keywords:**

combined processing, roughness, hardening, roll forming.

---

---

### **Введение**

Способы поверхностно-пластического деформирования имеют широкие технологические возможности, позволяют обрабатывать детали различной формы и размеров, снижают шероховатость, улучшают качество и эксплуатационные характеристики, такие как износостойкость, прочность, сопротивление усталости, благодаря созданию равновесной структуры в поверхностном слое обрабатываемой детали, а также минимизируют вероятность появления структурных дефектов, что имеет большую значимость в производстве [1–9]. Однако внедрение данной обработки в

производство требует введения дополнительной технологической операции в технологический процесс, что приводит к возрастанию основного времени на изготовление, наличию дополнительного оборудования на участке, а следовательно, к увеличению конечной стоимости детали.

Способы отделочно-упрочняющей обработки магнитно-динамическим накатыванием также зачастую требуют введения в технологический процесс дополнительной операции, что не решает имеющейся проблемы, однако отсутствует необходимость в наличии специального оборудования и эти способы могут быть реализованы на уни-

версальном оборудовании. Конструкция инструмента для осуществления данных способов обработки достаточно проста, а качественные характеристики обработанной поверхности весьма высоки [10–16].

Растачивание является одним из самых распространенных и универсальных способов обработки внутренних цилиндрических поверхностей различных размеров. При растачивании достигается 7–8 квалитет точности и шероховатость поверхности  $Ra$  1,6...3,2 мкм. Применение расточных блоков позволяет осуществлять быструю регулировку инструмента на требуемый размер, тем самым повышая эффективность процесса. Однако растачивание как финишная операция технологического процесса не обеспечивает достижения более низкой шероховатости, упрочнения поверхностного слоя и других качественных характеристик.

Таким образом, совмещение операций магнитно-динамического накатывания и растачивания позволит снизить затраты времени, повысить производительность процесса, а также улучшить качественные характеристики поверхности, влияющие на эксплуатационные характеристики изделия.

В Белорусско-Российском университете ведутся исследования по совмещению двух видов обработки, таких как шлифование и магнитно-динамическое накатывание (МДН), хонингование и МДН, развертывание и МДН. Одним из направлений является обработка совмещенным инструментом, выполняющим растачивание и магнитно-динамическое упрочнение за один рабочий ход инструмента [17–19].

***Способ совмещенной обработки резанием и магнитно-динамическим накатыванием с радиальным расположением магнитной системы***

Способ совмещенной обработки резанием и магнитно-динамическим на-

катыванием с радиальной намагниченностью предназначен для обработки внутренних цилиндрических отверстий диаметром от 40 мм и выше. Он совмещает две операции технологического процесса: расточную и отделочно-упрочняющую. На расточную оправку устанавливают резец, а следом за ним соосно магнитно-динамический накатник (МДН). Оправка 8 фиксируется в патроне станка токарной группы с дополнительным приводом, а заготовка 9 зажимается в патроне станка. Глубина резания  $t = 0,1 \dots 0,5$  мм определяется припуском на обработку при чистовом растачивании расточным резцом 1 с твердосплавными режущими пластинами, предварительно подведенным к внутренней стенке отверстия обрабатываемой заготовки. Инструменту сообщают вращательное движение от дополнительного привода со скоростью вращения от 350 до 500 м/мин и осевую подачу  $S = 0,02 \dots 0,16$  мм/об; 22,4...256 мм/мин. С целью интенсификации процесса модифицирования поверхностного слоя заготовки и увеличения стойкости расточной секции инструмента обрабатываемой заготовке может быть сообщена дополнительная скорость вращения в направлении, совпадающем с вращением инструмента, что уменьшает относительную скорость движения резца относительно заготовки. При этом скорость растачивания равняется разности скоростей вращения инструмента и заготовки и может быть снижена до 200...250 м/мин, а скорость вращения накатного модуля возрасти до 500...1000 м/мин.

На рис. 1 схематично представлен инструмент для осуществления способа совмещенной обработки резанием и магнитно-динамическим накатыванием с радиальным расположением магнитной системы.

Образуемая стружка в процессе растачивания сходит по передней поверхности режущей пластины и удерживается под действием магнитных сил дополнительного источника магнитного поля 2.

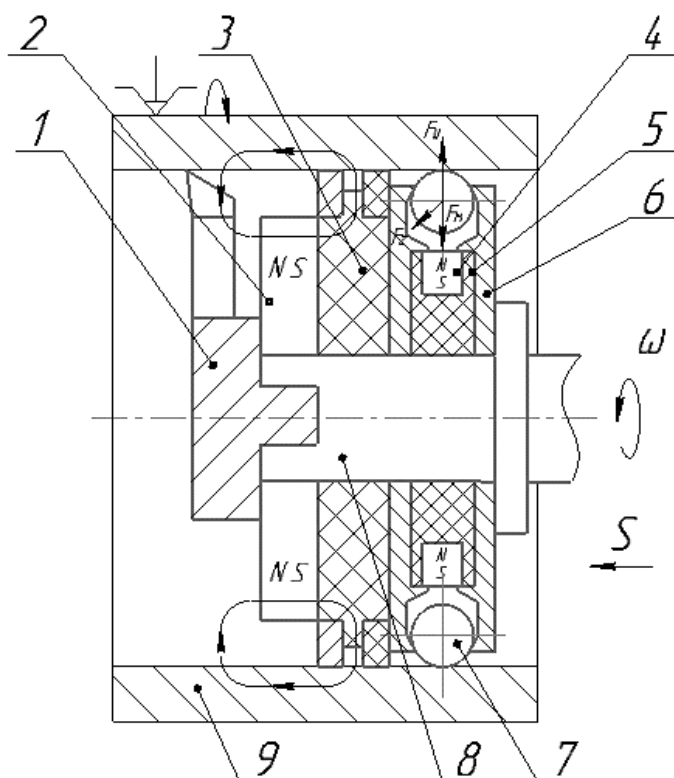


Рис. 1. Схема совмещенной обработки резанием и магнитно-динамическим накатыванием с радиальным расположением магнитной системы

Зачистной блок 3, состоящий из металлической щетки и фетровой втулки, способствует дополнительной очистке и созданию масляного слоя поверхности перед магнитно-динамическим упрочнением. Постоянные цилиндрические магниты 4 (остаточной магнитной индукцией 0,8...1,2 Тл), ради-

ально установленные в обойме 5, которая размещена между двумя дисками 6, воздействуют на деформирующие шары 7, свободно располагающиеся в кольцевой камере. Количество источников магнитного поля принимается в зависимости от обрабатываемого диаметра заготовки и представлено в табл. 1.

Табл. 1. Рекомендуемое количество источников магнитного поля в зависимости от диаметра обрабатываемой заготовки

Диаметр внутренней цилиндрической поверхности обрабатываемой заготовки	Диаметр обоймы	Количество источников магнитного поля
40...60	24...36	4...6
60...70	36...46	6...8
70...80	46...56	8...12
80...90	56...66	12...16
90...100	66...76	16...18

При вращении инструмента деформирующие шары 7 под действием магнитной силы  $F_m$  разгоняются в кольцевой камере до момента, пока центробежная сила не превысит магнитную, после чего они начинают совершать комбинированное движение: окружное – вдоль кольцевой камеры  $F_z$  и колебательное – в направлении обрабатываемой заготовки  $F_y$ , что обес-

печивает периодическое воздействие деформирующих шаров на поверхность заготовки, модифицируя ее поверхностный слой.

Особенности и преимущества способа совмещенной обработки резанием и магнитно-динамическим накатыванием с радиальным расположением магнитной системы сведены в табл. 2.

Табл. 2. Особенности и преимущества способа совмещенной обработки резанием и магнитно-динамическим накатыванием с радиальным расположением магнитной системы

Особенность способа	Преимущество
Выполнение двух технологических операций за один рабочий ход	Повышение производительности и снижение себестоимости детали
Радиальное расположение источников магнитного поля	Повышенная динамика деформирующих шаров при малых осевых размерах инструмента
Один ряд деформирующих шаров	Простота конструкции инструмента
Наличие дополнительного источника магнитного поля	Способствует отводу стружки от зоны деформирования, а также предварительному разогреву заготовки

#### ***Способ совмещенной обработки резанием и магнитно-динамическим накатыванием с осевым расположением магнитной системы***

Способ совмещенной обработки резанием и магнитно-динамическим накатыванием с осевым расположением магнитной системы аналогичен способу, описанному ранее. Отличия заключаются в особенностях конструкции магнитной системы, влияющих на поведение деформирующих шаров, и наличии дополнительного ряда шаров-ударников. Схема совмещенной обработки резанием и магнитно-динамическим накатыванием с осевой намагниченностью приведена на рис. 2.

Источники магнитного поля в виде постоянных цилиндрических магнитов 6 располагаются в обойме-диске 7 так, что оси магнитов параллельны главной оси инструмента. При вращении инструмента шары-ударники 5 под действием центробежной и магнитной сил разгоняются в кольцевой камере и

попеременно воздействуют на деформирующие шары 4. В свою очередь деформирующие шары 4, получая ударное воздействие со стороны шаров-ударников 5 и под действием центробежной силы, наносят удары по обрабатываемой поверхности, осуществляя ее магнитно-динамическое накатывание. Обойму-диск 7 изготавливают из немагнитопроводного материала для концентрированного воздействия магнитной силы, минимизируя рассеивание магнитного поля.

Конструкция магнитной системы с осевой намагниченностью и дополнительным рядом шаров позволяет снизить скорость вращения инструмента до 180...300 м/мин. Представленный способ обработки внутренних поверхностей реализуется на станках фрезерной и сверлильной групп.

Важным конструктивным элементом комбинированных магнитно-динамических накатников является магнитная система. Количество и расположение источников магнитного поля опре-

деляют силовые характеристики обработки, а следовательно, и качественные характеристики обрабатываемых заготовок. Рекомендации по подбору коли-

чества источников магнитного поля в зависимости от диаметра обрабатываемой заготовки представлены в табл. 3.

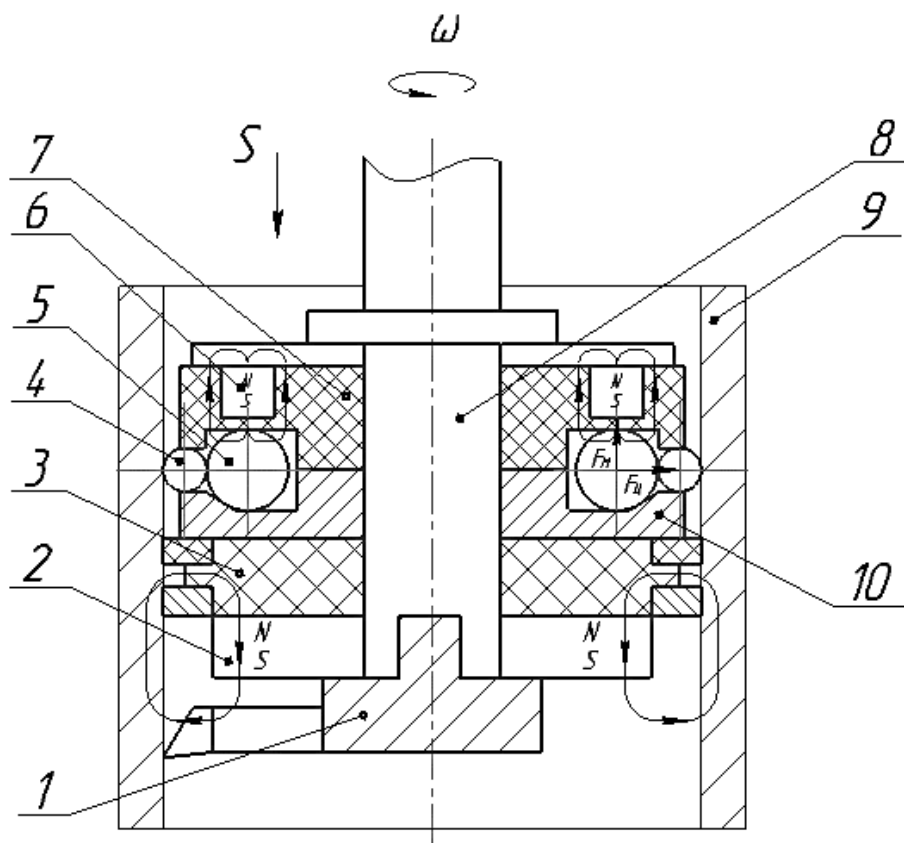


Рис. 2. Схема совмещенной обработки резанием и магнитно-динамическим накатыванием с осевой намагниченностью

Табл. 3. Рекомендуемое количество источников магнитного поля в зависимости от диаметра обрабатываемой заготовки

Диаметр внутренней цилиндрической поверхности обрабатываемой заготовки	Диаметр обоймы	Количество источников магнитного поля
40...50	32...42	4...6
50...60	42...52	6...10
60...70	52...62	10...12
70...80	62...72	12...16
80...90	72...82	16...18
90...100	82...92	18...22

Как видно из табл. 1 и 3, при разных схемах обработки для одного и того же диаметра внутренней цилиндрической

поверхности обрабатываемой заготовки требуемое количество источников магнитного поля может отличаться.

Особенности и преимущества способа совмещенной обработки резанием и магнитно-динамическим накатывани-

ем с осевым расположением магнитной системы сведены в табл. 4.

Табл. 4. Особенности и преимущества способа совмещенной обработки резанием и магнитно-динамическим накатыванием с осевым расположением магнитной системы

Особенность способа	Преимущество
Выполнение двух технологических операций за один рабочий ход	Повышение производительности и снижение себестоимости детали
Осевое расположение источников магнитного поля	Снижение рабочей скорости вращения инструмента за счет отсутствия необходимости превышения центробежной силы над магнитной составляющей
Дополнительный ряд деформирующих шаров	Повышенная динамика деформирующих шаров за счет использования двухрядной конструкции шаров-ударников и деформирующих шаров
Наличие дополнительного источника магнитного поля	Способствует отводу стружки от зоны деформирования, а также предварительному разогреву заготовки

### **Исследование шероховатости обработанной поверхности**

Шероховатость рабочей поверхности детали является важнейшей характеристикой, определяющей качество поверхностного слоя. В связи с этим исследование шероховатости поверхности детали после совмещенной обработки резанием и магнитно-динамическим накатыванием представляет большой интерес.

Измерение шероховатости поверхности образцов осуществляли на профилометре-профилографе модели SJ-210.

Совмещенную отделочно-упрочняющую обработку осуществляли на вертикально-фрезерном станке модели ВФ-130. Обработка производилась инструментом для совмещенной обработки резанием и магнитно-динамическим накатыванием с радиальным расположением магнитной системы (в соответствии со схемой рис. 1, без вращения заготовки) и инструментом для совмещенной обработки резанием и магнитно-динамическим накатыванием с осевым расположением магнитной системы (в соответствии со схемой рис. 2).

Характеристики обрабатываемых заготовок: размеры ( $D \times d \times l$ ) –  $120 \times 100 \times 50$  мм; материал – сталь 20

(180...200 НВ); отверстия заготовок предварительно растачивали в размер  $\varnothing 100H9$ ; исходная шероховатость поверхности отверстия после полустогового растачивания составила  $Ra 10,4...11,7$  мкм.

Характеристики инструментов: деформирующие шары диаметром 10 мм из ШХ 15 твердостью 62...65 HRC; количество деформирующих шаров в инструменте (в соответствии со схемой рис. 1) – 27, в инструменте (в соответствии со схемой рис. 2) шаров-ударников диаметром 10 мм – 22, деформирующих шаров диаметром 6 мм – 46; материал цилиндрических постоянных магнитов – Nd-Fe-B; размеры цилиндрических постоянных магнитов ( $D \times l$ ) –  $8 \times 10$  мм; количество магнитов – 18 (см. рис. 1) и 22 (см. рис. 2); индукция магнитного поля в зоне расположения деформирующих шаров  $B = 0,12$  Тл.

Режимы совмещенной обработки: окружная скорость инструмента составляет 251...703 м/мин (частота вращения 800...2240 мин<sup>-1</sup>); осевая подача инструмента  $S = 20$  мм/мин (рис. 3),  $S = 100$  мм/мин (рис. 4); количество рабочих ходов инструмента – 1; смазочно-охлаждающая жидкость – масло индустриальное 45.

Результаты исследований зависи-

мости параметра шероховатости  $Ra$  внутренней поверхности цилиндрических заготовок после совмещенной обработки резанием и магнитно-дина-

ческим накатыванием от скорости вращения (частоты вращения) инструмента представлены на рис. 3 и 4.

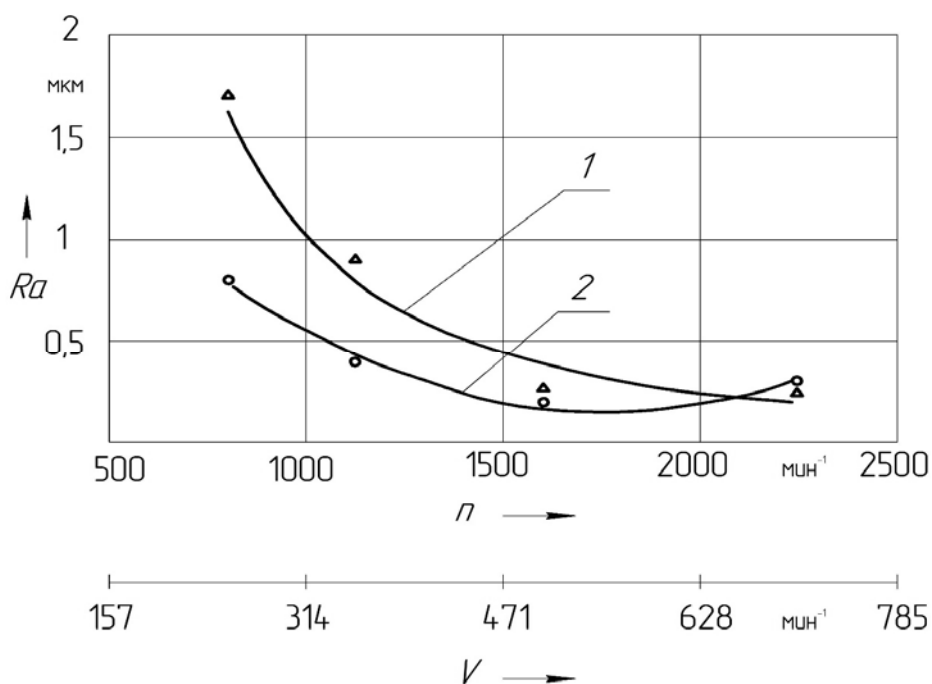


Рис. 3. Зависимость шероховатости поверхности от частоты вращения инструмента ( $S = 20$  мм/мин): 1 – обработка инструментом для совмещенной обработки резанием и магнитно-динамическим накатыванием с радиальным расположением магнитной системы; 2 – обработка инструментом для совмещенной обработки резанием и магнитно-динамическим накатыванием с осевым расположением магнитной системы

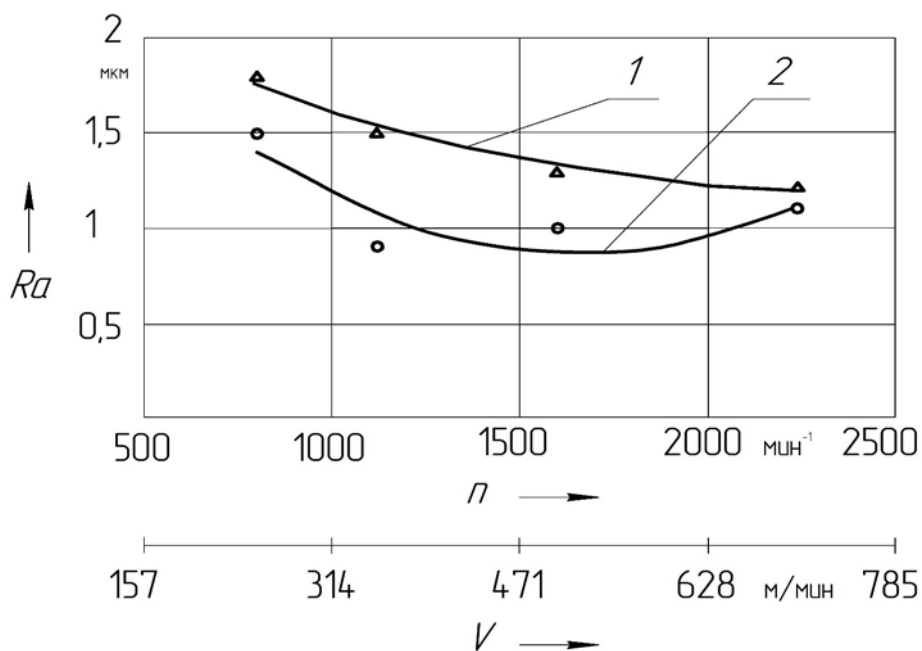


Рис. 4. Зависимость шероховатости поверхности от частоты вращения инструмента ( $S = 100$  мм/мин): 1 – обработка инструментом для совмещенной обработки резанием и магнитно-динамическим накатыванием с радиальным расположением магнитной системы; 2 – обработка инструментом для совмещенной обработки резанием и магнитно-динамическим накатыванием с осевым расположением магнитной системы



Проведенный анализ экспериментальных исследований показывает, что шероховатость обработанной поверхности зависит от скорости обработки и величины подачи.

Установлено, что в результате совмещенной обработки резанием и магнитно-динамическим накатыванием при значении осевой подачи 20 мм/мин происходит снижение шероховатости с величины  $Ra$  10,4...10,7 мкм до величины 0,2...1,7 мкм – при обработке инструментом с радиальным расположением магнитной системы и до  $Ra$  0,26...0,8 мкм – с осевым. При значении осевой подачи 100 мм/мин происходит снижение шероховатости с величины  $Ra$  10,4...10,7 мкм до величины 1,2...1,8 мкм – при обработке инструментом с радиальным расположением магнитной системы и до  $Ra$  0,8...1,5 мкм – с осевым. При этом оптимальной частотой вращения

инструмента для совмещенной обработки резанием и магнитно-динамическим накатыванием с осевым расположением магнитной системы с целью достижения минимальной шероховатости является значение  $1750 \text{ мин}^{-1}$ , а для совмещенной обработки резанием и магнитно-динамическим накатыванием с радиальным расположением магнитной системы –  $2240 \text{ мин}^{-1}$ .

Результаты исследований зависимости параметра шероховатости  $Ra$  внутренней поверхности цилиндрических заготовок после совмещенной обработки резанием и магнитно-динамическим накатыванием от минутной подачи инструмента представлены на рис. 5.

Условия эксперимента соответствуют приведенным ранее; частоты вращения инструментов составляют  $1600 \text{ мин}^{-1}$ .

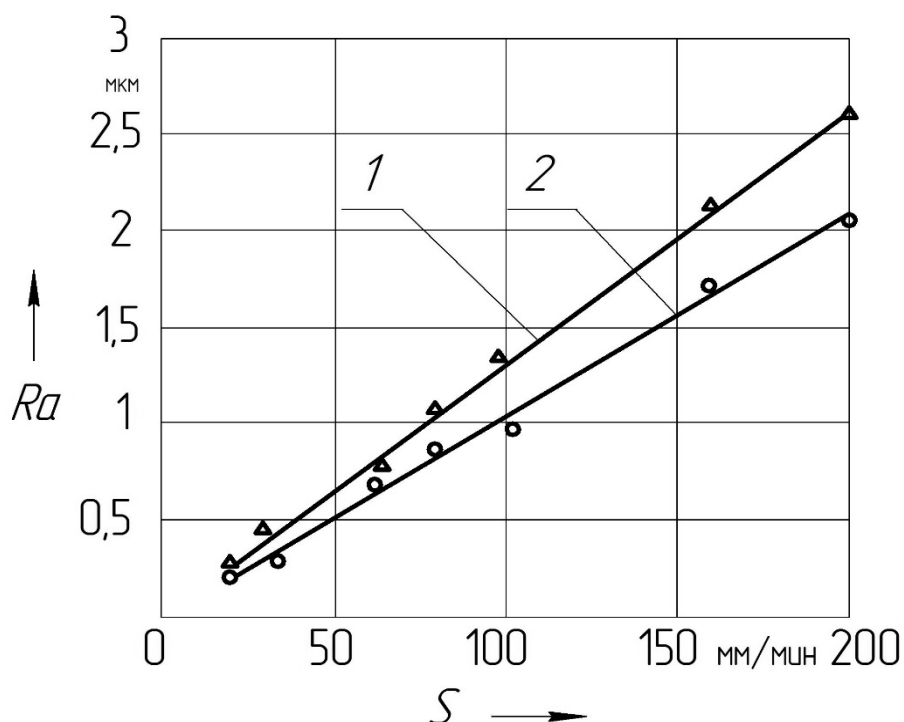


Рис. 5. Зависимость шероховатости поверхности от величины подачи инструмента: 1 – обработка инструментом для совмещенной обработки резанием и магнитно-динамическим накатыванием с радиальным расположением магнитной системы; 2 – обработка инструментом для совмещенной обработки резанием и магнитно-динамическим накатыванием с осевым расположением магнитной системы

Анализ результатов исследования показал, что в диапазоне подач от 20 до 200 мм/мин при обработке инструментом для совмещенной обработки резанием и магнитно-динамическим накатыванием с радиальным расположением магнитной системы имеет место снижение шероховатости поверхности по параметру  $Ra$  от 0,26 до 2,6 мкм, а при обработке инструментом для совмещенной обработки резанием и магнитно-динамическим накатыванием с осевым расположением магнитной системы –  $Ra$  от 0,2 до 2,1 мкм. Это обусловлено тем, что при увеличении подачи уменьшается интенсивность снижения шероховатости расточным модулем инструментов, а также число ударов, наносимых деформирующими шарами по поверхности обрабатываемой заготовки, и усилия динамического воздействия на поверхность детали со стороны деформирующих шаров становится недостаточным для полного смятия микронеровностей после растачивания.

### Заключение

Разработан способ совмещенной обработки резанием и магнитно-динамическим накатыванием с радиальной намагниченностью, предназначенный для обработки внутренних цилиндрических отверстий диаметром от 40 мм и выше. Он совмещает две операции технологического процесса: расточную и отделочно-упрочняющую и обеспечивает снижение шероховатости обрабатываемой поверхности с величины  $Ra$  10,4...10,7 мкм до  $Ra$  0,26...0,8 мкм.

Разработан способ совмещенной обработки резанием и магнитно-динамическим накатыванием с осевой намагниченностью, предназначенный для обработки внутренних цилиндрических отверстий и снабженный двумя рядами шаров. Он обеспечивает снижение шероховатости обрабатываемой поверхности с величины  $Ra$  10,4...10,7 мкм до  $Ra$  0,2...1,7 мкм.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Довгалев, А. М. Классификация инструментов для магнитно-динамического упрочнения / А. М. Довгалев, Д. М. Свирепа, Д. М. Рыжанков // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2008. – № 2. – С. 30–38.
2. Способ магнитно-динамического упрочнения внутренней поверхности круглого отверстия в металлической детали: пат. ВУ 17976 / А. М. Довгалев, Д. М. Свирепа. – Опубл. 28.02.2014.
3. Довгалев, А. М. Математическое моделирование процесса магнитно-динамического раскатывания / А. М. Довгалев, И. И. Маковецкий, Д. М. Свирепа // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. – 2010. – № 4 (64). – С. 26–30.
4. Высокопроизводительное магнитно-динамическое упрочнение внутренней поверхности цилиндров / Д. М. Свирепа, А. М. Довгалёв, А. С. Семёнова, О. Н. Юхновец // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2015. – С. 51.
5. Математическое моделирование магнитно-динамического инструмента для упрочняющей обработки плоских поверхностей / А. М. Довгалев, Н. А. Леванович, С. А. Сухоцкий, Д. М. Свирепа // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2010. – № 4. – С. 55–65.
6. Довгалев, А. М. Технология магнитно-динамического раскатывания и ее реализация в машиностроении / А. М. Довгалев, Д. М. Свирепа // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2014. – С. 10–15.
7. Двухрядные магнитно-динамические инструменты / А. М. Довгалев, С. А. Сухоцкий, Д. М. Свирепа, Д. М. Рыжанков // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2009. – № 2 (37). – С. 12–20.
8. Довгалев, А. М. Влияние технологических и конструктивных параметров процесса магнитно-динамического раскатывания на шероховатость поверхности / А. М. Довгалев, Д. М. Свирепа // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. – 2014. – № 4. – С. 21–25.
9. Магнитно-динамические инструменты для упрочнения наружных поверхностей вращения / А. М. Довгалев, С. А. Сухоцкий, Д. М. Свирепа, Д. М. Рыжанков // Вестн. БГСХА. – 2009. – № 4. – С. 174–178.

10. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки: пат. ВУ 11536 / А. М. Довгалева, Д. М. Рыжанков, Д. М. Свирепа. – Оpubл. 28.02.2009.
11. Устройство для отделочно-упрочняющей обработки: пат. ВУ 10065 / А. М. Довгалева, Д. М. Свирепа, Д. М. Рыжанков. – Оpubл. 30.12.2007.
12. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки: пат. ВУ 10188 / А. М. Довгалева, Д. М. Свирепа, Д. М. Рыжанков. – Оpubл. 28.02.2008.
13. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки цилиндрического отверстия детали: пат. ВУ 19139 / А. М. Довгалева, С. А. Сухоцкий, Д. М. Свирепа. – Оpubл. 30.04.2015.
14. Инструмент для поверхностного пластического деформирования отверстия детали: пат. ВУ 18083 / А. М. Довгалева, Д. М. Свирепа, С. А. Сухоцкий, Д. М. Рыжанков. – Оpubл. 30.04.2014.
15. Упрочняющий инструмент: пат. ВУ 15364 / А. М. Довгалева, Д. М. Свирепа, Д. М. Рыжанков, С. А. Сухоцкий. – Оpubл. 28.02.2012.
16. Устройство для отделочно-упрочняющей обработки: пат. ВУ 15021 / А. М. Довгалева, Д. М. Свирепа, С. А. Сухоцкий, Д. М. Рыжанков. – Оpubл. 30.10.2011.
17. **Свирепа, Д. М.** Конструкции инструментов для совмещенной обработки резанием и поверхностным пластическим деформированием магнитно-динамическими раскатниками / Д. М. Свирепа, А. С. Семёнова, С. А. Сухоцкий // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2019. – № 1. – С. 38–47.
18. **Свирепа, Д. М.** Совмещенная обработка резанием и магнитно-динамическим накатыванием / Д. М. Свирепа, А. С. Семёнова // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2017. – С. 48–49.
19. **Свирепа, Д. М.** Особенности конструирования комбинированного магнитно-динамического раскатника / Д. М. Свирепа, А. С. Семёнова // Образование, наука и производство в XXI веке: современные тенденции развития: материалы Юбилейной междунар. конф. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2016. – С. 132.

*Статья сдана в редакцию 20 марта 2019 года*

**Дмитрий Михайлович Свирепа**, канд. техн. наук, Белорусско-Российский университет. E-mail: svdima@tut.by.

**Анна Сергеевна Семёнова**, аспирант, Белорусско-Российский университет. E-mail: ann\_li93@mail.ru.

**Dzmitry Mikhailovich Svirepa**, PhD (Engineering), Belarusian-Russian University. E-mail: svdima@tut.by.

**Hanna Sergeevna Siamionava**, PhD student, Belarusian-Russian University. E-mail: ann\_li93@mail.ru.

---

УДК 629.113

*В. П. Тарасик*

**МЕТОДИКА ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЖИМА ИСПЫТАНИЙ НА УПРАВЛЯЕМОСТЬ И УСТОЙЧИВОСТЬ АВТОМОБИЛЯ ПРИ ВХОДЕ В ПОВОРОТ**

---

UDC 629.113

*V. P. Tarasik*

**TECHNIQUE FOR IMITATION MODELING OF TESTING CONTROLLABILITY AND STABILITY OF THE VEHICLE ENTERING A TURN**

---

**Аннотация**

Предложены математическая модель и методика проведения имитации испытаний автомобиля при выполнении манёвра входа в поворот. На примере легкового автомобиля малого класса осуществлено исследование управляемости и устойчивости и приведены полученные графики, иллюстрирующие изменение характеристик движения на поворотной полосе.

**Ключевые слова:**

автомобиль, колесо, поперечная и продольная реакции дороги, сила инерции, инерционный момент, тестовый режим испытаний, поворотная полоса, траектория движения автомобиля, боковое скольжение, занос автомобиля.

**Abstract**

A mathematical model and a technique are proposed to simulate vehicle testing during a cornering maneuver. Based on a small class car, a study of controllability and stability has been carried out and the obtained diagrams are presented, which illustrate changes in the characteristics of vehicle movement on the turn lane.

**Keywords:**

vehicle, wheel, transverse and longitudinal reactions of the road, inertia force, inertia moment, test mode, turn lane, trajectory of vehicle motion, sideway skidding, skidding.

---

Управляемость и устойчивость – важнейшие свойства автомобиля, оказывающие существенное влияние на безопасность движения и возможность реализации высокой скорости движения и производительности.

Формулировки определений функциональных свойств управляемости и устойчивости автомобиля, предложенные в [1–6] и другими авторами, несколько различаются, но не носят принципиальных разногласий и противоречий.

Технические требования к управляемости и устойчивости автотранспортных

средств изложены в ГОСТ 31507–2012 [7]. В нём детально рассмотрены методы проведения испытаний по определению характеристик и оценочных показателей качества и эффективности управления. Предусмотрено множество типовых тестовых испытаний. Показатели и характеристики исследуемых свойств определяются в критических (нештатных) режимах движения автомобиля, подвергаемого испытаниям, с выполнением соответствующих манёвров: смена полосы движения («переставка»), вход в поворот, рывок руля и др.

При создании нового автомобиля необходимо иметь возможность прогнозирования показателей и характеристик управляемого движения. Далее будет изложена методика имитационного моделирования тестового режима испытаний «поворот  $R_{\Pi} = 35$  м», предназначенного для определения максимальной скорости  $v_{\text{max}}$ , при которой ещё возможно выполнение данного манёвра при сохранении устойчивого и управляемого движения без бокового опрокидывания и заноса мостов автомобиля. Полученное значение  $v_{\text{max}}$  сравнивается с нормативным значением скорости выполнения исследуемого манёвра  $v_M$ . Значения  $v_M$  для различных категорий и типов автомобилей даны в [7]. Схема маршрута движения «поворот  $R_{\Pi} = 35$  м» и методика проведения испытаний приведены в [7].

### Цель исследования

На основе математического моделирования выполнить исследование возможности прогнозирования на начальной стадии проектирования автомобиля параметров и характеристик

управляемости и устойчивости движения на режиме входа в поворот.

### Методика исследования

На начальной стадии проектирования количество информации об исходных параметрах автомобиля минимально, поэтому исследования свойств управляемости и устойчивости предлагается провести на трёхмерной имитационной модели автомобиля, отображающей его движение на опорной поверхности дороги. Схема кинематических параметров движения автомобиля на повороте представлена на рис. 1, а, б. Воздействия внешней среды на автомобиль изображены на рис. 2. Предполагается, что задние колёса ведущие, а передние ведомые и управляемые.

Выбраны две системы координат – подвижная  $xuz$ , связанная с автомобилем, и неподвижная  $XOZ$  на опорной поверхности дороги. Начало подвижной системы координат расположено в центре масс автомобиля  $C$ , ось  $x$  направлена вдоль продольной оси автомобиля  $AB$ , ось  $y$  – в боковом направлении в сторону мгновенного центра поворота  $O^*$ , а ось  $z$  – перпендикулярно к плоскости  $xCy$  (см. рис. 1, а).

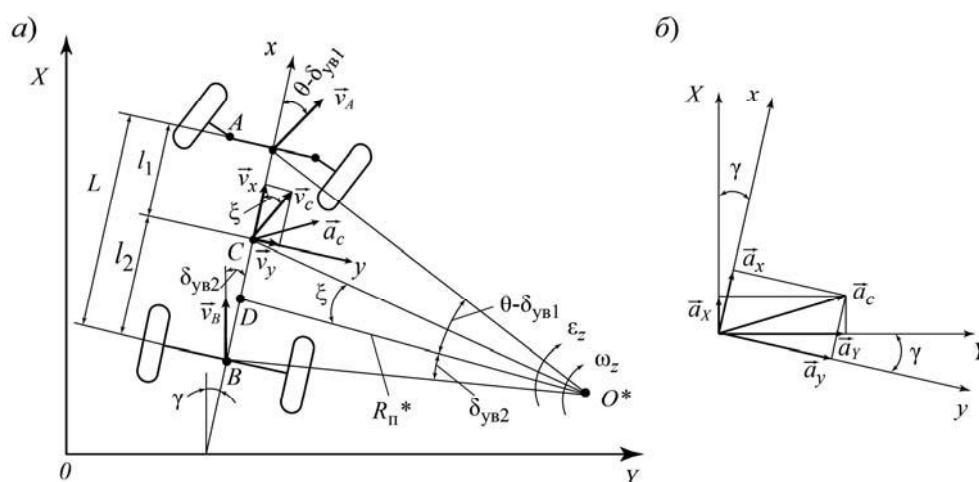


Рис. 1. Схема к определению скоростей и ускорений автомобиля при движении на повороте

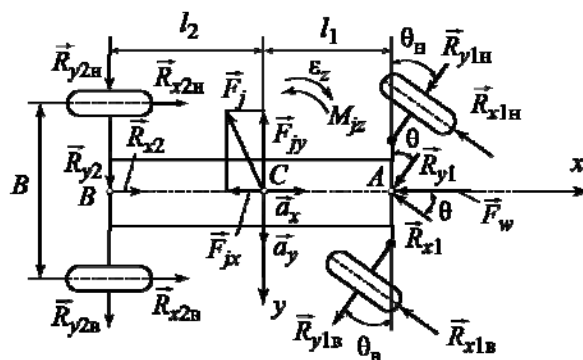


Рис. 2. Внешние воздействия на автомобиль при движении на повороте

Угол поворота обоих управляемых колёс принят одинаковым, т. к. его значение при выполнении исследуемого манёвра сравнительно невелико (в пределах 4...5 град). Углы увода передних и задних колёс обозначены соответственно  $\delta_{yb1}$  и  $\delta_{yb2}$ . Скорость центра масс автомобиля  $\vec{v}_c$ , а её проекции на оси  $x$  и  $y$  – соответственно  $\vec{v}_x$  и  $\vec{v}_y$ . Ускорение центра масс  $\vec{a}_c$ , угловая скорость вращения корпуса автомобиля относительно оси  $\omega_z$ , а угловое ускорение  $\varepsilon_z$ . Курсовой угол  $\gamma$  характеризует изменение положения продольной оси автомобиля  $Sx$  относительно неподвижной оси  $X$ . Взаимосвязи между векторами ускорений в подвижной системе координат  $\vec{a}_x$ ,  $\vec{a}_y$  и в неподвижной системе  $\vec{a}_X$  и  $\vec{a}_Y$  отображены на рис. 1, б.

На рис. 2 показаны продольные и поперечные реакции дороги на передние колёса, суммарные составляющие которых обозначены  $\vec{R}_{x1}$ ,  $\vec{R}_{y1}$  и приведены к точке  $A$  продольной оси автомобиля. Аналогично отображены суммарные продольная  $\vec{R}_{x2}$  и поперечная  $\vec{R}_{y2}$  реакции дороги на задние колёса. Сила инерции массы автомобиля  $m_a$  обозначена  $\vec{F}_j$ , а инерционный момент  $M_{jz}$ , действующий относительно

вертикальной оси  $Cz$ .

Составим уравнения динамического равновесия сил в проекциях на оси  $x$ ,  $y$  и вращающих моментов относительно оси  $z$ :

$$\left. \begin{aligned} \delta_{п.м} m_a a_x &= -R_{x1} \cos \theta + R_{x2} - R_{y1} - F_w; \\ m_a a_y &= -R_{x1} \sin \theta + R_{y1} \cos \theta + R_{y2}; \\ J_z \varepsilon_z &= -R_{x1} l_1 \sin \theta + R_{y1} l_1 \cos \theta - R_{y2} l_2, \end{aligned} \right\} (1)$$

где  $\delta_{п.м}$  – коэффициент приведенной массы автомобиля, учитывающий кинетическую энергию вращающихся масс двигателя, трансмиссии и колёс;  $F_w$  – сила сопротивления воздуха;  $\theta$  – угол поворота управляемых колёс;  $J_z$  – момент инерции автомобиля относительно оси  $z$ ;  $l_1, l_2$  – координаты центра масс автомобиля.

Согласно схеме на рис. 1, а проекции скорости центра масс автомобиля  $v_c$  на оси подвижной системы координат  $v_x = v_c \cos \xi$ ;  $v_y = v_c \sin \xi$ , где  $\xi$  – угол отклонения вектора  $\vec{v}_x$  относительно вектора  $\vec{v}_c$ . Учитывая, что углы  $\theta$ ,  $\delta_{yb1}$  и  $\delta_{yb2}$  сравнительно небольшие, искомый угол  $\xi$  можно вычислять по формуле

$$\xi = [l_2(\theta - \delta_{yb1}) - l_1 \delta_{yb2}] / L, \quad (2)$$

где  $L$  – база автомобиля.

Поскольку угол  $\xi$  также небольшой, примем  $\vec{v}_x = \vec{v}_c$ , а значения  $v_y$  и  $\omega_z$  определим по формулам [6]

$$v_y = v_x \xi = v_x [l_2(\theta - \delta_{yB1}) - l_1 \delta_{yB2}] / L; \quad (3)$$

$$\omega_z = v_x / R_{\Pi}^* = v_x (\theta - \delta_{yB1} + \delta_{yB2}) / L, \quad (4)$$

где  $R_{\Pi}^*$  – радиус поворота автомобиля с учётом увода колёс.

Решив совместно уравнения (3) и (4), получим выражения для вычисления углов увода

$$\delta_{yB1} = \theta - (l_1 \omega_z + v_y) / v_x; \quad (5)$$

$$\delta_{yB2} = (l_2 \omega_z - v_y) / v_x. \quad (6)$$

При испытаниях автомобиль движется с постоянной скоростью  $v_c$ , поэтому  $a_x = 0$  и первое уравнение системы (1) превращается в алгебраическое выражение. Величина реакции  $R_{x1}$  по сравнению с поперечными реакциями  $R_{y1}$  и  $R_{y2}$  незначительна, а  $R_{x1} \sin \theta$  тем более, поэтому ею можно пренебречь и исключить из второго и третьего уравнений системы (1). Поперечные реакции  $R_{y1}$  и  $R_{y2}$  определим из выражений [6]

$$R_{y1} = k_{yB1} \delta_{yB1}; \quad (7)$$

$$R_{y2} = k_{yB2} \delta_{yB2}, \quad (8)$$

где  $k_{yB1}$ ,  $k_{yB2}$  – коэффициенты сопротивления уводу колёс соответственно переднего и заднего мостов.

Значение поперечной составляющей  $a_y$  ускорения центра масс автомобиля  $a_c$  определяется с учётом угловой

скорости корпуса автомобиля  $\omega_z$  и вычисляется по формуле

$$a_y = v_x \omega_z + dv_y / dt. \quad (9)$$

Принимая  $\cos \theta = 1$ , получаем следующую систему дифференциальных уравнений, описывающих движение вдоль оси  $y$  и вращение относительно оси  $z$ :

$$\left. \begin{aligned} \frac{dv_y}{dt} &= \frac{R_{y1} + R_{y2}}{m_a} - v_x \omega_z; \\ \frac{d\omega_z}{dt} &= \frac{R_{y1} l_1 - R_{y2} l_2}{J_z}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

После подстановки значений поперечных реакций  $R_{y1}$  и  $R_{y2}$  в уравнения (10) представим их в виде

$$\left. \begin{aligned} dv_y / dt &= -a_{11} v_y - a_{12} \omega_z + b_1; \\ d\omega_z / dt &= -a_{21} v_y - a_{22} \omega_z + b_2, \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

где  $a_{11}$ ,  $a_{12}$ ,  $a_{21}$ ,  $a_{22}$  – элементы матрицы Якоби системы линейных дифференциальных уравнений (11);  $b_1$ ,  $b_2$  – функции внешних воздействий на автомобиль, обусловленных изменением угла поворота управляемых колёс  $\theta$ .

$$\left. \begin{aligned} a_{11} &= \frac{k_{yB1} + k_{yB2}}{m_a v_x}; \\ a_{12} &= \frac{k_{yB1} l_1 - k_{yB2} l_2}{m_a v_x} + v_x; \\ a_{21} &= \frac{k_{yB1} l_1 - k_{yB2} l_2}{J_z v_x}; \\ a_{22} &= \frac{k_{yB1} l_1^2 + k_{yB2} l_2^2}{J_z v_x}; \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$$b_1 = k_{yB1} \theta / m_a; \quad b_2 = k_{yB1} l_1 \theta / J_z. \quad (13)$$

Решением системы уравнений (11) определяются изменения фазовых координат  $v_y$  и  $\omega_z$ , характеризующих криволинейное движение автомобиля, в зависимости от угла поворота управляемых колёс  $\theta$  и скорости движения  $v_x$ . Для определения координат центра масс автомобиля  $X$ ,  $Y$  в плоскости дороги и курсового угла  $\gamma$ , характеризующего угол поворота продольной оси автомобиля относительно оси  $OX$ , используем систему дифференциальных уравнений, составленную непосредственно на основе схемы, представленной на рис. 1, а:

$$\left. \begin{aligned} dX/dt &= v_x \cos \gamma - v_y \sin \gamma; \\ dY/dt &= v_x \sin \gamma + v_y \cos \gamma; \\ d\gamma/dt &= \omega_z. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Интегрируя совместно системы дифференциальных уравнений (11) и (14), определяют изменения фазовых переменных  $v_x$ ,  $\omega_z$ ,  $X$ ,  $Y$ ,  $\gamma$  в подвижной и неподвижной системах координат. По результатам решения строят график траектории движения на плоскости дороги, на основе которого оценивают управляемость и устойчивость автомобиля при выполнении манёвра «поворот  $R_{\Pi} = 35$  м» (обеспечение нормативного значения скорости выполнения манёвра  $v_{м.н}$ , фиксация заноса автомобиля – выход за ограничивающие линии поворотной полосы). Производят также построение графиков изменения во времени поперечных реакций  $R_{y1}$ ,  $R_{y2}$  и углов увода колёс  $\delta_{ув1}$ ,  $\delta_{ув2}$ . Получаемые значения  $R_{y1}$ ,  $R_{y2}$  сравниваются с их предельными величинами, ограничиваемыми сцеплением колёс с дорогой  $R_{y1\phi} = \phi_x R_{z1}$ ;  $R_{y2\phi} = \phi_x R_{z2}$ , где  $\phi_x$  – коэффициент сцепления;  $R_{z1}$ ,  $R_{z2}$  – нормальные реакции дороги на колёса.

Если поперечные реакции  $R_{y1}$ ,

$R_{y2}$  превышают предельные значения по сцеплению, возникает боковое скольжение колёс и прогрессивно увеличиваются углы увода, что приводит к заносу автомобиля и движение его может оказаться неуправляемым. Для учёта величины возрастания угла увода  $\Delta\delta_{ув2}$  при боковом скольжении колёс заднего моста предложено использовать квадратичную функцию, имитирующую снижение коэффициента сцепления в сравнении с его максимальным значением  $\phi_{x\max}$ . Она представляет собой полином, аргументом которого является величина  $\Delta R_{y2}$  превышения реакцией  $R_{y2}$  значения  $R_{y2\phi}$ :

$$\Delta\delta_{ув2} = b_0 + b_1\Delta R_{y2} + b_2\Delta R_{y2}^2, \quad (15)$$

где  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  – коэффициенты полинома.

На основе функции (15) вычислялось увеличение угла увода колёс заднего моста  $\Delta\delta_{ув2}$ , обусловленное возникновением бокового скольжения.

Вследствие изменения угла поворота управляемых колёс  $\theta$  и углов увода  $\delta_{ув1}$ ,  $\delta_{ув2}$  при движении автомобиля на поворотной полосе радиус поворота  $R_{пов}$  постоянно изменяется, что влияет на траекторию движения. Для построения графика траектории движения автомобиля в качестве аргумента использовалась координата поперечного перемещения  $Y$ , а координата продольного перемещения  $X$  вычислялась по формуле

$$X = a + \sqrt{R_{пов}^2 - (Y - b)^2}, \quad (16)$$

где  $a$  и  $b$  – координаты центра окружности, радиус которой равен среднему радиусу поворотной полосы  $R_{ср}$ :  $a = 0$ ;  $b = 33,05$  м.

Радиус  $R_{ср}$  определяется из



соотношения

$$R_{\text{ср}} = R_{\text{п}} - D_3 / 2, \quad (17)$$

где  $R_{\text{п}}$  и  $D_3$  – наружный радиус и ширина поворотной полосы маршрута соответственно:  $R_{\text{п}} = 35$  м;  $D_3 = 3,9$  м [7].

В процессе выполнения манёвра осуществляется управление углом поворота управляемых колес  $\theta$ . На участке 2 маршрута испытаний  $\theta$  изменяется по линейной зависимости от времени исходя из условия, чтобы при въезде на поворотную полосу его величина достигла значения, соответствующего движению по траектории среднего радиуса поворотной полосы  $R_{\text{ср}}$ . Изменение во времени угловой скорости поворота колёс на этом участке  $\Delta\omega_{\text{у.к}0}$ , град/с, определяется из соотношения

$$\Delta\omega_{\text{у.к}0} = \frac{180v_{\text{м.н}} \arctg(L/R_{\text{ср}})}{\pi s_2}, \quad (18)$$

где  $s_2$  – длина участка 2 маршрута испытаний,  $s_2 = 15$  м [7].

В процессе движения на поворотной полосе осуществляются дискретные изменения угловой скорости поворота колёс  $\Delta\omega_{\text{у.к}}$ , град/с, при отклонении

линии траектории движения  $R_{\text{тр}}$  от  $R_{\text{ср}}$  более чем на 0,5 м.

### Результаты исследования

В качестве объекта моделирования принят легковой автомобиль малого класса. Параметры автомобиля: полная масса  $m_a = 1578$  кг; распределение массы между мостами  $m_{a1} = 785$  кг,  $m_{a2} = 793$  кг; момент инерции относительно оси  $z$   $J_z = 2500$  кг·м<sup>2</sup>; колёсная база  $L = 2,492$  м; колея  $B = 1,4$  м; высота центра масс  $h_c = 0,5$  м; максимальный коэффициент сцепления  $\varphi_{x \max} = 1,0$  [4]. Коэффициент сопротивления уводу колёс переднего и заднего мостов принят одинаковым, равным 80000 Н/рад.

Скорость автомобиля  $v_a$  при выполнении манёвра «поворот  $R_{\text{п}} = 35$  м» варьировалась в пределах 40...80 км/ч с шагом 5 км/ч. Нормативное значение скорости  $v_{\text{м.н}}$  для данного автомобиля составляет 72 км/ч [7].

На рис. 3, а–в представлены графики траектории движения автомобиля при скоростях соответственно 60, 65 и 72 км/ч.

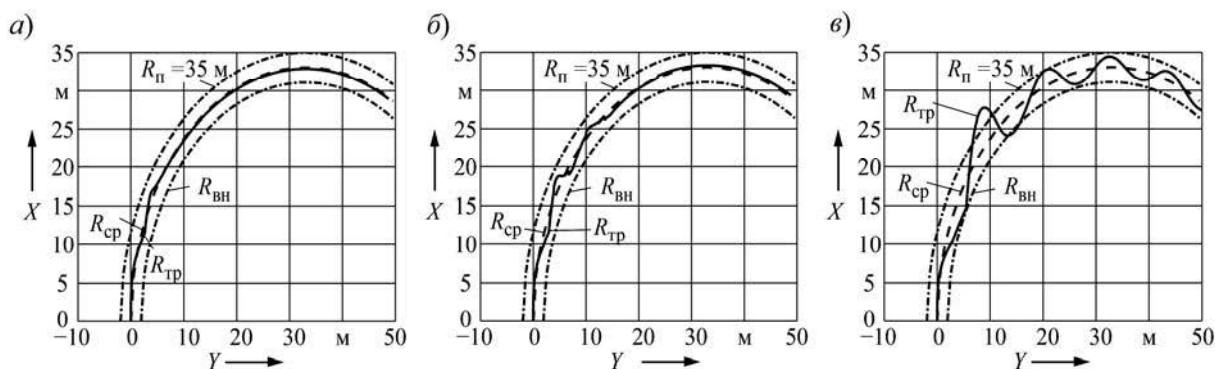


Рис. 3. Траектория движения автомобиля при выполнении манёвра «поворот  $R_{\text{п}} = 35$  м»

При увеличении скорости движения свыше некоторой величины движение становится неустойчивым, траектория  $R_{\text{тр}}$  значительно отклоняется от среднего радиуса поворотной полосы  $R_{\text{ср}}$  (см. рис. 3, в). Движение сопровождается боковым скольжением колёс и выходом за пределы границ заданной полосы. Как следует из рис. 3, в, исследуемый автомобиль не выдержал испытания «поворот  $R_{\text{п}} = 35$  м», поскольку при нормативном значении скорости  $v_{\text{м.н}}$  не обеспечивается его управляемость и устойчивость.

Однако можно отметить, что при скорости 72 км/ч постепенно удаётся удержать автомобиль в поворотной полосе посредством управляющего воздействия, изменяя угол поворота управляемых колёс  $\theta$ . При дальнейшем увеличении скорости занос становится

неизбежным и устойчивое движение на повороте оказывается невозможным.

На рис. 4, а–в показаны графики управляющих воздействий на колёса, представляющие собой функцию изменения угловой скорости поворота управляемых колёс  $\Delta\omega_{\text{у.к}}$ , град/с. Начальный участок этой функции при  $\Delta\omega_{\text{у.к}} = \text{const}$  соответствует движению автомобиля до въезда на поворотную полосу. Управление движением на поворотной полосе осуществляется посредством дискретных сигналов изменения угловой скорости  $\Delta\omega_{\text{у.к}}$ , обеспечивающих удержание траектории автомобиля в пределах коридора, ограничиваемого радиусами  $R_{\text{кор}} = R_{\text{ср}} \pm 0,5$  м.

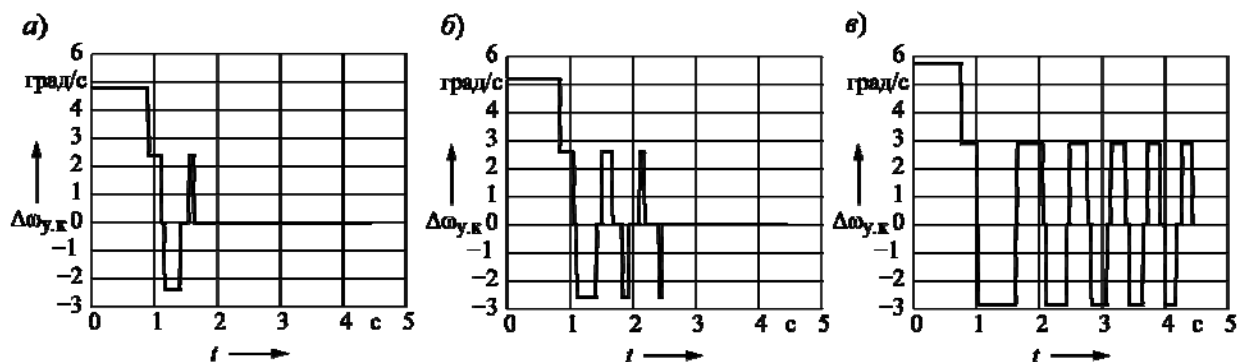


Рис. 4. Графики дискретных управляющих воздействий – изменение угловой скорости поворота колёс при движении на поворотной полосе

Изменение угла поворота управляемых колёс  $\theta$  в процессе выполнения манёвра представлено на рис. 5, а–в.

Графики на рис. 4 и 5 однозначно связаны между собой. Если траектория движения автомобиля устремляется к нижней ограничительной линии поворотной полосы, задаётся отрицательная скорость  $\Delta\omega_{\text{у.к}}$  и угол поворота колёс  $\theta$  снижается, а если к верхней линии (радиус  $R_{\text{п}}$ ), тогда скорость  $\Delta\omega_{\text{у.к}}$

положительна и угол  $\theta$  возрастает. Из рис. 4 и 5 видно, что чем выше скорость автомобиля  $v_a$ , тем чаще осуществляются управляющие воздействия.

На рис. 6, а приведены графики изменения поперечных реакций  $R_{y1}$ ,  $R_{y2}$  в зависимости от скорости автомобиля  $v_a$ , а также их ограничения по сцеплению  $R_{y1\phi}$ ,  $R_{y2\phi}$ .

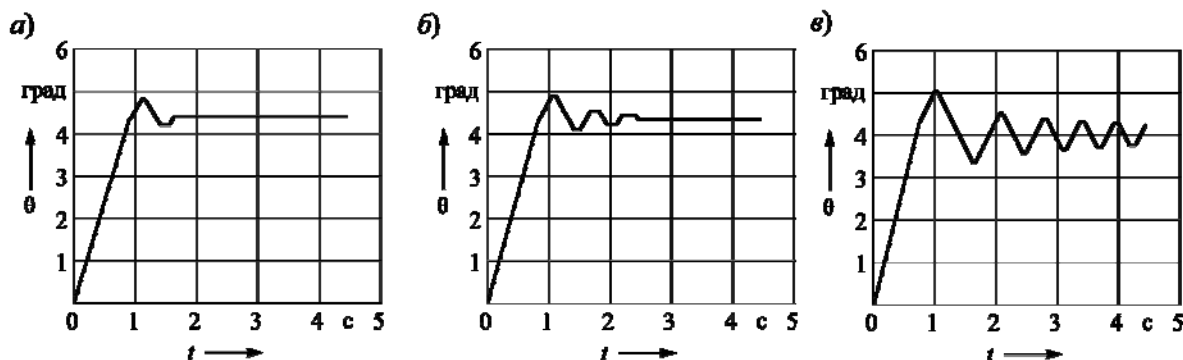


Рис. 5. Изменение угла поворота управляемых колёс при движении на поворотной полосе

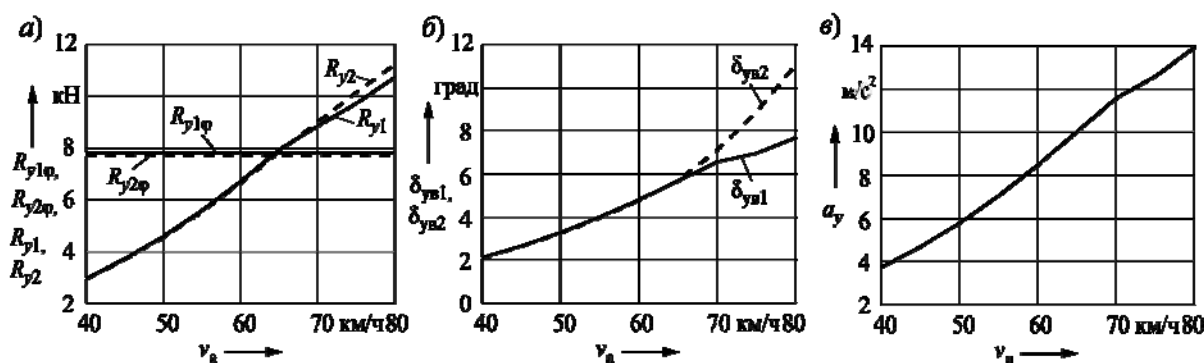


Рис. 6. Влияние скорости автомобиля на изменение поперечных реакций (а), углов увода колёс (б) и бокового ускорения (в)

При увеличении скорости свыше 64 км/ч  $R_{y1}$ ,  $R_{y2}$  превышают значения  $R_{y1\phi}$ ,  $R_{y2\phi}$  и начинается боковое скольжение колёс. Углы увода при этом быстро возрастают (рис. 6, б) и движение становится неустойчивым, требующим увеличения частоты управляющих воздействий. При  $v_a > 70$  км/ч требования к управляемости и устойчивости не обеспечиваются и наступает занос автомобиля.

На рис. 6, в показан график бокового ускорения автомобиля  $a_y$ . Значения  $R_{y1}$ ,  $R_{y2}$  зависят от силы инерции автомобиля  $F_j = m_a a_y$  и инерционного момента  $M_j = J_z \varepsilon_z$ . С увеличением скорости автомобиля  $a_y$  прогрессивно возрастает, следовательно, аналогично изменяются сила инерции и поперечные

реакции  $R_{y1}$ ,  $R_{y2}$ .

Графики изменения поперечных реакций при скоростях 60, 65 и 72 км/ч в процессе выполнения манёвра приведены соответственно на рис. 7, а–в, а на рис. 8, а–в – соответствующие им графики изменения углов увода  $\delta_{yв1}$ ,  $\delta_{yв2}$ . Устойчивое движение без заноса обеспечивается, если  $\delta_{yв2} < \delta_{yв1}$ . Из рис. 8, в видно, что при скорости 72 км/ч  $\delta_{yв2}$  превышает  $\delta_{yв1}$ , что и является условием и признаком возникновения заноса автомобиля. На этом же рисунке приведен график  $\Delta\delta_{yв2} = f(t)$ , характеризующий приращение  $\Delta\delta_{yв2}$  угла увода  $\delta_{yв2}$  вследствие бокового скольжения задних колёс автомобиля, вычисляемое по формуле (15).

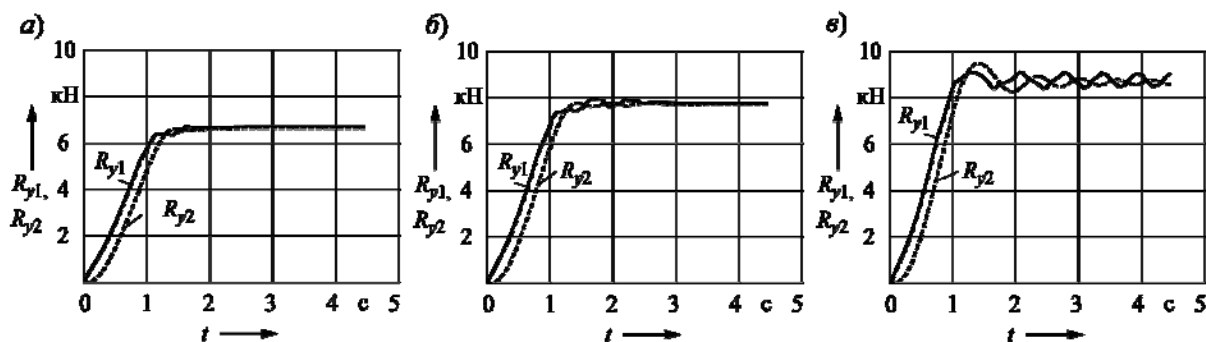


Рис. 7. Изменение поперечных реакций в процессе выполнения манёвра «поворот  $R_{\Pi} = 35$  м» на скоростях 60 км/ч (а), 65 км/ч (б) и 72 км/ч (в)

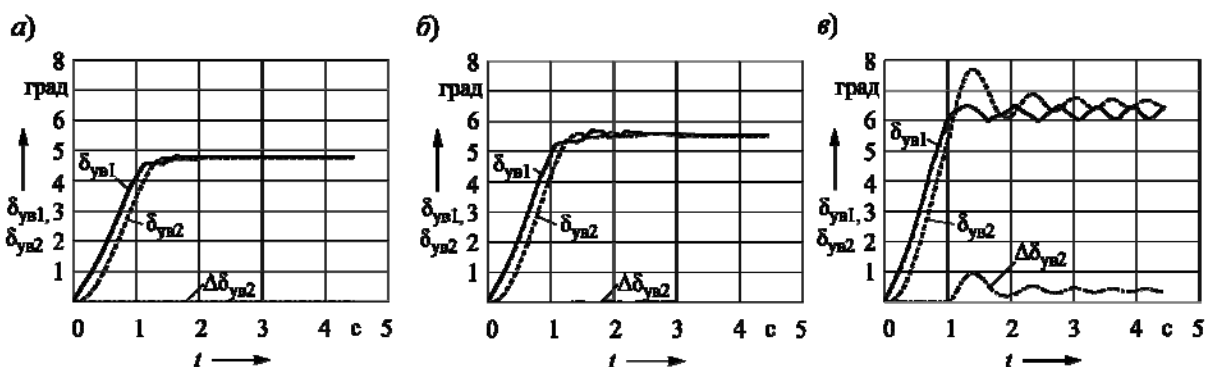


Рис. 8. Изменение углов увода передних и задних колёс в процессе выполнения манёвра «поворот  $R_{\Pi} = 35$  м» на скоростях 60 км/ч (а), 65 км/ч (б) и 72 км/ч (в)

Потеря устойчивости движения может также произойти при отрыве колёс от опорной поверхности дороги и с увеличением скорости завершиться боковым опрокидыванием автомобиля. Поэтому при выполнении манёвра «поворот  $R_{\Pi} = 35$  м» контролируется и это условие нарушения устойчивости движения. Критическая скорость по боковому опрокидыванию автомобиля  $v_{кр.оп}$  определяется по формуле

$$v_{кр.оп} = \sqrt{\frac{R_{пов} B g}{2 h_c}}, \quad (19)$$

где  $B$  – колея автомобиля;  $h_c$  – высота расположения центра масс;  $g$  – ускорение свободного падения.

Из этой формулы следует, что  $v_{кр.оп}$  определяется величиной радиуса поворота  $R_{пов}$ , которая, как отмечалось ранее, постоянно изменяется при движении на поворотной полосе вследствие подачи управляющих воздействий. Значение  $R_{пов}$  зависит от угла поворота управляемых колёс  $\theta$  и углов увода  $\delta_{yv1}$ ,  $\delta_{yv2}$  и вычисляется по формуле

$$R_{пов} = \frac{L}{\theta - \delta_{yv1} + \delta_{yv2}}. \quad (20)$$

При отсутствии бокового скольжения  $R_{пов} \approx R_{ср}$ . Тогда для моделируемого автомобиля получаем  $v_{кр.оп} = 76,7$  км/ч, что немного выше, чем критическая

скорость по боковому скольжению, равная 64 км/ч (см. рис. 6, а). Следовательно, занос автомобиля будет предшествовать возможному боковому опрокидыванию, что, безусловно, предпочтительнее, поскольку опрокидывание влечёт за собой гораздо более серьёзные последствия, чем занос.

### **Выводы**

1. Разработана математическая модель процесса движения автомобиля при выполнении манёвра «поворот  $R_{\Pi} = 35$  м», позволяющая определить предельную скорость устойчивого управляемого движения и оценить воз-

можность достижения предписываемого стандартом нормативного значения скорости данного манёвра.

2. В предложенной модели предусмотрено определение углов увода колёс при возникновении бокового скольжения, построение траектории движения автомобиля на поворотной полосе, формирование дискретных управляющих воздействий, обеспечивающих устойчивое управляемое движение.

3. Модель предназначена для использования на начальной стадии проектирования автомобиля при определении параметров, обеспечивающих выполнение технических требований на показатели управляемости и устойчивости.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Литвинов, А. С.** Управляемость и устойчивость автомобиля / А. С. Литвинов. – Москва: Машиностроение, 1971. – 416 с.
2. **Литвинов, А. С.** Автомобиль. Теория эксплуатационных свойств: учебник для вузов / А. С. Литвинов, Я. Е. Фаробин. – Москва: Машиностроение, 1989. – 240 с.
3. **Смирнов, Г. А.** Теория движения колёсных машин : учебник для вузов / Г. А. Смирнов. – Москва: Машиностроение, 1990. – 352 с.
4. **Ларин, В. В.** Теория движения полноприводных колёсных машин : учебник для вузов / В. В. Ларин. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. – 391 с.
5. **Гришкевич, А. И.** Автомобили. Теория : учебник для вузов / А. И. Гришкевич. – Минск: Высшая школа, 1986. – 208 с.
6. **Тарасик, В. П.** Теория движения автомобиля : учебник для вузов / В. П. Тарасик. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2006. – 478 с.
7. **ГОСТ 31507–2012.** Автотранспортные средства. Управляемость и устойчивость. Технические требования. Методы испытаний. – Москва: Изд-во стандартов, 2012. – 42 с.
8. **Тарасик, В. П.** Математическое моделирование технических систем : учебник / В. П. Тарасик. – Минск: Новое знание ; Москва: ИНФРА-М, 2017. – 592 с.

*Статья сдана в редакцию 20 марта 2019 года*

**Владимир Петрович Тарасик**, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет.  
E-mail: avtobru@gmail.com.

**Vladimir Petrovich Tarasik**, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University.  
E-mail: avtobru@gmail.com.

---

УДК 621.791.763.2

*С. М. Фурманов, Д. Н. Юманов, И. Н. Смоляр, И. Д. Камчицкая*

## КОМПЬЮТЕРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ С ПОМОЩЬЮ СРЕДЫ ГРАФИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ LABVIEW

---

UDC 621.791.763.2

*S. M. Furmanov, D. N. Yumanov, I. N. Smolar, I. D. Kamchitskaya*

## COMPUTER CONTROL OF THE PROCESS OF RESISTANCE WELDING IN THE LABVIEW GRAPHICAL PROGRAMMING ENVIRONMENT

---

### **Аннотация**

Разработан программный код корректирующей системы автоматического регулирования мощности тепловложения в межэлектродную зону в процессе контактной точечной и рельефной сварки. Компьютерное управление осуществляется в среде графического программирования LabVIEW. Оно заключается в ожидании нажатия на педаль сварочной машины и запуске блока цикла сварки, который с помощью таймеров-счетчиков отсчитывает интервалы времени предварительного сжатия, сварки, проковки, паузы, управляет включением катушек электропневмоклапанов сжатия и проковки. Включение сварочного тока осуществляется после отсчета предварительного сжатия путем задания напряжения управления и угла открытия тиристоров для блока управления симисторами и тиристорами ОВЕН БУСТ2.

### **Ключевые слова:**

контактная точечная и рельефная сварка, компьютерное управление процессом сварки, система автоматического регулирования мощности тепловложения, блок цикла сварки, блок управления тиристорами, угол открытия тиристоров.

### **Abstract**

The program code of the corrective system for automatic regulation of heat input to the interelectrode zone in the process of resistance spot welding and resistance projection welding was developed. The computer control is carried out in the LabVIEW graphical programming environment. It comprises the wait to press the welding machine pedal and the start of the welding cycle unit, which, by means of timers-counters, counts time intervals for pre-compression, welding, peening and pause, as well as controls the activation of coils of electropneumatic valves of compression and peening. The welding current is switched on after the time of preliminary compression is counted, by setting the control voltage and changing the opening angle of the  $\alpha$  thyristor contactor.

### **Keywords:**

resistance spot welding and resistance projection welding, computer control of the welding process, automatic heat input control system, welding cycle unit, thyristor control unit, thyristor opening angle.

---

Компьютерное управление процессом контактной сварки позволяет обеспечить не только точное воспроизведение режима сварки и контроль основных параметров режима (сварочный ток, напряжение между электродами, усилие сжатия электродов), но и генерировать принципиально новые законы регулирования, которые в дальнейшем могут ис-

пользоваться при построении серийных контроллеров контактной сварки.

Компьютерная диагностика и управление контактной сваркой обеспечивают существенное повышение качества благодаря использованию большого объема данных и вычислительных алгоритмов при помощи автоматизированной системы на базе персонального

компьютера [1].

ЭВМ в связке с микроконтроллером становится универсальным инструментом для реализации алгоритмов управления любой сложности, при этом экономятся материальные затраты на другие дорогостоящие аппаратные средства и модернизацию устройства самой сварочной машины [2]. Вместе с тем существует возможность детальной записи и последующего замедленного воспроизведения необходимого потока данных, получаемого в процессе сварки, с их дальнейшим анализом.

Практический интерес имеют регистрация и измерение мощности тепловложения в межэлектродную зону в процессе сварки. Для измерения этого параметра необходимо знать величину сварочного тока и напряжения на участке электрод – электрод. Мощность тепловложения в свариваемые детали достаточно полно характеризует протекание процесса сварки и позволяет с большей достоверностью прогнозировать качество получаемого соединения.

Среда графического программирования LabVIEW предназначена для разработки виртуальных прототипов реальных систем управления, создания терминалов управления, отладки прототипов систем в интерактивном режиме и внедрения их в реальные устройства под управлением персональной ЭВМ. Программа LabVIEW позволяет не только имитировать электротехнические приборы, датчики, регуляторы, но и программировать ход протекающих через них электрических сигналов. Это возможно благодаря мощной инструментальной библиотеке данного программного продукта [3].

Структурная схема программного кода корректирующей системы автоматического регулирования мощности тепловложения в межэлектродную зону при контактной сварке представлена на рис. 1.

Запуск машины контактной сварки осуществляется нажатием на педаль пуска SB1. При этом в программе

срабатывает цифровой триггер PFI 0 (разъём J1\_DIO) и запускает блок цикла сварки, который с помощью таймеров-счетчиков отсчитывает интервалы времени предварительного сжатия, сварки, проковки, паузы. Блок цикла управляет включением катушек электропневмоклапанов сжатия и проковки (ЭПК 1 и ЭПК 2), а также включением сварочного тока цифровым триггером PFI 1 (разъём J1\_DIO) заданием напряжения управления  $U_u$  и, соответственно, угла открытия тиристоров  $\alpha$  для блока управления тиристорами ОВЕН БУСТ2.

Блок БУСТ2 открывает тиристоры с начальным углом управления  $\alpha_n = \alpha_{\max}$  и подключает трансформатор сварочный ТС к сети, во вторичной цепи которого начинает протекать сварочный ток. Во время сварки измеряются сетевое напряжение  $u_1$  трансформатором TV2 (аналоговый вход AI0–AIGND, несимметричная заземленная схема подключения RSE, разъём J2\_AI), напряжение межэлектродной зоны  $u_{\text{ЭЭ}}$  (дифференциальный аналоговый вход AI2 – AI10 DIFF) и сварочный ток  $i_2$  (дифференциальный аналоговый вход AI3 – AI11) с помощью датчиков тока и напряжения.

Начало расчета действующих значений (RMS) параметров  $U_1$ ,  $U_{\text{ЭЭ}}$ ,  $I_2$  определяется с помощью аналогового триггера на входе APFI 0 (Start Analog Edge), уровень срабатывания которого задается выражением [1]

$$\frac{U_{\text{СМ}}}{K_T} \cdot \cos \varphi, \quad (1)$$

где  $U_{\text{СМ}}$  – амплитудное значение напряжения сети;  $K_T$  – коэффициент трансформации вспомогательного измерительного трансформатора TV2,  $K_T = 76$ .

Начало расчета действующих значений (RMS) совпадает с переходом через ноль установившегося многофазного (принужденного) тока  $i_{\text{пр}}$  [2, 4–6].

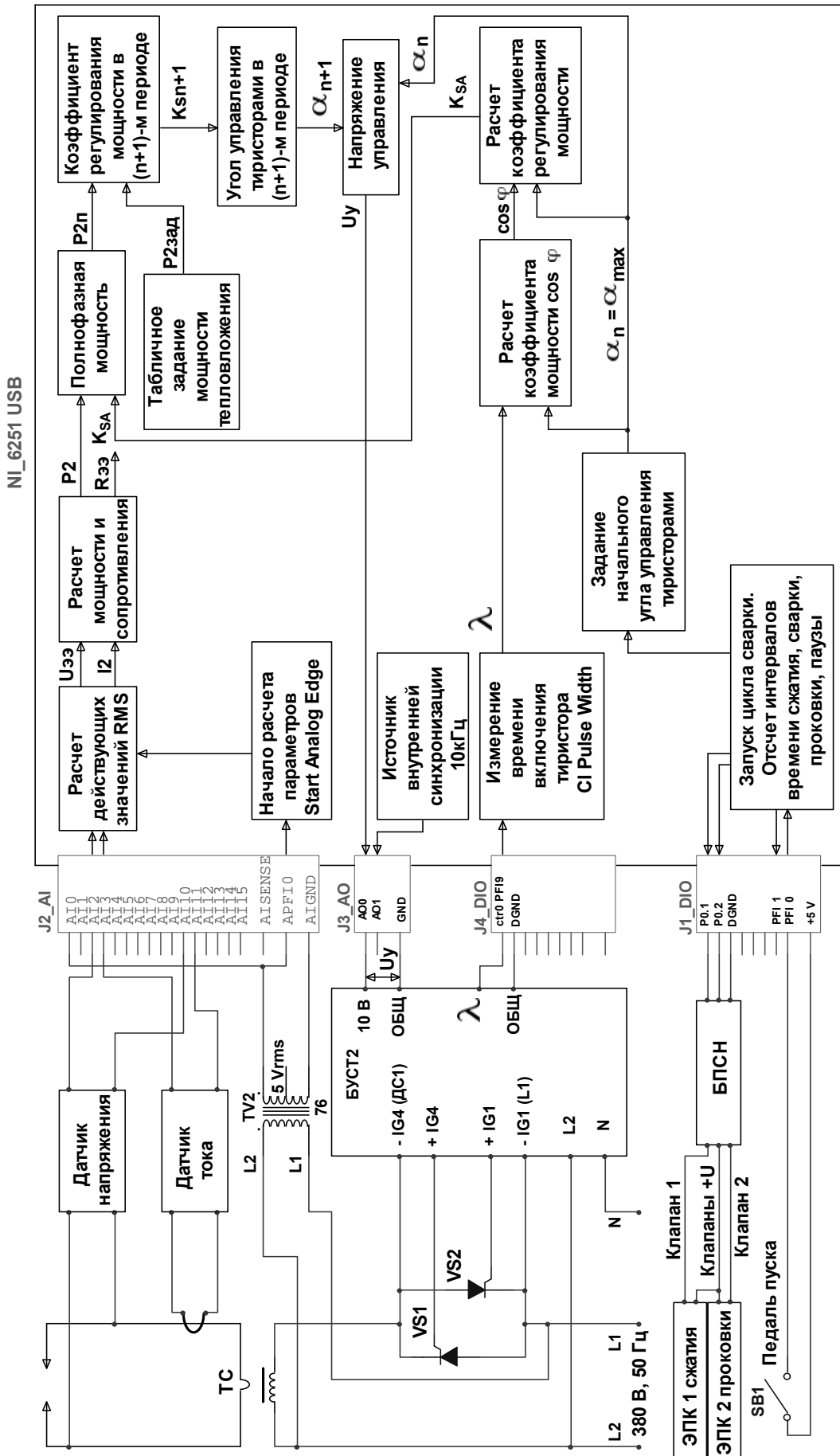


Рис. 1. Структурная схема программы корректирующей системы автоматического регулирования мощности тепловложения в межэлектродную зону при контактной сварке



На основании  $U_{\text{ЭЭ}}$  и  $I_2$  рассчитываются мощность тепловложения  $P_2 = U_{\text{ЭЭ}}I_2$  и сопротивление межэлектродной зоны  $R_{\text{ЭЭ}} = U_{\text{ЭЭ}} / I_2$  в текущем полупериоде.

Во время протекания тока блок БУСТ2 формирует прямоугольный импульс, равный по времени длительности включенного состояния тиристоров  $\lambda$ . Этот сигнал поступает на вход счетчика  $\text{ctr0 PFI9}$  (разъем J4\_DIO), с помощью которого осуществляется измерение ширины импульса  $\lambda$  (CI Pulse Width).

Далее на основании начального угла управления тиристорами  $\alpha_n = \alpha_{\text{max}}$  и длительности включенного состояния тиристоров  $\lambda$  по аппроксимирующей зависимости определяется коэффициент мощности  $\cos\varphi = f(\alpha_n, \lambda)$  сварочной машины [3].

Расчет коэффициента регулирования мощности происходит по аппроксимирующей зависимости  $k_{SA} = f(\alpha_n, \cos\varphi)$  [1, 3].

Зная коэффициент регулирования мощности  $k_{SA}$  и мощность тепловложения  $P_2$  в текущем полупериоде, можно найти полнофазную мощность  $P_{2П} = P_2/k_{SA}$ .

Задание мощности тепловложения  $P_{2\text{Зад}}$  осуществляется в табличном виде с интервалом 10 мс, равным полупериоду сетевого напряжения.

Таким образом, коэффициент регулирования мощности  $k_{Sn+1}$  в следующем  $(n + 1)$ -м периоде можно найти из соотношения  $k_{Sn+1} = P_{2\text{Зад}} / P_{2П}$ . Зная коэффициент  $k_{Sn+1}$ , можно определить угол управления тиристорами в  $(n + 1)$ -м периоде  $\alpha_{n+1}$  и сформировать напряжение управления  $U_u$  для блока БУСТ2 на аналоговом выходе АОО–GND (разъем J3\_AO).

Далее процесс пересчета повторяется в соответствии с заданной мощностью  $P_{2\text{Зад}}$ . Выключение тока происходит при задании нулевой мощности, при этом начинается отчет времени проковки сварного соединения. После выдержки паузы между сварками циклограмма

процесса запускается сначала.

Для отработки циклограммы сварки используется виртуальный блок цикла сварки, построенный на основе кадровой последовательности «Stacked Sequence Structure». В каждом кадре формируется цикл «While Loop», который повторяет диаграмму внутри него до тех пор, пока не появится логический сигнал выхода из цикла.

В первом цикле структуры происходит ожидание нажатия педали и запуск циклограммы сварки (рис. 2). При нажатии на педаль срабатывает цифровой триггер PFI 0/P1.0 (см. рис. 1). Блок «Convert to Dynamic Data» преобразует цифровой сигнал триггера в логический тип «Boolean» («TRUE» или «FALSE»). При появлении сигнала «TRUE» происходит завершение данного цикла и переход к следующему. Кроме того, в первом цикле осуществляется построение массива логических цифровых сигналов («Build Array») для управления электропневмоклапанами сжатия (Кл. 1), проковки (Кл. 2) и включения сварочного тока. Начальное значение всех цифровых сигналов – «FALSE».

Во втором цикле происходит задание и отсчет времени предварительного сжатия электродов с помощью таймера «Elapsed Time» (рис. 3). Если значение входа «Set Start Time (s)» равно 0, текущее абсолютное время используется как время начала отсчета. При этом задается логический сигнал «TRUE» управления клапаном сжатия, срабатывает цифровой выход P0.1 (см. рис. 1) и электроды сварочной машины сжимаются с усилием сжатия  $F_{\text{СЖ}}$ .

На входе «Time Target (s)» задается время предварительного сжатия, по истечении которого на выходе «Time has Elapsed» устанавливается высокий уровень «TRUE», и цикл завершается.

В третьем цикле задается и отсчитывается время протекания сварочного тока (рис. 4). Для непрерывной работы таймера «Elapsed Time2» начало отсчета

на входе «Set Start Time (s)» совпадает с отсчетом времени предварительного сжатия в предыдущем цикле, а на входе

«Time Target (s)» устанавливается сумма времени предварительного сжатия и времени протекания тока.

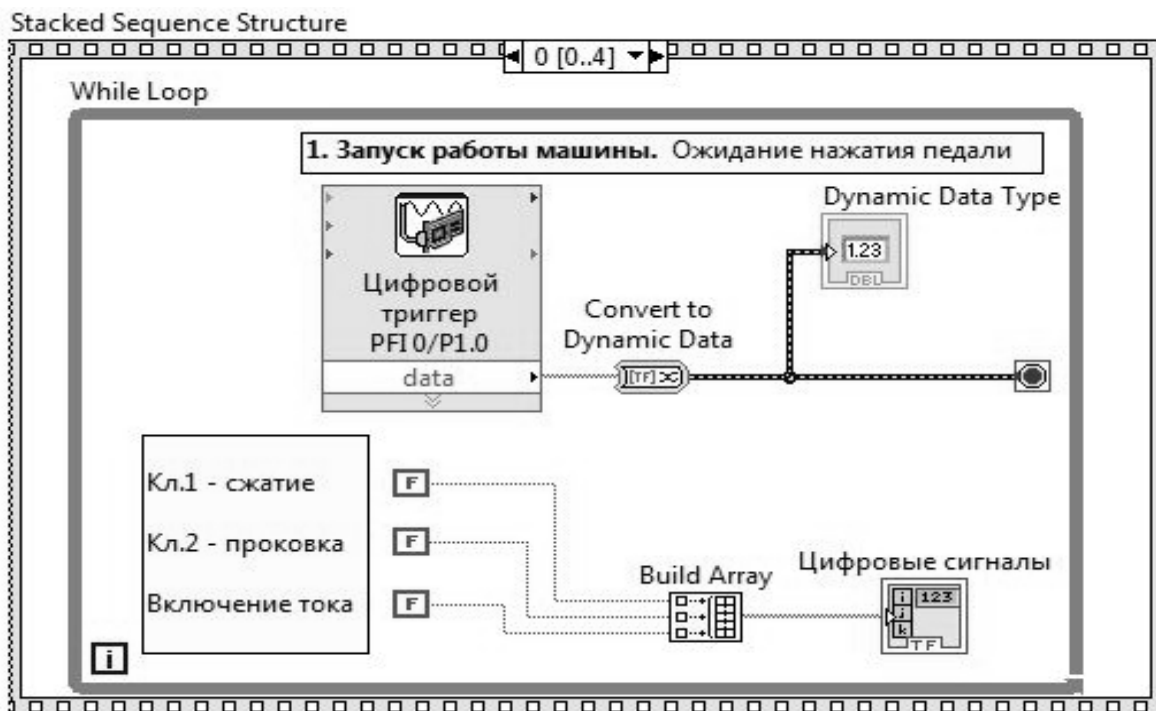


Рис. 2. Ожидание нажатия педали и запуск циклограммы сварки

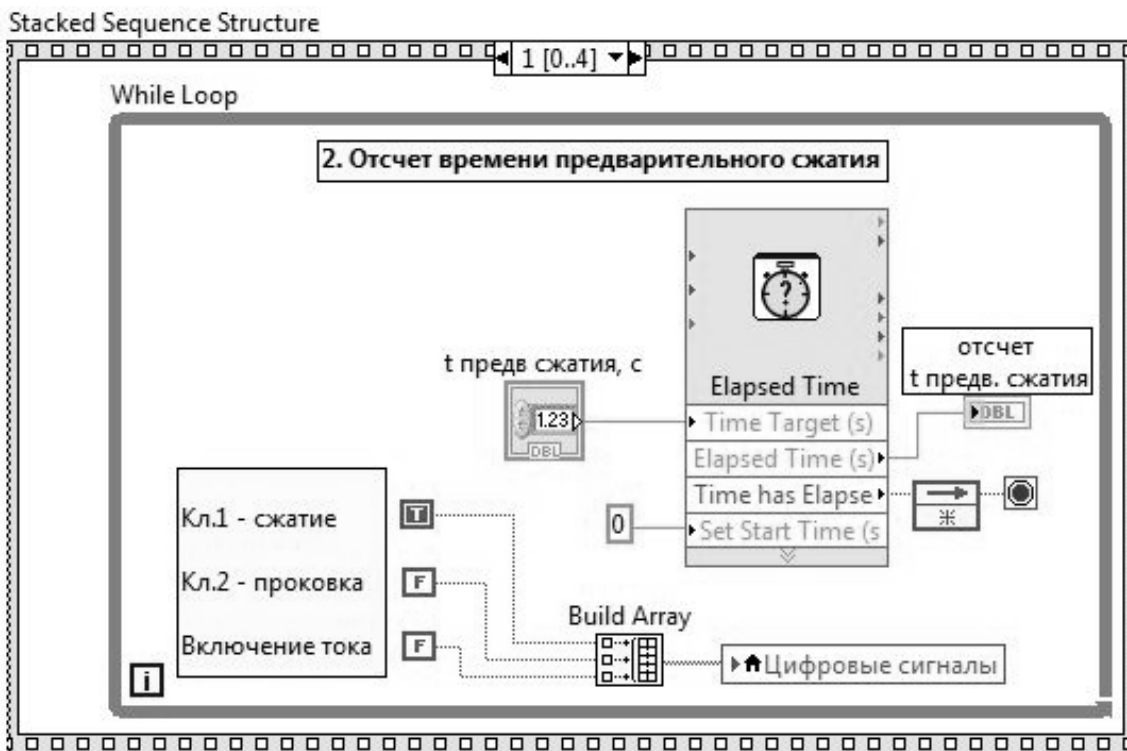


Рис. 3. Задание времени предварительного сжатия электродов

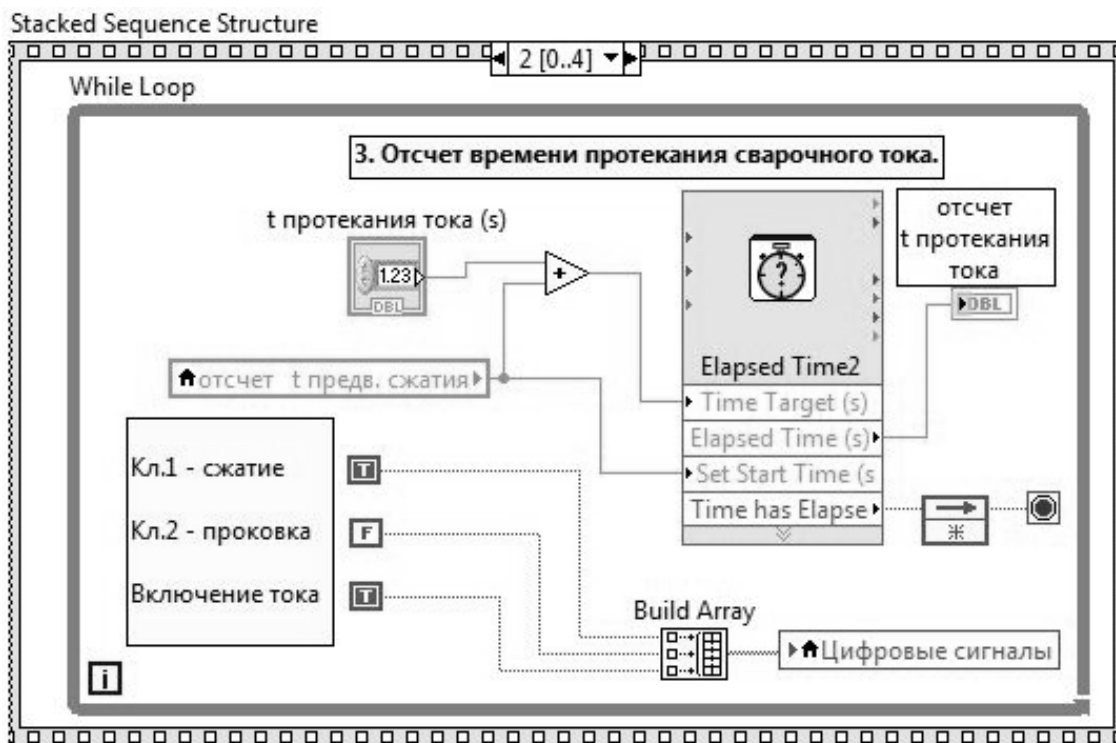


Рис. 4. Задание времени протекания сварочного тока

Включение тока осуществляется логическим сигналом «TRUE», при этом срабатывает цифровой триггер PFI 1/P1.1 (см. рис. 1). Далее идет задание мощности  $P_{23ад}$  в табличном режиме с интервалом 10 мс и формирование сигнала управления  $U_y$  блока БУСТ2 с коррекцией в каждом полупериоде сварочного тока. Для гарантированного выключения тока на последнем интервале продолжительности сварки должна быть задана нулевая мощность для обнуления аналогового выхода А00–GND.

В четвертом цикле начинается проковка сварного соединения. Для непрерывной работы таймера «Elapsed Time3» начало отсчета на входе «Set Start Time (s)» устанавливается равным сумме времен предварительного сжатия и протекания тока, а на входе «Time Target (s)» к ним добавляется время проковки (рис. 5). При этом задается логический сигнал «TRUE» управления клапаном проковки, срабатывает цифровой выход P0.2 (см. рис. 1) и к сварному соединению прикладыва-

ется повышенное усилие проковки  $F_{ков}$ . Цикл завершается после отсчета времени проковки.

Заканчивается кадровая последовательность пятым циклом задания времени паузы между сварками. При этом для всех логических сигналов задается низкий уровень «FALSE», электроды сварочной машины разжимаются (рис. 6). Для таймера «Elapsed Time4» начало отсчета на входе «Set Start Time (s)» устанавливается равным сумме времен предварительного сжатия, протекания тока и проковки, а на входе «Time Target (s)» к ним добавляется время паузы. Если программа LabVIEW запущена командой «Run», то после отсчета времени паузы процесс сварки останавливается, обрабатывается режим «Одиночная сварка», если команда запуска – «Run Continuously», то при удержании педали пуска устанавливается режим «Автоматическая сварка» с многократным повторением через заданную паузу между сварками.

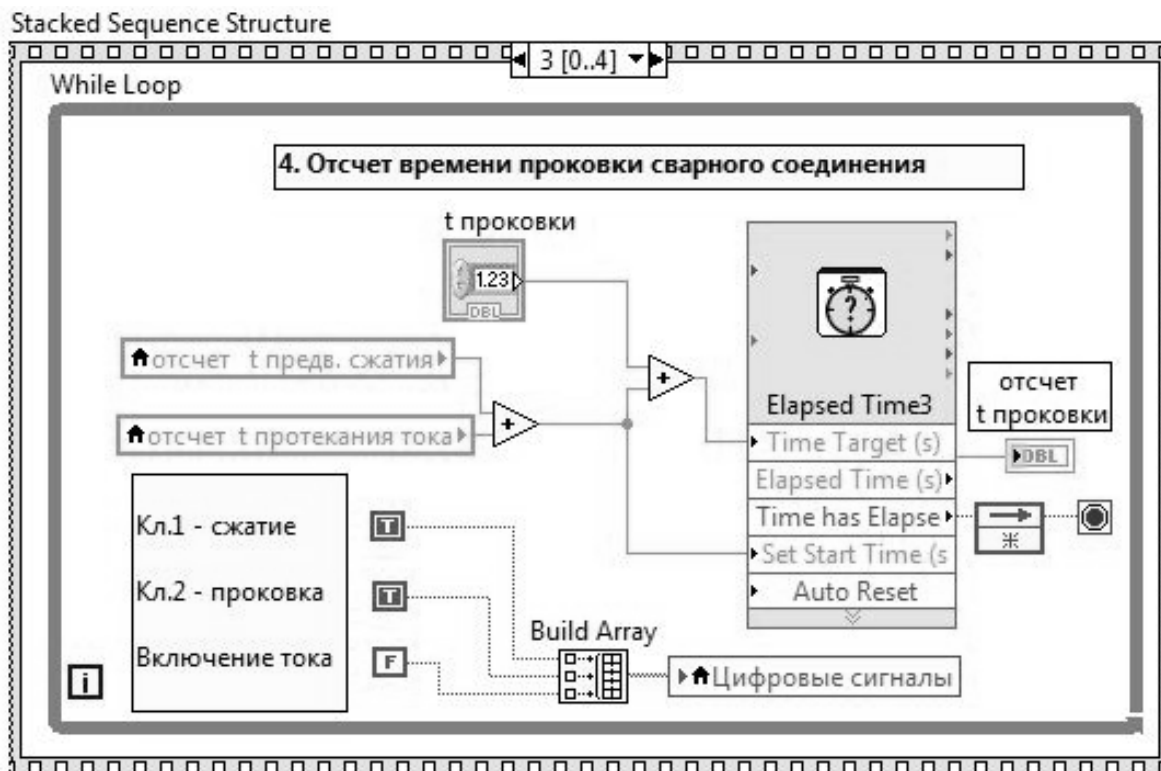


Рис. 5. Задание времени проковки сварного соединения

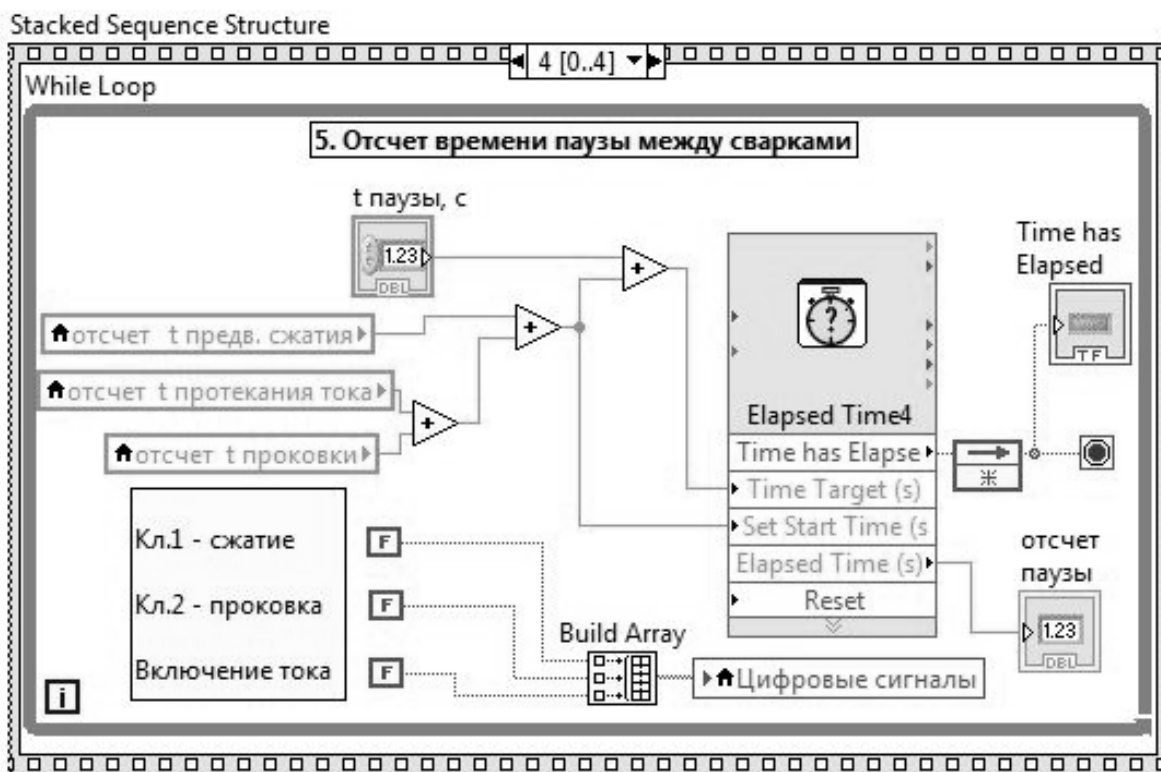


Рис. 6. Задание времени паузы между сварками

В процессе выполнения кадровой последовательности создается локальная переменная «Цифровые сигналы», которая используется для формирования в отдельном цикле цифровых выходов P0.1 (сжатие), P0.2 (проковка) и триггера PFI 1/P1.1 (включение тока) (рис. 7). Еще одна локальная переменная «Time has Elapsed» используется для перезапуска программы и сброса таймеров во время отсчета паузы между сварками. В начале выполнения пятого цикла последовательности (см. рис. 6) логический

сигнал «Time has Elapsed» сбрасывается в нулевое значение «FALSE», при этом цикл формирования цифровых выходов (см. рис. 7) останавливается, т. к. через инвертор «Not» срабатывает условие завершения цикла.

После отсчета паузы сигнал «Time has Elapsed» снова устанавливается в высокое состояние «TRUE» и разрешает работу цикла формирования цифровых выходов, при этом таймеры начинают отсчет сначала.

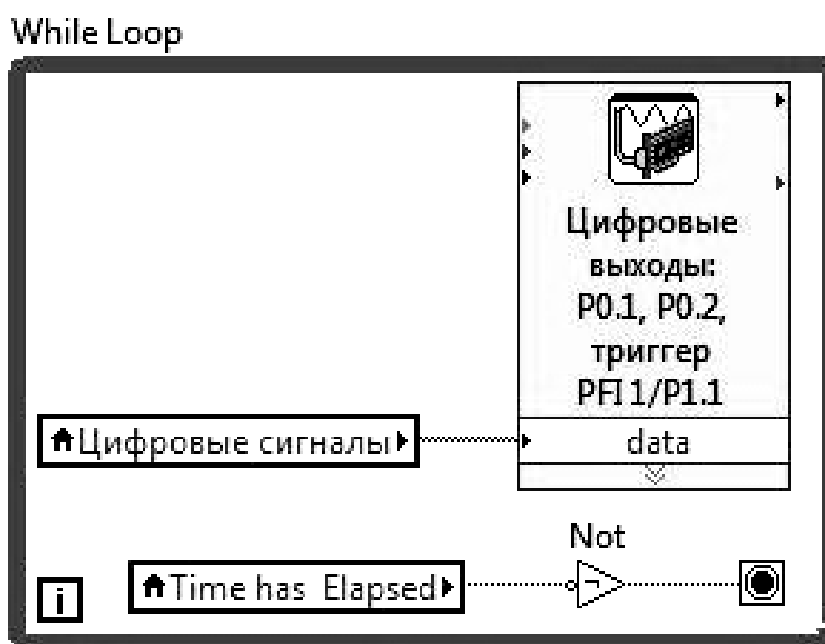


Рис. 7. Цикл формирования цифровых выходов и сброса таймеров во время отсчета паузы между сварками

Таким образом, разработанный программный код корректирующей системы автоматического регулирования мощности тепловложения в межэлектродную зону в процессе контактной точечной и рельефной сварки позволяет осуществлять запуск блока цикла сварки, отсчитывать интервалы времени предварительного сжатия, сварки, проковки, паузы, управлять включением катушек электропневмоклапанов сжатия и проковки, а также включением сварочного тока с коррекцией мощности

тепловложения в зону сварки в каждом полупериоде сетевого напряжения.

### Выводы

1. Разработана структурная схема программного кода корректирующей системы автоматического регулирования мощности тепловложения в межэлектродную зону в процессе контактной точечной и рельефной сварки, осуществляющая компьютерное управление в среде графического программирования LabVIEW.

2. Для отработки циклограммы сварки разработан виртуальный блок цикла сварки, осуществляющий ожидание нажатия на педаль сварочной машины, отсчет с помощью таймеров-счетчиков интервалов времени предварительного сжатия, сварки, проковки и паузы, управление включением катушек электропневмоклапанов сжатия и проковки, а также включением сварочного тока путем задания напряжения управ-

ления  $U_y$  и угла открытия  $\alpha$  тиристорного контактора.

3. Разработанная корректирующая система автоматического регулирования позволяет осуществлять коррекцию мощности тепловложения в межэлектродную зону в процессе контактной точечной и рельефной сварки в каждом полупериоде сетевого напряжения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. О фазовом регулировании мощности тепловложения в межэлектродную зону при контактной сварке / С. М. Фурманов, А. Ю. Поляков, Д. Н. Юманов, А. Н. Кухарев // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2018. – № 1. – С. 80–91.
2. **Климов, А. С.** Контактная сварка. Вопросы управления и повышения стабильности качества / А. С. Климов. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 216 с.
3. Аппаратная реализация корректирующей системы регулирования мощности тепловложения при контактной рельефной сварке / С. М. Фурманов, Б. В. Федотов, Д. Н. Юманов, И. Н. Смоляр // Сварка и Диагностика. – 2018. – № 5. – С. 35–40.
4. **Глебов, Л. В.** Устройство и эксплуатация контактных машин / Л. В. Глебов, Ю. И. Филиппов, П. Л. Чулошников. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1987. – 312 с.
5. **Патон, Б. Е.** Электрооборудование для контактной сварки. Элементы теории / Б. Е. Патон, В. К. Лебедев. – Москва: Машиностроение, 1969. – 440 с.
6. Оборудование для контактной сварки: справочное пособие / Под ред. В. В. Смирнова. – Санкт-Петербург: Энергоатомиздат, Санкт-Петербургское отд-ние, 2000. – 848 с.

*Статья сдана в редакцию 5 марта 2019 года*

**Сергей Михайлович Фурманов**, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.  
**Дмитрий Николаевич Юманов**, аспирант, Белорусско-Российский университет.  
**Иван Николаевич Смоляр**, студент, Белорусско-Российский университет.  
**Ирина Дмитриевна Камчицкая**, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.

**Sergei Mikhailovich Furmanov**, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.  
**Dmitry Nikolayevich Yumanov**, PhD student, Belarusian-Russian University.  
**Ivan Nikolayevich Smolar**, student, Belarusian-Russian University.  
**Irina Dmitriyevna Kamchitskaya**, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.

---

УДК 621.9

*Д. Г. Шатуров*

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТЕЙ РЕЗАНИЯ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ  
НАИБОЛЬШУЮ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ И НАИМЕНЬШУЮ  
СЕБЕСТОИМОСТЬ**

---

UDC 621.9

*D. G. Shaturov*

**DETERMINATION OF CUTTING SPEEDS ENSURING THE HIGHEST  
PRODUCTIVITY AND THE LOWEST COST**

---

**Аннотация**

Предложены методики расчёта и получены зависимости для определения скоростей резания, обеспечивающих максимальную производительность и минимальную себестоимость при токарной обработке валов. Показано влияние режимов резания: подачи, величины снимаемого припуска и скорости резания на производительность и себестоимость чистовой и черновой обработки.

**Ключевые слова:**

резец, скорость резания, стойкость инструмента, производительность, себестоимость.

**Abstract**

Methods of calculation are proposed, and dependencies are presented to determine cutting speeds ensuring the maximum productivity and the minimum cost during shaft turning. It is shown how the cutting conditions, such as feed, stock removal rate and cutting speed, affect productivity and cost of finishing and roughing machining.

**Keywords:**

cutter, cutting speed, tool life, productivity, cost.

---

При проектировании технологического процесса обработки поверхностей валов задача состоит в выборе оптимального варианта режима резания. Назначение режимов резания осуществляют в следующей последовательности [6, с. 193]. Вначале назначают глубину резания  $t$  исходя из характера операции. Затем выбирают подачу  $S$  с учётом требований по шероховатости поверхности. В конце определяют скорость резания, обеспечивающую, в зависимости от поставленной цели, максимальную стойкость инструмента или максимальный ресурс его работы, максимальную производительность или мини-

мальную себестоимость операции. Первые две цели рассмотрены в [1–3]. Отметим, что, по результатам исследований профессора А. Д. Макарова, назначение величины скорости резания «должно начинаться не с выбора оптимального периода стойкости, а с выбора оптимальной скорости резания. Тогда период стойкости инструмента будет также оптимальным» [8, с. 87].

Скорость резания, при которой обеспечивается наибольший съём материала в единицу времени, называется скоростью резания наибольшей производительности [11, с. 49].

$$q = \frac{W}{T_0 + t_{см}} = \frac{1000tSVT_0}{T_0 + t_{см}}, \quad (1)$$

где  $W$  – объём материала, снимаемого за период стойкости инструмента, мм<sup>3</sup>;  $q$  – удельный объём материала, снимаемого в единицу времени, мм<sup>3</sup>/мин;  $T_0$  – период стойкости инструмента, мин;  $t$  – глубина резания, мм;  $S$  – подача, мм/об;  $V$  – скорость резания, м/мин;

$t_{см}$  – время на смену инструмента, наладку станка и периодических поднастроек резца на размер, отнесённое к периоду стойкости инструмента, мин.

Период стойкости инструмента от скорости резания  $T_0 = f(V)$  изменяется по куполообразной кривой, имеющей экстремальное значение периода стойкости при скорости  $V_0$  и точки перегиба (рис. 1) [1, 3].

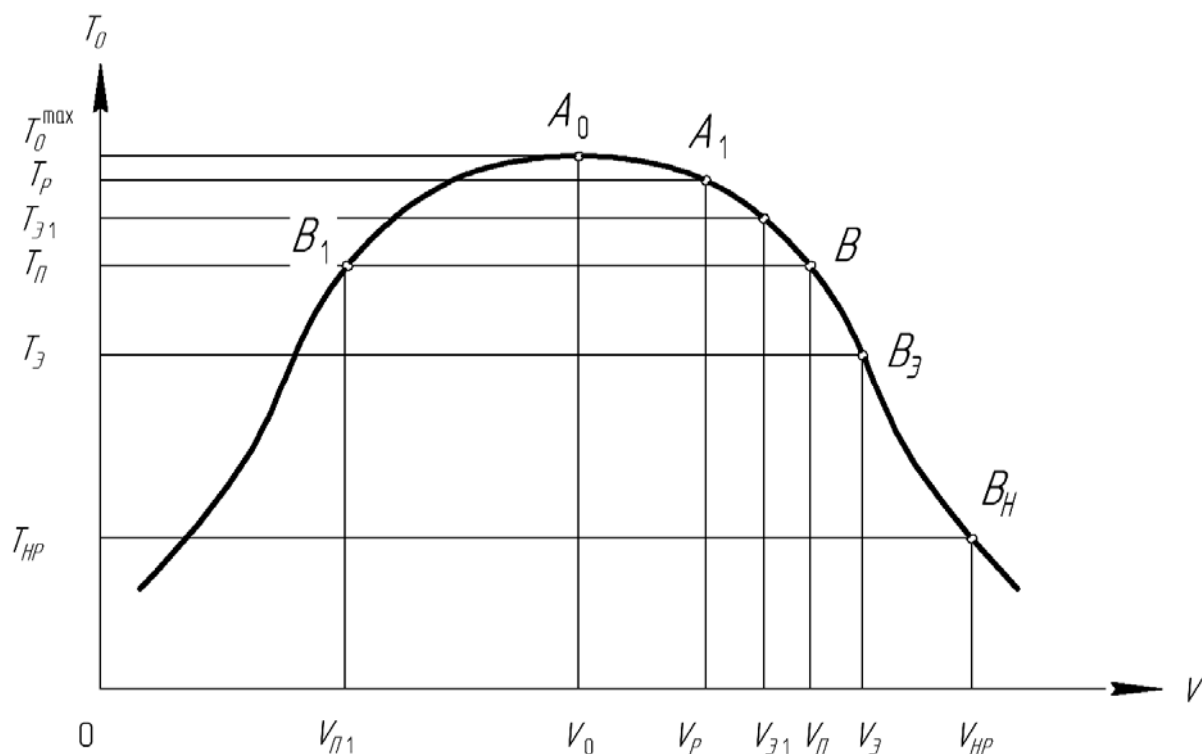


Рис. 1. Зависимость периода стойкости лезвийного инструмента от скорости резания

Это обусловлено тем, что области скоростей резания, примыкающие слева и справа к скорости резания  $V_0$  наибольшего периода стойкости и влияющие на изменение температуры в зоне резания, определяют один и тот же абразивно-окислительный вид износа рабочих поверхностей резца. Разница состоит в том, что при увеличении скорости резания  $V$  до величины  $V_0$  окисление, т. е. восстановление окисной плёнки, является преобладающим, а при увеличении скорости резания  $V > V_0$  преобладает разрушение окисной плён-

ки и абразивно-окислительный вид износа постепенно переходит в фазу диффузионного с резким уменьшением стойкости инструмента [8, с. 8].

Предполагая, что кривая периода стойкости  $T_0$  от скорости резания  $V$  имеет форму, идентичную кривой нормального распределения, можно записать [9]

$$T_0 = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\frac{(x-a)^2}{\sigma^2}}, \quad (2)$$



где  $a$  – точка максимума и одновременно центр симметрии,  $a = V_0$ ;  $X = V$  – текущая ордината изменения скорости резания;  $\sigma$  – расстояние от центра симметрии до точки  $B$  – перегиба кривой  $T_0 = f(V)$  (см. рис. 1) [9, 12].

$$\sigma = V_n - V_0. \quad (3)$$

Одновременно ордината точек перегиба [12, с. 48]

$$V_B = T_n = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi e}}.$$

Откуда

$$\sigma = \frac{1}{T_n \sqrt{2\pi e}}. \quad (4)$$

Подставив (3) и (4) в (2), получим известную зависимость [1, 2]

$$T_0 = \frac{T_n \sqrt{e}}{e^{\frac{1}{2} \left( \frac{V - V_0}{V_n - V_0} \right)^2}}, \quad (5)$$

где

$$V_n = C^{1,25} \left( \frac{U_0}{1000 \delta_0 K_p} \right)^{0,25}; \quad (6)$$

$$T_n = \frac{1000 \delta_0 K_p}{V_n U_0}; \quad (7)$$

$$C = \frac{C_v K_v}{t^x S^y}; \quad (8)$$

$$V_0 = 0,8 V_n; \quad (9)$$

$$K_p = \frac{\sin \varphi + \sin \varphi_1}{\sin(\varphi + \varphi_1)} \operatorname{tg} \alpha_3, \quad (10)$$

где  $V_0$  – скорость резания, соответствующая

максимальному периоду стойкости, м/мин;  $V_n$  – скорость резания в точке перегиба кривой  $T_0 = f(V)$ , м/мин;  $T_n$  – период стойкости при скорости резания  $V = V_n$ , мин;  $U_0$  – величина относительного размерного износа лезвия реза, мкм/км;  $U_0 = 5 \dots 7$  мкм/км при обработке стали резцом T15K6 [7];  $\delta_0$  – оптимальная величина износа задней поверхности реза, мкм;  $\varphi_1, \varphi$  – главный и вспомогательный углы в плане реза, град;  $\alpha_3$  – угол заточки задней поверхности реза, град;  $C_v, K_v, x, y$  – коэффициенты и показатели степени, определяемые из [7].

После подстановки значения  $V_0$  (9) в (5) имеем [1, 2]

$$T_0 = \frac{T_n \sqrt{e}}{e^{\frac{1}{2} \left( 5 \frac{V}{V_n} - 4 \right)^2}}. \quad (11)$$

Для получения скорости резания наибольшей производительности возьмём производную  $dq/dV$  (1) и приравняем её к нулю. При использовании зависимости (11) в этом случае приходим к решению уравнения третьей степени, что усложняет задачу. Для упрощения решения разложим знаменатель в формуле (11) в ряд, беря только два члена разложения [9]. Тогда зависимость (11) примет следующий вид:

$$T_0 = \frac{T_n \sqrt{e}}{1 + \frac{1}{2} \left( 5 \frac{V}{V_n} - 4 \right)^2}. \quad (12)$$

После подстановки (12) в (1) можно записать

$$q = \frac{1000 t S V}{1 + \frac{t_{cm}}{T_n \sqrt{e}} \left[ 1 + \frac{1}{2} \left( 5 \frac{V}{V_n} - 4 \right)^2 \right]}. \quad (13)$$

Тогда

$$\frac{dq}{dV} = \frac{1000tS \left\{ 1 + \frac{t_{cm}}{T_n \sqrt{e}} \left[ 1 + \frac{1}{2} \left( 5 \frac{V}{V_n} - 4 \right)^2 \right] - \frac{V t_{cm}}{T_n \sqrt{e}} \left( 5 \frac{V}{V_n} - 4 \right) \frac{5}{V_n} \right\}}{\left\{ 1 + \frac{t_{cm}}{T_n \sqrt{e}} \left[ 1 + \frac{1}{2} \left( 5 \frac{V}{V_n} - 4 \right)^2 \right] \right\}^2} = 0.$$

Поскольку в этом выражении знаменатель не равен нулю, то тогда должен быть равен нулю числитель. Откуда после сокращений получаем

$$1 + \frac{t_{cm}}{T_n \sqrt{e}} \left[ 1 + \frac{1}{2} \left( 5 \frac{V}{V_n} - 4 \right)^2 \right] - V \left( 5 \frac{V}{V_n} - 4 \right) \frac{5}{V_n} = 0.$$

После преобразований имеем

$$V^2 = \frac{2}{25} \left( \frac{T_n \sqrt{e}}{t_{cm}} + 9 \right) V_n^2. \quad (14)$$

Тогда скорость резания, соответствующая наибольшей производительности,

$$V_{nn1} = V_n K_{m1}, \quad (15)$$

где

$$K_{m1} = \frac{1}{5} \sqrt{2 \left( \frac{T_n \sqrt{e}}{t_{cm}} + 9 \right)}, \quad (16)$$

где  $V_{nn1}$  – скорость резания наибольшей производительности, м/мин;  $K_{m1}$  – коэффициент скорости наибольшей производительности.

Подставив (15) в (11), получим значение периода стойкости лезвийного инструмента при скорости резания  $V_{nn}$  наибольшей производительности

$$T_1 = K_{T1} T_n; \quad (17)$$

$$K_{T1} = e^{\frac{1}{2} [1 - (5K_{m1} - 4)^2]}, \quad (18)$$

где  $T_1$  – период стойкости при скорости резания наибольшей производительности;  $K_{T1}$  – коэффициент стойкости наибольшей производительности.

Анализ зависимости (16) показывает, что при отношении  $T_n/t_{cm} = 2,12$  или  $t_{cm} = 0,471 T_n$  коэффициент  $K_{m1} = 1,0$  и  $V_{nn1} = V_n$ . При отношении  $T_n/t_{cm} < 2,12$  и в случае  $T_n/t_{cm} > 2,12$  получаем соответственно  $V_{nn1} < V_n$  и  $V_{nn1} > V_n$  (табл. 1).

Табл. 1. Зависимость коэффициентов  $K_{m1}$ ,  $K_{\varepsilon 1}$  и  $K_{T1}$  от отношения  $T_n/t_{cm}$

$T_n/t_{cm}$	1,0	1,5	2,12	3	4	4,62	5	10
$K_{m1}$	0,923	0,958	1,0	1,06	1,117	1,153	1,175	1,43
$K_{\varepsilon 1}$	0,885	0,902	0,923	0,952	0,982	1,0	1,01	1,137
$K_{T1}$	1,365	1,207	1,0	0,708	0,469	0,347	0,284	0,012
$V \leq V_n$ (рабочий диапазон)				$V > V_n$				

При использовании современных станков с ЧПУ и обрабатывающих центров стойкость инструмента составляет от 5 до 15 мин [6, с. 186]. Тогда среднее суммарное время автоматической наладки станка – от 2,4 до 7 мин ( $t_{см} = 0,471T_n$ ).

В [6, с. 186] показано, что «зависимость себестоимости в окрестности точки минимума имеет полую форму и поэтому даже значительное (в 2 раза) отклонение от принятой в расчёте скорости резания мало сказывается на себестоимости операций».

Скорость резания, при которой обеспечивается наименьшая себестоимость операции, называется скоростью резания наименьшей себестоимости или экономической скоростью резания.

В связи с этим, особенно при запуске изделия в производство, экономическую скорость резания можно определить как среднеарифметическую величину от скорости наибольшей производительности  $V_{nn1}$  и скорости резания  $V_p$  наибольшего ресурса работы инструмента  $V_p$  ( $V_p = 0,847V_n$  [2]).

$$V_{э1} = \frac{1}{2}(V_{nn1} + V_p) = K_{э1}V_n; \quad (19)$$

$$K_{э1} = \frac{1}{2}(K_{m1} + 0,847), \quad (20)$$

где  $K_{э1}$  – коэффициент экономической скорости резания;  $V_{э1}$  – скорость резания минимальной себестоимости или экономической скорости резания, м/мин.

В табл. 1 представлены изменения коэффициентов  $K_{m1}$ ,  $K_{э1}$  и  $K_{T1}$ , рассчитанных по зависимостям (16), (18) и (20). Как видно, средняя величина коэффициента  $K_{m1}$  в практическом диапазоне изменения величины  $T_n/t_{см}$  от 1,0

до 2,12  $K_{m1} = 0,96$ , а средняя величина коэффициента  $K_{э1}$  в этом же диапазоне изменения  $T_n/t_{см}$   $K_{э1} = 0,9$ . Отсюда следует вывод, что скорость резания  $V_n$  в точке перегиба кривой  $T_0 = f(V)$  может являться скоростью резания наибольшей производительности, т. е.  $V_{nn1} = V_n$ , а скорость резания  $V_p$  наибольшего ресурса работы инструмента может считаться скоростью резания наименьшей себестоимости, т. е.  $V_p = V_{э1}$ . Ввиду того, что скорости  $V_{nn1}$  (15) и  $V_{э1}$  (19) при  $V \leq V_n$  (см. табл. 1) близки по величине к скорости  $V_p = 0,847V_n$  наибольшего ресурса работы инструмента, то их рекомендуется использовать для расчёта режимов резания в случае чистовой обработки поверхностей, где на первый план выходит точность обработки.

Определим скорость резания наибольшей производительности при  $V \geq V_n$ , когда период стойкости вычисляется по формуле [4–6]

$$T_0 = \left(\frac{C}{V}\right)^{\frac{1}{m}}, \quad (21)$$

где  $m$  – показатель относительной стойкости,  $m = 0,2$  для стали [7].

Подставив (21) в (1), имеем

$$q = \frac{1000tSV C^{\frac{1}{m}}}{C^m + t_{см}V^{\frac{1}{m}}}. \quad (22)$$

Для получения скорости резания наибольшей производительности возьмём производную  $dq/dV$  и выведенное выражение приравняем к нулю.

$$\frac{dq}{dV} = \frac{\left( C^{\frac{1}{m}} + t_{cm} V^{\frac{1}{m}} \right) 1000 St C^{\frac{1}{m}} - 1000 St V C^{\frac{1}{m}} \frac{1}{m} V^{\frac{1}{m}-1} t_{cm}}{\left( C^{\frac{1}{m}} + t_{cm} V^{\frac{1}{m}} \right)^2} = 0.$$

После сокращений и преобразований

$$V^{\frac{1}{m}} t_{cm} \left( \frac{1}{m} - 1 \right) = C^{\frac{1}{m}}.$$

Откуда

$$V_{nn} = \frac{C}{\left[ t_{cm} \left( \frac{1}{m} - 1 \right) \right]^m} = \frac{C}{T_{nn}^m}, \quad (23)$$

где

$$T_{nn} = \left( \frac{1}{m} - 1 \right) t_{cm}, \quad (24)$$

где  $T_{nn}$  – период стойкости наибольшей производительности при  $V \geq V_n$  [4, 5];  $V_{nn}$  – скорость резания наибольшей производительности при  $V \geq V_n$ .

Поскольку период стойкости  $T_0$  (21) может быть определён только при скоро-

сти резания  $V \geq V_n$  [1, 2], то при обработке заготовок стальных валов ( $m = 0,2$ ) должно быть соблюдено условие (см. рис. 1)

$$T_{nn} = 4t_{cm} \leq T_n. \quad (25)$$

Учитывая, что  $C = V_n T_n^m$ , зависимость (23) можно представить в следующем виде:

$$V_{nn} = K_m V_n; \quad (26)$$

$$K_m = \left[ \frac{T_n}{\left( \frac{1}{m} - 1 \right) t_{cm}} \right]^m = 0,76 \left( \frac{T_n}{t_{cm}} \right)^{0,2}, \quad (27)$$

где  $K_m$  – коэффициент скорости резания наибольшей производительности при  $V \geq V_n$ .

Табл. 2. Зависимость коэффициентов  $K_m$ ,  $K_s$  и  $K_T$  от отношения  $T_n/t_{cm}$  ( $V \geq V_n$ )

$T_n/t_{cm}$	1,0	1,5	2	3	4	5	8	10	15	30
$K_m$	0,76	0,824	0,873	0,95	1,0	1,05	1,153	1,2	1,3	1,5
$K_s$	0,804	0,836	0,86	0,9	0,925	0,95	1,0	1,026	1,08	1,174
$K_T$	3,94	2,63	1,97	1,29	1,0	0,78	0,49	0,4	0,27	0,132
$V < V_n$					$V \geq V_n$ (рабочий диапазон)					

Период стойкости инструмента при  $V = V_{nn}$  определяется из (23) и (26) как

$$T_{nn} = T_n K_T; \quad (28)$$

$$K_T = \left( \frac{V_n}{V_{nn}} \right)^{\frac{1}{m}} = \left( \frac{1}{K_m} \right)^{\frac{1}{m}} = \frac{1}{K_m^5}, \quad (29)$$

где  $T_{nn}$  – период стойкости наибольшей производительности, мин;  $K_T$  – коэффициент стойкости наибольшей производительности при  $V \geq V_n$ .

Как видно из (23), характер изменения скорости  $V_{nn}$  от режимов обработки аналогичен изменению величины  $C$  [2, 3]. С увеличением глубины резания  $t$  от 0,2 до 2,0 мм ( $S = 0,5$  мм/об)

величина  $C$  уменьшается от 568 до 402, т. е. в 1,4 раза. С увеличением подачи  $S$  от 0,1 до 1,0 мм/об ( $t = 1,0$  мм) величина  $C$  уменьшается от 665 до 340, т. е. в 1,96 раза. Отсюда можно сделать вывод, что на величину скорости резания наибольшей производительности  $V_{nn}$  наибольшее влияние оказывает подача, чем глубина резания. С увеличением как глубины резания, так и подачи скорость резания  $V_{nn}$  уменьшается (табл. 3 и 4).

Табл. 3. Значения характерных параметров процесса резания призматическим резцом стали 45 подачи  $S$  ( $t = 1,0$  мм),  $t_{cm} = 4$  мин

$S$ , мм/об	$C$	$V_n$ , м/мин	$T_n$ , мин	$V_0$ , м/мин	$T_0^{max}$ , мин	$V_p$ , м/мин	$T_p$ , мин	$T_{nn}$ , мин	$V_{nn}$ , м/мин	$V_s$ , м/мин	$T_s$ , мин	$\frac{V_s}{V_p}$
0,1	665	293	60	234	99	248	96	16	382	315	42	1,21
0,2	579	247	71	197	117	209	114	16	333	271	44	1,3
0,3	534	223	79	178	130	189	126	16	307	248	46	1,31
0,5	446	178	99	142	163	151	158	16	256	209	51	1,34
0,8	376	144	122	115	201	122	195	16	216	169	54	1,38
1,0	340	127	139	102	229	108	222	16	195	151	57	1,4

*Примечание* – Принято:  $C_v = 420$  (350; 340);  $y = 0,2$  (0,35; 0,45);  $x = 0,15$ ;  $K_v = 1,0$ ;  $t_{cm} = 4$  мин;  $U_0 = 5$  мкм/км;  $K_p = 0,176$ ;  $\delta_0 = 500$  мкм; Т15К6

Табл. 4. Значения характерных параметров процесса резания призматическим резцом стали 45 от глубины резания  $t$  ( $S = 0,5$  мм/об)

$t$ , мм	$C$	$V_n$ , м/мин	$T_n$ , мин	$V_0$ , м/мин	$T_0^{max}$ , мин	$V_p$ , м/мин	$T_p$ , мин	$T_{nn}$ , мин	$V_{nn}$ , м/мин	$V_s$ , м/мин	$T_s$ , мин	$\frac{V_s}{V_p}$
0,2	568	241	73	193	120	204	117	16	326	265	45	1,3
0,5	495	203	87	162	143	172	139	16	284	228	48	1,3
0,8	461	185	95	148	156	157	152	16	264	210	51	1,33
1,0	446	178	99	142	163	151	158	16	256	203	51	1,34
2,0	402	156	113	124	186	132	181	16	231	181	54	1,37
3,0	378	145	122	116	200	123	195	16	217	170	54	1,38

*Примечание* – Принято:  $C_v = 350$ ;  $y = 0,35$ ;  $x = 0,15$ ;  $K_v = 1,0$ ;  $t = 4$  мин;  $S = 0,5$  мм/об;  $\delta_0 = 500$  мкм;  $U_0 = 5$  мкм/км;  $K_p = 0,176$ ; Т15К6

Как видно из табл. 1 и 2, скорость резания наибольшей производительности равна скорости резания  $V_n$  в точке перегиба кривой  $T_o = f(V)$  при чистовой обработке, когда отношение  $T_n/t_{cm} = 2,12$ , а при получистовой обработке  $T_n/t_{cm} = 4$ . Это определяет технологические действия при оптимизации процесса резания. Кроме того, рабочий диапазон регулирования при чистовой обработке, когда  $V \leq V_n$ , обеспечивает повышение стойкости инструмента  $K_{T1} > 1,0$  (см. табл. 1) и точности обработки в связи с приближением величины скорости резания к скорости  $V_p$  наибольшего ресурса работы инструмента. При регулировании процесса получистовой обработки, когда  $V \geq V_n$ , имеем уменьшение стойкости инструмента (см. табл. 2,  $K_T < 1,0$ ) и снижение точности обработки в связи с удалением величины скорости резания от скорости  $V_p$  наибольшего ресурса работы инструмента.

Определим экономическую скорость резания для случая, когда  $V > V_n$ :

$$V_э = \frac{1}{2}(V_{nn} + V_p). \quad (30)$$

Тогда с учётом (26) и (27) можно записать

$$V_э = K_э V_n; \quad (31)$$

$$\begin{aligned} K_э &= \frac{1}{2}(K_m + 0,847) = \\ &= \frac{1}{2} \left[ 0,76 \left( \frac{T_n}{t_{cm}} \right)^{0,2} + 0,847 \right]. \quad (32) \end{aligned}$$

Скорости резания  $V_{nn}$  (формулы (23), (26)) и  $V_э$  (формула (31)) используются для расчёта режимов реза-

ния при черновой и получистовой обработке, где на первый план выходит производительность операции, которую можно повысить за счёт увеличения скорости резания и уменьшения периода стойкости. С увеличением подачи  $S$  и глубины резания  $t$  скорости резания  $V_{nn}$  и  $V_э$  уменьшаются: при изменении подачи  $S$  от 0,1 до 1,0 мм/об (351/151) – в 2 раза, а при изменении глубины резания от 0,2 до 2,0 мм (265/170) – в 1,5 раза (см. табл. 3 и 4).

Тогда при черновой и получистовой обработке поверхностей можно расположить величины скоростей резания в порядке их возрастания.

$$V_0 < V_p < V_n < V_э < V_{nn}.$$

### Выводы

1. В результате проведенных исследований разработаны методики и получены зависимости для определения скоростей резания наибольшей производительности и наименьшей себестоимости при обработке поверхностей валов.

2. Показано, что при чистовой обработке поверхностей скорость резания  $V_p$  наибольшего ресурса работы инструмента практически является экономической скоростью резания  $V_э$ , а скорость резания  $V_n$  в точке перегиба кривой  $T_o = f(V)$  – скоростью резания наибольшей производительности  $V_{nn}$ .

3. Выбор скорости резания, соответствующей наибольшей производительности, при увеличении глубины резания и подачи ведёт к повышению периода экономической стойкости инструмента.

4. Показано, что экономическая скорость резания  $V_э$  превышает скорость резания  $V_p$  наибольшего ресурса ин-

струмента в среднем на 34 % ( $V_3/V_p$ ) – ностей и на 17 % ( $V_{э1}/V_p$ ) – при  
при предварительной обработке поверх- чистовой.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шатуров, Д. Г.** Технологические возможности управления режущей способностью лезвийного инструмента / Д. Г. Шатуров, Г. Ф. Шатуров // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2016. – № 2. – С. 112–119.
2. **Шатуров, Д. Г.** Ресурс работы лезвийного инструмента при обработке / Д. Г. Шатуров, Г. Ф. Шатуров // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2016. – № 4. – С. 90–98.
3. **Шелег, В. К.** Анализ и выбор рациональных режимов резания твёрдосплавным инструментом при точении валов / В. К. Шелег, Д. Г. Шатуров, Г. Ф. Шатуров // Наука и техника. – 2018. – Т. 17, № 1. – С. 14–20.
4. **Ящерицын, П. И.** Основы резания материалов и режущий инструмент / П. И. Ящерицын, М. Л. Еременко, Н. И. Жигалко. – Минск : Вышэйшая школа, 1981. – 560 с.
5. **Солоненко, В. Г.** Резание металлов и режущие инструменты: учебное пособие / В. Г. Солоненко, А. А. Рыжкин. – Москва: ИНФРА-М, 2011. – 416 с.
6. **Кожевников, Д. В.** Резание металлов: учебник для вузов / Д. В. Кожевников, С. В. Кирсанов; под общ. ред. С. В. Кирсанова. – 2-е изд., доп. – Москва: Машиностроение, 2012. – 304 с.
7. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / Под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – Москва: Машиностроение, 1985. – Т. 2.
8. **Макаров, А. Д.** Оптимизация процессов резания / А. Д. Макаров. – Москва: Машиностроение, 1976. – 278 с.
9. **Выгодский, М. Я.** Справочник по математике / М. Я. Выгодский. – Москва: Наука, 1975. – 871 с.
10. **Макаров, А. Д.** Износ и стойкость режущих инструментов / А. Д. Макаров. – Москва: Машиностроение, 1966. – 264 с.
11. **Подураев, В. Н.** Автоматически регулируемые и комбинированные процессы резания / В. Н. Подураев. – Москва: Машиностроение, 1977. – 304 с.
12. **Маталин, А. А.** Технология машиностроения / А. А. Маталин. – Москва: Машиностроение, 1985. – 496 с.

*Статья сдана в редакцию 20 марта 2019 года*

**Денис Геннадьевич Шатуров**, канд. техн. наук, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет.

**Denis Gennadyevich Shaturov**, PhD (Engineering), senior lecturer, Belarusian-Russian University.

## ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 338.912.13

*В. М. Ковальчук*

### ВЕРОЯТНОСТНО-МАРЖИНАЛЬНЫЙ ИНСТРУМЕНТАРИЙ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТА ПРЕДПРИЯТИЯ

UDC 338.912.13

*V. M. Kovalchuk*

### PROBABILISTIC MARGINAL TOOLS FOR ASSESSING THE EFFICIENCY OF ENTERPRISE ENERGY MANAGEMENT

#### **Аннотация**

Подчеркивается, что существующий инструментарий оценки эффективности энергетического менеджмента не учитывает стохастический характер энергетических потоков и противоречит основным экономическим целям предприятий: максимизации прибыли, в том числе и за счет роста конкурентоспособности. Показано, что экономическая эффективность использования ресурсов предприятия зависит как от технологического уровня производства, так и от уровня цен и конкуренции на рынках ресурсов и продукции производства. На основе маргинально-вероятностного подхода предлагается увязывать существующий инструментарий оценки эффективности энергоменеджмента с долей затрат на энергетический ресурс в рыночной цене единицы продукции, сложившихся на рынках конкурентной экономики.

#### **Ключевые слова:**

энергоменеджмент, энергосбережение, вероятностные методы, максимизация прибыли, маргинальные показатели, удельный расход ресурсов, целевой показатель энергосбережения, эффективность энергопотребления.

#### **Abstract**

The paper highlights that the existing tools for assessing the efficiency of energy management do not take into account the stochastic nature of energy flows and contradict the main economic goals of enterprises — profit maximization, including the one achieved through the growth of competitiveness. It is shown that the economic efficiency of the use of enterprise resources depends both on the technological level of production and the level of prices and competition in the markets of resources and products. Based on the marginal probabilistic approach it is proposed to link the available tools for assessing the efficiency of energy management with the share of energy costs in the market price of a unit of product prevailing in the competitive markets.

#### **Keywords:**

energy management, energy saving, probabilistic methods, profit maximization, marginal indicators, specific consumption of resources, target indicator of energy saving, energy consumption efficiency.

#### **Введение**

Энергетический менеджмент промышленных предприятий имеет цель бесперебойного снабжения энергией производственных процессов с наи-

большей эффективностью. Для эффективного управления энергетическими ресурсами необходимо обеспечить предприятия соответствующим инструментарием и руководством по энергоменеджменту. В Республике Беларусь



действует государственный стандарт на системы управления энергопотреблением СТБ ISO 50001–2013, который соответствует международному стандарту ISO 50001:2011 *Системы энергетического менеджмента. Требования и руководство по применению* [1]. Большинство требований ISO 50001 относятся к энергетической результативности. Энергетическая результативность – это измеримые результаты, относящиеся к эффективности энергопотребления.

### Основная часть

Эффективность энергоменеджмента предприятий в Республике Беларусь оценивается по выполнению утвержденных в органах государственного управления нормативных удельных расходов энергоресурсов  $\rho_i$  как отношение количества энергии  $x_i$ , приходящегося на единицу выпускаемой продукции в натуральных единицах  $q$  (штуки, тонны и т. п.):

$$\rho_i = \frac{q}{x_i} \quad (1)$$

и целевого показателя (ЦП) энергосбережения в целом по предприятию, который до 2011 г. рассчитывался как отношение обобщенных энергозатрат отчетного периода  $W_O$  к базисному (прошлому году)  $W_B$  за минусом темпов изменения объемов производства продукции (услуг)  $J_{ПП}$  в процентах в сопоставимых ценах:

$$\text{ЦП} = \frac{W_O}{W_B} \cdot 100 \% - J_{ПП} \quad (2)$$

и на сегодняшний день как отношение

$$\text{ЦП} = \left( \frac{W_O}{W_B} - 1 \right) \cdot 100 \%. \quad (3)$$

Для объективности оценки ЦП обобщенные энергозатраты базисного

периода приводятся к сопоставимым условиям по формуле

$$W_B^{CV} = W_B + \sum \Delta W_B,$$

где  $\Delta W_B$  – величина изменений обобщенных энергозатрат в базисном периоде, зависящая для предприятий от изменений объемов производства продукции, работ и услуг, температуры наружного воздуха, продолжительности отопительного сезона и т. п. В [2] показано, что при объемах  $q_k$  и номенклатуре  $k = 1, 2, \dots, n$  промышленного производства при удельных расходах энергии в базисном  $\rho_k^B$  и отчетном  $\rho_k^O$  периодах ЦП по формуле (3) принимает вид:

$$\text{ЦП} = \left( \frac{\sum_{k=1}^n q_k \rho_k^O}{\sum_{k=1}^n q_k \rho_k^B} - 1 \right) \cdot 100 \%$$

и по существу оценивает относительное изменение энергоемкости объемных показателей производства продукции.

Однако при выполнении всеми министерствами Республики Беларусь целевого показателя по энергосбережению не наблюдается относительно снижения прогнозного показателя, задаваемого в рамках системы государственного энергоменеджмента и используемого при международных сопоставлениях для оценки уровня энергетической безопасности и конкурентоспособности экономик, энергоемкости ВВП [3],

$$\mathcal{E}_{ВВП} = \frac{W_{\mathcal{E}}}{P_{\mathcal{S}}}$$

как количества энергии  $W_{\mathcal{E}}$  (выражаемой в эквивалентном количестве нефти или условного топлива), затраченного на 1 долл. ВВП  $P_{\mathcal{S}}$  (оцененного по паритету покупательской способности):

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{ВВП}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{ВВП}}^{\text{П}} - \mathcal{E}_{\text{ВВП}}^{\text{Б}}}{\mathcal{E}_{\text{ВВП}}^{\text{Б}}} \cdot 100 \%,$$

где  $\mathcal{E}_{\text{ВВП}}^{\text{П}}$ ,  $\mathcal{E}_{\text{ВВП}}^{\text{Б}}$  – энергоемкость экономики в планируемом и базисном периодах соответственно.

Причин такой ситуации несколько. Первая причина, как свидетельствует опыт и практика работы системы энергоменеджмента БМЗ [4], заключается в том, что действующий в Республике Беларусь инструментарий оценки эффективности энергоменеджмента предприятий противоречит основным экономическим целям государства и предприятий: максимизации добавленной стоимости продукции и ВВП, в том числе и за счет роста конкурентоспособности. Здесь справедливо замечание к [5], что спрашивать с предприятий надо результат – наличие прибыли и устойчивый рост, а не выполнение отдельных объемных показателей эффективности, в том числе и энергоменеджмента.

Вторая причина в том, что энергосбережение в Республике Беларусь базируется на методологии удельных норм потребления энергетических ресурсов, определяемых по полезной работе отдельных технологических операций. По технологическим показателям отдельного промышленного оборудования планируется определенный объем выпуска продукции и рассчитывается общий и удельный расход ресурсов на всех уровнях производства, который и принимается за норму. При этом особо подчеркивается, что «научно обоснованные» нормы должны базироваться на аналитических расчетах и экспериментальной основе с учетом не достигнутого, а планируемого уровня организации производства и отбрасываются, как «порочные» статистические методы.

Практика современного энергоменеджмента показывает, что такой подход определения теоретических (или

паспортных) расходов энергоресурсов на единицу продукции оправдан только на стадии конструирования отдельных агрегатов. При установке этого агрегата на конкретном производстве данный подход не может быть применен из-за влияния на режим его работы случайных факторов внешней среды. Иными словами, произошедшие за последнее время качественные и количественные изменения в экономике сделали неизбежным отказ от расчетов, основанных на единичном, и переход к вероятностным (эконометрическим) подходам.

В настоящее время стало очевидным, что первая (детерминированная) научная картина мира неприменима для практически бесконечного количества электроприемников (а это и есть 150...300 электроприемников), для всего количества режимов и связей. Изменение сущностной основы электрического хозяйства сделало неизбежными необходимость отказа от расчетов, основанных на исследовании единичного, и переход к вероятностным (статистическим) представлениям. Принципиально то, что в данном случае говорят не о точном, однозначном решении, а лишь о наличии математического ожидания (наличие среднего) и приемлемой для практики (инженерной) ошибке (конечная дисперсия). Математически же это означает, что существуют первые моменты, используемые теорией вероятностей, действуют центральная предельная теорема и закон больших чисел, то есть в пределе имеем дело с нормальным (гауссовым) распределением.

Переход к вероятностным методам в методологии оценки эффективности энергоменеджмента нашел отражение в появлении новых направлений исследования, к которым можно отнести применение эконометрического и математического моделирования для решения проблемы нормирования и управления электропотреблением для целей энергосбережения [6–8].

В современной экономической теории выделяют техническую и экономическую эффективность использования ресурсов. Технически эффективной считается такая организация производства, когда при заданном векторе расхода ресурсов  $\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_i$  объем производства  $q$  максимален:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_i) = q \rightarrow \max \quad (4)$$

при условии, что

$$x_i \leq \hat{x}_i, \quad i = \overline{1, n},$$

где  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  – производственная функция от вектора расхода ресурсов  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . Известно, что условие (4) выполняется, если удельная (средняя) ресурсоемкость  $x_i/q$ , обратная ресурсоотдаче  $q/x_i$ , минимальна.

Производство считается экономически эффективным, если оптимальные объем производства  $q^*$  и вектор расхода ресурсов  $x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*$  обеспечивают максимальную прибыль  $\Pi(x_1, x_2, \dots, x_i; q)$ :

$$\begin{aligned} \Pi(x_1, x_2, \dots, x_i; q) &= \\ &= D(q) - I(x_1, x_2, \dots, x_i) \rightarrow \max; \\ f(x_1, x_2, \dots, x_n) &\geq q; \\ x_i &\geq 0, \quad i = \overline{1, n}; \\ q &\geq 0, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $I(x_1, x_2, \dots, x_n)$  – функция издержек;  $D(q)$  – функция дохода;  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  – производственная функция от вектора расхода ресурсов  $x_1, x_2, \dots, x_n$ ;  $q$  – объем производства.

Известно [9], что максимума (5) достигает, если

$$\begin{aligned} \frac{\partial [I(x_1, x_2, \dots, x_n)]}{\partial x_i} &= \\ &= \frac{\partial [D(q)]}{\partial q} \cdot \frac{\partial [f(x_1, x_2, \dots, x_n)]}{\partial x_i} \\ &\text{при } i = \overline{1, n}, \end{aligned} \quad (6)$$

или

$$\begin{aligned} \frac{\partial [I(x_1, x_2, \dots, x_n)]}{\partial x_i} &= \frac{\partial \{D[f(x_1, x_2, \dots, x_n)]\}}{\partial x_i} \\ &\text{при } i = \overline{1, n}. \end{aligned}$$

То же самое в терминах экономической теории

$$ПСП(x_i) = ПВ(q) \cdot ПФП(x_i),$$

или

$$ПСП(x_i) = ПВП(x_i) \quad \text{при } i = \overline{1, n},$$

где  $ПСП(x_i)$  – предельная стоимость  $i$ -го ресурса;  $ПВ(q)$  – предельная выручка;  $ПФП(x_i)$  – предельный физический продукт  $i$ -го ресурса;  $ПВП(x_i)$  – предельная выручка  $i$ -го ресурса.

Определим, от каких экономических факторов зависит эффективность использования ресурса. Для этого представим функцию издержек  $I(x_1, x_2, \dots, x_n)$  как

$$I(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n x_i \cdot p_{xi},$$

где  $p_{xi}$  – цена единицы  $i$ -го ресурса.

При условии, что  $p_{xi}$  не зависит от объема потребления ресурса, выражение (6) примет вид:

$$p_{xi} = \frac{\partial [D(q)]}{\partial q} \cdot \frac{\partial [f(x_1, x_2, \dots, x_n)]}{\partial x_i}. \quad (7)$$

В этом выражении  $\frac{\partial[D(q)]}{\partial q}$  – предельная доходность производства, которая, согласно экономической теории, зависит от положения предприятия на рынке товаров (т. е. от эластичности спроса  $E_{qp}$  по цене  $p_q$  продукции предприятия):

$$\frac{\partial[D(q)]}{\partial q} = p_q \cdot \left( 1 - \frac{1}{|E_{qp}|} \right).$$

Например, на рынке с совершенной конкуренцией изменение выпуска продукции любой фирмой не изменяет равновесную цену на данную продукцию, т. е.

$$\frac{\partial[D(q)]}{\partial q} = p_q.$$

В этом случае выражение (7) принимает вид:

$$\frac{\partial[f(x_1, x_2, \dots, x_n)]}{\partial x_i} = \frac{p_{xi}}{p_q}. \quad (8)$$

Анализ формул (6) и (7) показывает, что экономическая эффективность потребления энергоресурсов определяется двумя группами факторов:

1) соотношением цен на продукцию и ресурсы, эластичностью спроса  $E_{qp}$  по цене  $p_q$  продукции предприятия;

2) предельным физическим продуктом, который определяется технической эффективностью технологии производства.

Таким образом, уровень экономической эффективности использования ресурсов в первую очередь задается внешними экономическими условиями, в которых работает данное предприятие. В рыночной экономике – это конкуренция на рынках ресурсов и продук-

ции производства. В переходной экономике, когда цены можно устанавливать по затратному принципу, возникает необходимость государственного регулирования эффективности использования ресурсов через нормирование и задание на объемы ресурсосбережения. Но в любом случае производитель должен иметь инструментарий оценки эффективности энергоменеджмента, позволяющий выбирать в краткосрочном периоде такой объем производства (масштаб), а в долгосрочном периоде такую производственную функцию (технологии), которые были бы экономически оптимальными. Для решения этой задачи предлагается удельный расход  $p_i$   $i$ -го ресурса  $x_i$  (т. е. энергоёмкость продукции) выразить через соотношение (8):

$$\begin{aligned} \frac{x_i}{q} &= \frac{x_i \cdot p_{xi}}{q \cdot p_{xi}} = \\ &= \frac{x_i \cdot p_q \cdot \partial[f(x_1, x_2, \dots, x_i)]}{q \cdot p_{xi} \cdot \partial x_i} = \frac{p_q}{p_{xi}} \cdot E_{qx}, \end{aligned}$$

где  $E_{qx}$  – частный коэффициент эластичности объема выпуска продукции  $q$  от расхода  $i$ -го ресурса  $x_i$ , т. к.  $f(x_1, x_2, \dots, x_i) = q$ , а  $E_{qx}$ , как известно,

$$E_{qx} = \frac{x_i \cdot \partial q}{q \cdot \partial x_i}.$$

Но поскольку

$$\frac{x_i \cdot p_{xi}}{q \cdot p_q} = DX_i$$

есть доля затрат на  $i$ -й ресурс  $x_i$  в цене единицы продукции, то частный коэффициент эластичности объема выпуска продукции  $q$  от расхода  $i$ -го ресурса  $x_i$  будет равен этой доли:

$$E_{qx} = DX_i.$$

Предприятию необходимо применять такую производственную функцию  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  (т. е. технологию) или объем выпуска продукции  $q$ , которые бы обеспечивали частные коэффициенты эластичности  $E_{qx}$ , равные или ниже сложившейся в конкурентной экономике доле  $DX_{is}$  затрат на  $i$ -й ресурс  $x_i$  в рыночной цене единицы продукции. При этом экономически оптимальный удельный расход ресурса  $\rho_{ЭО}$  и целевой показатель энергосбережения  $ЦП_{ЭО}$  при фактических удельных расходах  $\rho_{\Phi}$  и темпах изменения объемов производства продукции (услуг)  $J_{III}^0$

$$\rho_{ЭО} = \frac{p_q}{p_{xi}} DX_{is};$$

$$ЦП_{ЭО} = \frac{\rho_{ЭО} - \rho_{\Phi}}{\rho_{ЭО}} \cdot J_{III}^0. \quad (9)$$

Вместе с тем практическое применение маржинальных показателей встречает ряд методических трудностей.

1. Для оценки анализируемого фактора производства (например, электроэнергии) по наблюдаемым данным другие факторы производства (трудовые, финансовые и т. п. ресурсы) должны быть в неизменном состоянии, что практически невыполнимо.

2. Теория предельных измерений базируется на законе убывающей предельной производительности факторов производства. При наблюдаемом на практике диапазоне изменений факторов производства и зависящего от них объема доходов предприятий этот закон практически не выявляется. Опыт показывает, что производственные функции  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  конкретного производства лучше всего аппроксимируются линейными зависимостями. Это не про-

тиворечит и закону «больших чисел» теории вероятностей, поскольку одновременное воздействие всех факторов производства нормализует закон распределения  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ .

Методические трудности применения на практике маржинальных показателей преодолеваются, если:

1) в рамках экономической теории факторы производства  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , объем производства  $q$  и цены на продукцию и ресурсы  $p_q, p_{xi}$  и связанные с ними производственную функцию  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , функции дохода  $D(x_1, x_2, \dots, x_n, q, p_q)$  и издержек  $I(x_1, x_2, \dots, x_n, p_x)$  представить в виде системы случайных  $n$ -мерных величин с нормальным законом распределения;

2) средние и предельные показатели этих функций находить методами теории вероятностей и эконометрики через детерминированные эквиваленты – уравнения регрессии (условные математические ожидания) и области практически достоверных значений.

Например, зависимость объема выпуска продукции  $q$  от объема потребления электроэнергии  $x$ , т. е. производственную функцию  $q = f(x)$ , можно представить как случайную величину с нормальным законом распределения, которая описывается совместной плотностью распределения  $f(q, x)$ , математическими ожиданиями  $m_x, m_q$ , дисперсиями  $\sigma_x^2, \sigma_q^2$  и коэффициентом корреляции  $r_{xq}$ . Тогда детерминированный эквивалент зависимости  $q = f(x)$  в виде регрессионной зависимости (условного математического ожидания) будет

$$M[q|x=x] = m_q + r_{xq} \cdot \frac{\sigma_q}{\sigma_x} \cdot (x - m_x).$$

В этом случае предельная производительность ресурса

$$\frac{\partial M[q|x=x]}{\partial x} = r_{xq} \cdot \frac{\sigma_q}{\sigma_x},$$

а условие (8) экономичного использования ресурса в конкурентной среде примет вид:

$$r_{xq} \cdot \frac{\sigma_q}{\sigma_x} = M \left[ \frac{p_x}{p_q} \right].$$

Оптимальное при этом среднее значение удельного расхода ресурса  $x$ , согласно (9), должно быть

$$M[\rho_{ОПТ}] = M \left[ DX_{iЭ} \cdot \frac{p_q}{p_x} \right].$$

В целом все режимы потребления электроэнергии будут эффективными, если

$$\rho_{ОПТ} \geq \rho_{\max} | q = q_{\min},$$

где  $\rho_{\max} | q = q_{\min}$  – условный максимальный фактический удельный расход энергоресурса при минимальном объеме выпуска продукции,

$$\rho_{\max} | q = q_{\min} = \frac{m_x}{q_{\min}} + r_{xq} \cdot \frac{\sigma_x}{\sigma_q} \left( 1 - \frac{m_q}{q_{\min}} \right) + \frac{\beta}{q_{\min}} \sigma_x \cdot \sqrt{1 - r_{xq}^2}.$$

В условиях, когда  $\rho_{\min} | q = q_{\max} \leq \rho_{ОПТ} < \rho_{\max} | q = q_{\min}$ , взяв за основу помесячные наблюдаемые объемы производства  $q_i$ , находим допустимые месячные расходы энергоносителя  $x_{iD} = \rho_{ОПТ} \cdot q_i$  и, сравнивая эти значе-

ния с фактическими расходами  $x_i$ , определяем месяцы, в которых перерасход и экономия электроэнергии

$$\Pi_{ii}(t) = \int_0^t [x_i(t) - x_{iD}] dt \quad \text{при } x_i > x_{iD};$$

$$\Xi_{ii}(t) = \int_0^t [x_{iD} - x_i(t)] dt \quad \text{при } x_i < x_{iD}.$$

При условии, когда

$$\rho_{ОПТ} < \rho_{\min} | q = q_{\max} = \frac{m_x}{q_{\max}} + r_{xq} \cdot \frac{\sigma_x}{\sigma_q} \times \left( 1 - \frac{m_q}{q_{\max}} \right) - \frac{\beta}{q_{\max}} \sigma_x \cdot \sqrt{1 - r_{xq}^2},$$

в целом на предприятии расход энергоносителя является экономически неэффективным.

### Заключение

1. Существующий инструментальный оценки эффективности энергетического менеджмента предприятий в Республике Беларусь, который базируется на методологии удельных норм потребления энергетических ресурсов, определяемых по полезной работе отдельных технологических операций, не учитывает стохастический характер энергетических потоков и противоречит основным экономическим целям предприятий: максимизации прибыли, в том числе и за счет роста конкурентоспособности.

2. Уровень экономической эффективности использования ресурсов в первую очередь задается внешними экономическими условиями, в которых работает данное предприятие. В рыночной экономике – это конкуренция на рынках ресурсов и продукции производства. В переходной экономике, когда цены можно устанавливать по затратному принципу, возникает необходи-

мость государственного регулирования эффективности использования ресурсов через нормирование и задание на объемы ресурсосбережения. Но в любом случае предприятие должно иметь инструментарий оценки эффективности энергоменеджмента, позволяющий выбирать в краткосрочном периоде такой объем производства (масштаб), а в долгосрочном периоде такую производственную функцию (технология), которые были бы экономически оптимальными.

3. Экономически оптимальный удельный расход энергоресурса и целевой показатель энергосбережения должны определяться при условии, когда предприятие применяет такую

технология и такой объем выпуска продукции, которые бы обеспечивали частные коэффициенты эластичности производственной функции, равные или ниже сложившейся в конкурентной экономике доле затрат на энергетический ресурс в рыночной цене единицы продукции.

4. Оценка эффективности энергоменеджмента предприятия должна производиться методами эконометрики через детерминированные эквиваленты – уравнения регрессии (условные математические ожидания) и области практически достоверных значений с использованием современных информационных технологий.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Рубенчик, Б. И.** О стимулировании внедрения в Беларуси стандарта СТБ ISO 50001–2013 / Б. И. Рубенчик // Энергия и менеджмент. – 2015. – № 4–5. – С. 10–12.
2. **Ковальчук, В. М.** Экономика предприятия и эффективность энергоменеджмента / В. М. Ковальчук // Инновационные процессы в социально-экономическом развитии: материалы V Междунар. науч.-практ. конф., Бобруйск, 17 нояб. 2015 г. – Минск: РИВШ, 2015. – 218 с.
3. **Данилов, К.** По отчетам – экономия. В действительности – разбазаривание средств / К. Данилов, В. Кудин // Государственный контроль. – 2013. – № 3.
4. **Андрианов, А.** Как совместить экономические цели предприятия с выполнением Директивы Президента Республики Беларусь № 3 / Н. Андрианов // Директор. – 2008. – № 7.
5. **Шенец, Л. В.** Как считать экономию энергии? / Л. В. Шенец // Директор. – 2008. – № 11.
6. **Желудкевич, М. Е.** Моделирование ресурсосбережения: учебное пособие / М. Е. Желудкевич. – Минск: БГЭУ, 2002. – 66 с.
7. **Шенец, Е. Л.** Анализ показателей эффективности энергоресурсов и методов оценки эффективности внедрения мероприятий по энергосбережению на промышленных предприятиях / Е. Л. Шенец, А. А. Капанский // Энергия и менеджмент. – 2017. – № 2. – С. 6–11.
8. Использование методов математического моделирования для решения практических задач оценки энергоэффективности / Н. В. Грунтович, А. А. Капанский, С. Г. Жуковец, Е. Л. Шенец // Энергия и менеджмент. – 2017. – № 3. – С. 21–25.
9. **Аксень, Э. М.** Математические методы в микроэкономике. Теория фирмы: учебное пособие / Э. Б. Аксель. – Минск: БГЭУ, 2000. – 54 с.

*Статья сдана в редакцию 14 апреля 2019 года*

**Владимир Михайлович Ковальчук**, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.  
E-mail: vladmix@tut.by.

**Vladimir Mikhailovich Kovalchuk**, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.  
E-mail: vladmix@tut.by.

## СТРОИТЕЛЬСТВО. АРХИТЕКТУРА

УДК 69.059

*И. Л. Опанасюк, С. В. Данилов*

### ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ КАЧЕСТВ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОЛОНН ОАО «КРИЧЕВЦЕМЕНТНОШИФЕР»

UDC 69.059

*I. L. Apanasiuk, S. V. Danilov*

### RESTORARING PERFORMANCE OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS AT JSC KRICHEVTSEMENTNOSHIFER

#### **Аннотация**

Выполнена оценка и обоснованы категории технического состояния железобетонных колонн подготовительного отделения цеха АЦИ ОАО «Кричевцементношифер». Предложены и реализованы на практике рациональные технические и организационно-технологические решения, обеспечивающие восстановление эксплуатационных качеств железобетонных колонн с минимальными трудовыми и материальными затратами.

#### **Ключевые слова:**

железобетонная колонна, дефект, категория технического состояния, технические и организационно-технологические решения, восстановление эксплуатационных качеств.

#### **Abstract**

The categories of technical state of reinforced concrete columns in the stock-preparation department of the Asbestos Cement Products shop at JSC Krichevtsementnoshifer have been evaluated and justified. The rational technical and organizational technological solutions have been proposed and put into practice, which ensure the restoration of operational performance of reinforced concrete columns with minimum labor and material expenses.

#### **Keywords:**

reinforced concrete column, defect, category of technical state, technical and organizational technological solutions, restoration of performance.

#### **Введение**

Оценка технического состояния строительных конструкций подготовительного отделения цеха АЦИ выполнялась сотрудниками кафедры «Промышленное и гражданское строительство» на основании хозяйственного догово-

ра № 0129 от 5 марта 2001 г. между Могилевским государственным техническим университетом и ОАО «Кричевцементношифер». На момент обследования проектно-сметная и исполнительная документация по объекту в полном объеме отсутствовала. Согласно имеющимся чертежам проектирование было



выполнено институтом «Гипроцемент» в 1948–1949 гг., а строительство осуществлялось в 1949–1951 гг.

Подготовительное отделение цеха АЦИ ОАО «Кричевцементношифер»

было выполнено в виде каркасного трехэтажного здания высотой 20 м с размерами в плане  $18 \times 36$  м и сеткой колонн  $6 \times 6$  м (рис. 1).



Рис. 1. Здание подготовительного отделения цеха АЦИ ОАО «Кричевцементношифер»

Оценка технического состояния строительных конструкций производилась в осях А–В / 36–39 (рис. 2).

Обследуемое здание было выполнено из монолитного железобетона и представляло собой рамную конструкцию, где продольные рамы состояли из колонн сечениями  $600 \times 600$  мм (1 и 2 этажи) и  $500 \times 500$  мм (3 этаж) и главных балок высотой до 1000 мм. Высота балок второстепенных составляла от 500 до 1000 мм в зависимости от технологических нагрузок на перекрытия. По главным и второстепенным балкам выполнены монолитные железобетонные перекрытия и покрытие толщиной 100 мм. Наружные стены кирпичные толщиной 510 мм. Пространственная устойчивость каркаса здания в поперечном направлении обеспечивается монолитными железобетонными рамами, а в продольном – монолитными второстепенными балками с жесткими

стыками и жесткостью монолитных дисков перекрытий и покрытий.

### **Основная часть**

Оценка технического состояния железобетонных колонн подготовительного отделения цеха АЦИ ОАО «Кричевцементношифер» выполнялась на основании результатов предварительного осмотра здания, общего (по внешним признакам) и детального (инструментального) обследования [1].

Обследуемые железобетонные конструкции в результате особенностей технологии производства асбестоцементных изделий постоянно эксплуатировались в агрессивной для арматуры и бетона воздушной среде, что явилось причиной значительного физического износа колонн и перекрытий.

В ходе оценки технического состояния в железобетонных колоннах

были обнаружены следующие дефекты (повреждения): шелушение граней и отслоение лещадок бетона; разрушение бетона защитного слоя продольной и поперечной арматуры с ее оголением; уменьшение сечения колонны от 30 до 50 % в результате многочисленных

сколов и выбоин бетона; коррозия арматуры и бетона; трещины на поверхности колонны вдоль продольной и поперечной арматуры (ширина раскрытия трещин до 1 мм) с нарушением ее сцепления с бетоном (табл. 1).

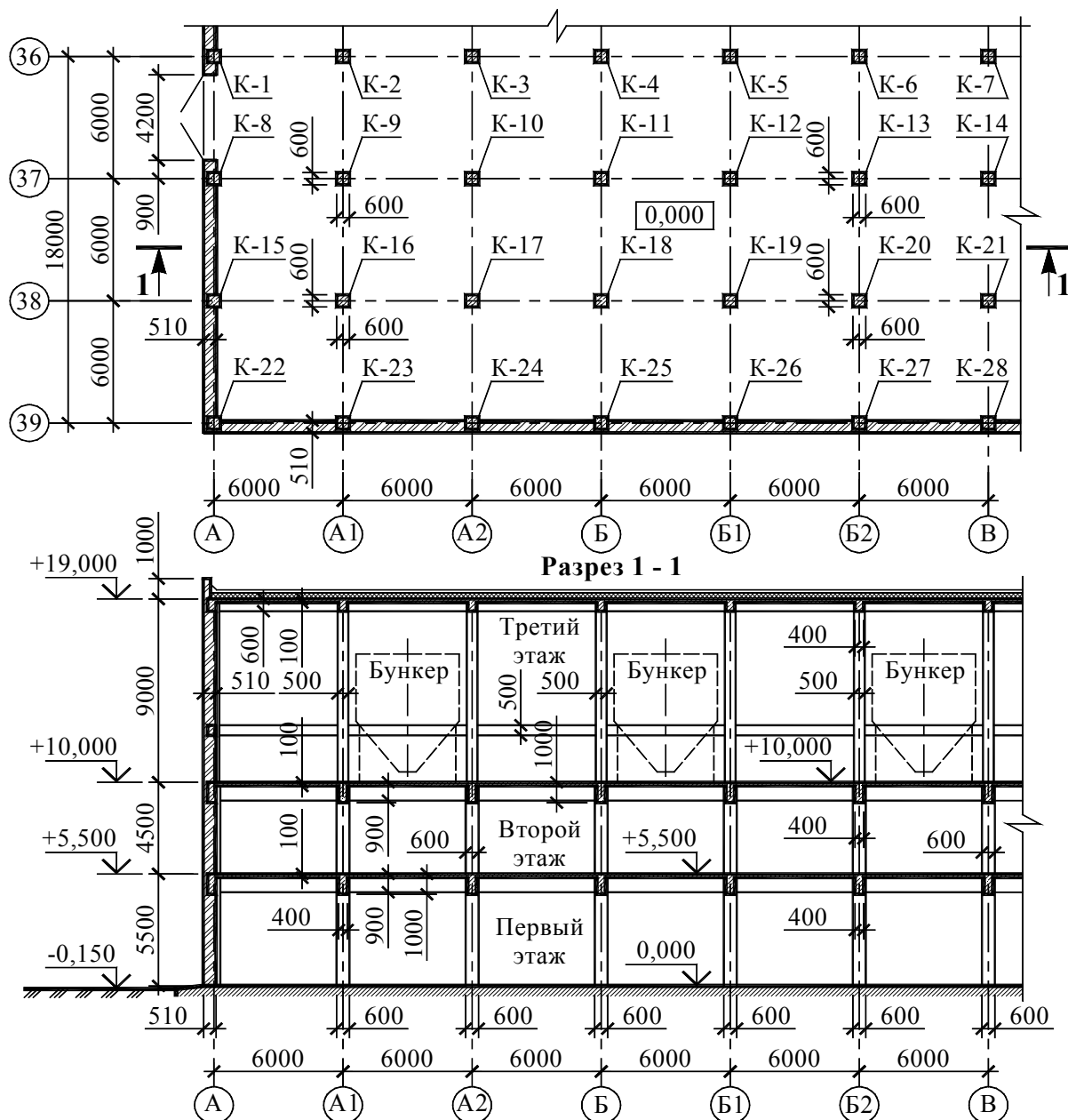





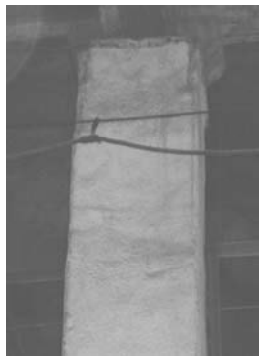


Рис. 2. План подготовительного отделения на отм. 0,000 и разрез 1-1

Табл. 1. Категории технического состояния железобетонных колонн

Номер колонны (см. рис. 2)	Схема дефекта (повреждения)	Степень распространения и класс установленных дефектов (повреждений)	Категория технического состояния
1	2	3	4
Железобетонные колонны сечением 600 × 600 мм первого этажа на отм. 0,000			
К-1, К-8, К-9 – К-14		<i>Единичные или многочисленные малозначительные дефекты:</i> шелушение поверхности и граней бетона отслоение лещадок бетона раковины, выбоины и сколы бетона до 5 % поперечного сечения колонны усадочные и незначительные трещины (ширина раскрытия трещин до 0,3 мм)	II
К-2 – К-7		<i>Многочисленные значительные и критические дефекты:</i> оголение и коррозия продольной и поперечной арматуры с разрушением ее защитного слоя трещины на поверхности колонны вдоль продольной и поперечной арматуры (ширина раскрытия трещин до 1 мм) с нарушением ее сцепления с бетоном глубокие выбоины и механические повреждения бетона с уменьшением поперечного сечения железобетонной колонны от 30 до 50 %	IV
Железобетонные колонны сечением 600 × 600 мм второго этажа на отм. +5,500			
К-1, К-8, К-15, К-22 – К-28		<i>Единичные или многочисленные малозначительные дефекты:</i> шелушение поверхности и граней бетона отслоение лещадок бетона раковины, выбоины и сколы бетона до 5 % поперечного сечения колонны усадочные и незначительные трещины (ширина раскрытия трещин до 0,3 мм)	II

Окончание табл. 1

1	2	3	4
К-2 – К-7		<i>Многочисленные значительные и критические дефекты:</i> оголение и коррозия продольной и поперечной арматуры с разрушением ее защитного слоя трещины на поверхности колонны вдоль продольной и поперечной арматуры (ширина раскрытия трещин до 1 мм) с нарушением ее сцепления с бетоном глубокие выбоины и механические повреждения бетона с уменьшением поперечного сечения железобетонной колонны от 30 до 50 %	IV
К-9 – К-14, К-16 – К-21		<i>Многочисленные малозначительные и единичные значительные дефекты:</i> отслоение лещадок бетона механические повреждения и сколы бетона до 30 % всего сечения колонны оголение продольной арматуры и очаговая коррозия на поверхности арматуры с уменьшением ее сечения до 5 % трещины в местах опирания главных балок перекрытия (ширина раскрытия трещин до 0,5 мм)	III
Железобетонные колонны сечением 500 × 500 мм второго этажа на отм. +10,000			
К-1 – К-28		<i>Единичные или многочисленные малозначительные дефекты:</i> шелушение поверхности и граней бетона отслоение лещадок бетона раковины, выбоины и сколы бетона до 5 % поперечного сечения колонны усадочные и незначительные трещины (ширина раскрытия трещин до 0,3 мм)	II

На основании современных ТНПА [1, 2] вышеуказанные дефекты (см. табл. 1) устраняют:

– путем восстановления защитного слоя бетона в процессе текущего обслуживания и ремонта колонн (колонны первого этажа (К-1, К-8 и К-15 – К-28), второго этажа (К-1, К-8, К-15 и К-22 – К-28) и третьего этажа (К-1 – К-28), относящиеся ко II категории технического

состояния (работоспособное, удовлетворительное состояние));

– посредством увеличения сечения и усиления поврежденных участков колонн (колонны второго этажа (К-9 – К-14 и К-16 – К-21), относящиеся к III категории технического состояния (ограниченно работоспособное, не вполне удовлетворительное состояние));

– восстановлением и усилением

поперечного сечения на всю длину колонн (колонны первого этажа (К-2 – К-7 и К-9 – К-14), второго этажа (К-2 – К-7), относящиеся к IV категории технического состояния (неработоспособное, неудовлетворительное состояние)).

В результате многовариантного проектирования с использованием метода множества недоминируемых вариантов [3] были предложены следующие технические и организационно-технологические решения по восстановлению обследуемых железобетонных колонн, относящихся к III и IV категориям технического состояния (рис. 3):

– усиление железобетонных колонн второго этажа (К-16 – К-21, отно-

сящихся к III категории технического состояния) посредством местного устройства стальной обоймы с обетонированием на высоту 1800 мм (рис. 3, а);

– усиление железобетонных колонн второго этажа (К-9 – К-14, относящиеся к III категории технического состояния) путем устройства стальной обоймы на всю высоту колонны (рис. 3, б);

– усиление железобетонных колонн первого этажа (К-2 – К-7 и К-9 – К-14) и второго этажа (К-2 – К-7, относящихся к IV категории технического состояния) посредством устройства стальной обоймы с обетонированием на всю высоту колонны (рис. 3, в).

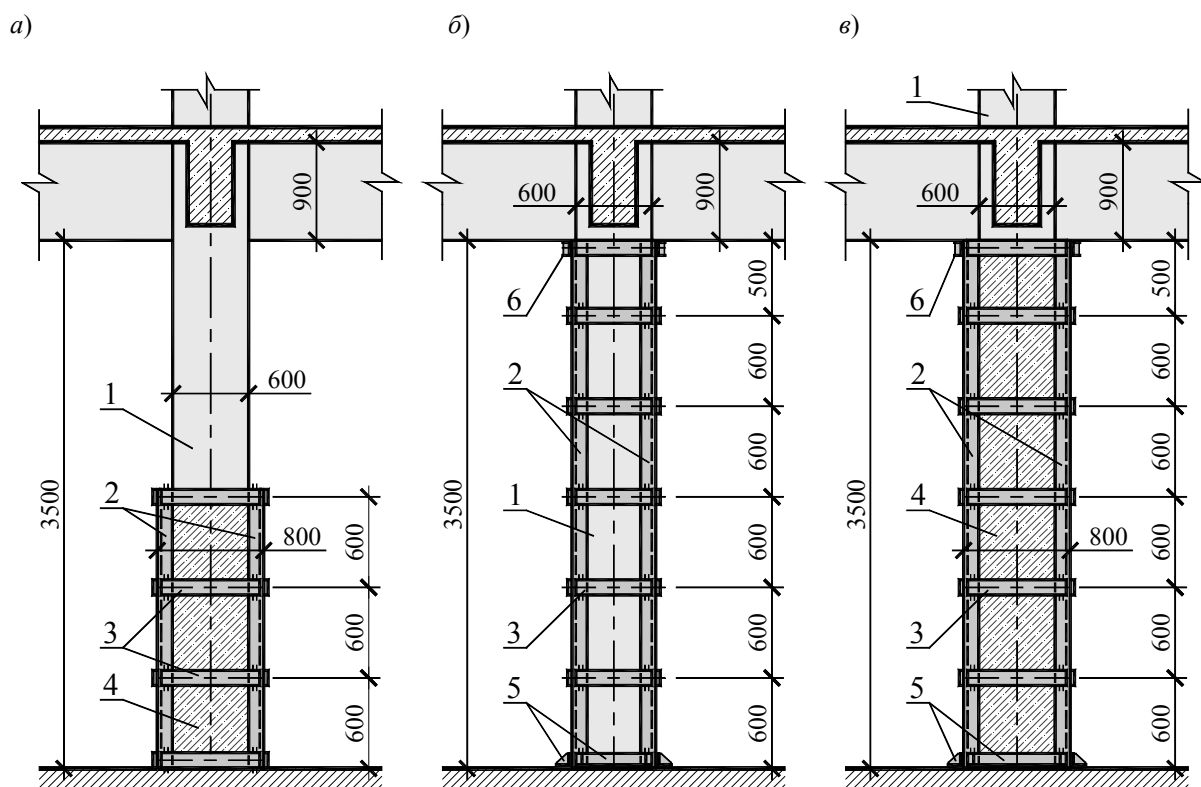


Рис. 3. Технические решения по восстановлению и усилению железобетонных колонн: а – местное усиление железобетонной колонны стальной обоймой с обетонированием; б – усиление железобетонной колонны стальной обоймой; в – усиление железобетонной колонны стальной обоймой с обетонированием; 1 – усиливаемая колонна; 2 – продольные уголки стальной обоймы; 3 – поперечные планки стальной обоймы; 4 – бетонная обойма; 5 – опорный уголок башмака; 6 – швеллер

Реализация технических и организационно-технологических решений по восстановлению эксплуатационных качеств железобетонных колонн подго-

товительного отделения цеха АЦИ ОАО «Кричевцементношифер» включала *подготовительные, основные* (подготовку поверхности усиливаемых колонн,

установку элементов стальных обойм усиления, монтаж и демонтаж опалубки, бетонные работы) и *заключительные работы*.

*Подготовительные работы* содержали: установку и сдачу в эксплуатацию подъемных механизмов, подключение необходимого оборудования к существующей электросети; подведение сжатого воздуха и воды к рабочему месту; разборку трубопроводов и демонтаж технологического оборудования; снятие нагрузки с усиливаемых железобетонных колонн на 35...40 %; установку и закрепление средств подмащивания.

Разгрузка усиливаемых железобетонных колонн первого и второго этажей осуществлялась посредством опорожнения 60-тонных ёмкостей на третьем этаже (см. рис. 2) от сырьевых ком-

понентов, используемых для изготовления асбестоцементных изделий.

Подготовка поверхности усиливаемых железобетонных колонн производилась с учетом следующей последовательности технологических операций: *удаление слабопрочного бетона; обработка арматуры; обеспыливание и увлажнение поверхности бетона*.

Для подготовки поверхности бетона и очистки арматуры усиливаемых железобетонных колонн использовался гидромонитор KARCHER, что позволило повысить механизацию выполняемых работ и их качество (рис. 4). С поверхности усиливаемых колонн производилось удаление слабопрочного бетона, продуктов коррозии, пыли, грязи, следов краски и др. [4].

а)



б)



Рис. 4. Подготовка поверхности бетона и очистка арматуры гидромонитором KARCHER: а – гидромонитор KARCHER; б – подготовка поверхности бетона и очистка арматуры

Для лучшего сцепления «нового» и «старого» бетона поверхности усиливаемых железобетонных колонн с помощью перфоратора с зубчатой лопат-

кой придавалась шероховатость. Шероховатость формировалась на поверхности бетона колонны повторяющимися разнонаправленными бороздами глуби-

ной до 5 мм с шагом 100...150 мм. Подготовленные бетонные поверхности усиливаемых железобетонных колонн соответствовали физико-механическим требованиям [4]: прочность бетона при отрыве – не менее 1,5 МПа; влажность – не менее 95 %; содержание хлоридов не допускается. Подготовленные поверхности усиливаемых колонн принимались по акту на скрытые работы.

Стальные обоймы без обетонирования (см. рис. 3, б) устраивались для усиления железобетонных колонн второго этажа. После монтажа и временной фиксации вертикальных и опорных уголков стальной обоймы закреплялись поперечные планки. Предварительное напряжение поперечных планок осуществлялось термическим способом. Для этого планки приваривались одним торцом к вертикальному уголку стальной обоймы с шагом 600 мм, затем нагревались газовой горелкой до 100...120 °С и в горячем состоянии приваривался второй торец планок. Установка поперечных планок осуществлялась последовательно от среднего по длине колонны пояса. После остывания стальные планки укорачивались и создавали эффект преднапряжения [5].

Продольные уголки стальной обоймы усиления включались в совместную работу с усиливаемыми железобетонными колоннами механическим способом с помощью винтовых домкратов [6]. Для этого домкраты были смонтированы на временные опорные столики, закрепленные с помощью стяжных болтов к продольным уголкам обоймы. Указанные домкраты упирались в выше-расположенные железобетонные балки перекрытия через упорные швеллера и неопределенные прокладки. После достижения расчетного значения предварительного напряжения (40...70 МПа) упорные швеллера приваривались к продольным уголкам стальной обоймы, фиксируя их в сжатом состоянии. Разность напряжений в параллельных стой-

ках не превышала 10 %.

Стальные обоймы с обетонированием (см. рис. 3, а, в) применялись как для усиления, так и для восстановления железобетонных колонн первого и второго этажей подготовительного отделения. Заготовку и установку элементов стальных обойм с обетонированием выполняли в соответствии с техническими решениями на усиление аналогично работам по усилению железобетонных колонн стальными обоймами без обетонирования. При этом предварительное напряжение поперечных планок не производилось, а предварительное напряжение продольных стоек выполняли механическим способом с помощью винтовых домкратов до укладки бетонной смеси (рис. 5).

При выборе типа опалубки для восстановления и усиления железобетонных колонн предпочтение отдавалось опалубочным системам заводского изготовления, обеспечивающим многократную оборачиваемость и качество бетонной поверхности [4]. Технология *опалубочных работ* учитывала заданные сроки и темп ремонтно-восстановительных работ при минимальном количестве опалубочных комплектов.

Для восстановления и усиления железобетонных колонн стальной обоймой с обетонированием использовалась инвентарная мелкощитовая опалубка из щитов МОДОСТР-КОМБИ, а в труднодоступных и стесненных местах – инвентарная разборно-переставная мелкощитовая опалубка (рис. 6).

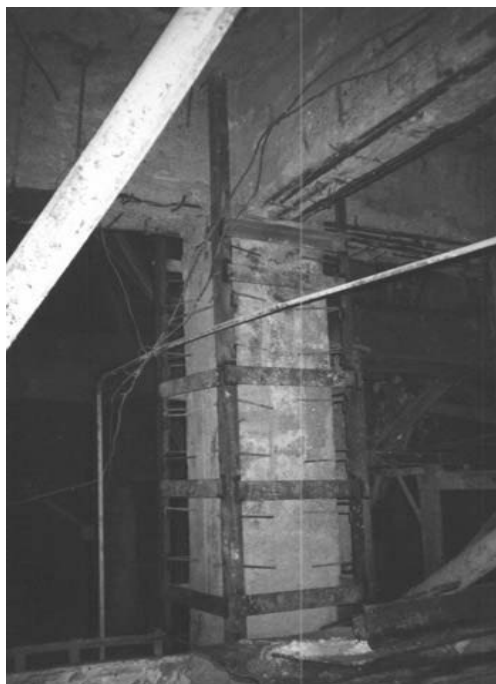
При применении инвентарной опалубочной системы МОДОСТР-КОМБИ (рис. 6, а) щиты опалубки объединялись угловыми элементами и замками в неразъемные блоки [4]. Монтаж элементов опалубки происходил с использованием средств малой механизации (подъемники, лебедки), в труднодоступных и стесненных местах – вручную.

Для усиления единичных железобетонных колонн в труднодоступных и стесненных местах использовалась

неинвентарная разборно-переставная мелкощитовая опалубка, состоящая из деревянных щитов (доска  $150 \times 30$  мм) и деревянных схваток (брус  $80 \times 50$ ,

шаг 600 мм) (рис. 6, б). Ее установку выполняли вручную с перекрытий, а при высоте более 1,3 м – с инвентарных подмостей и лесов.

а)

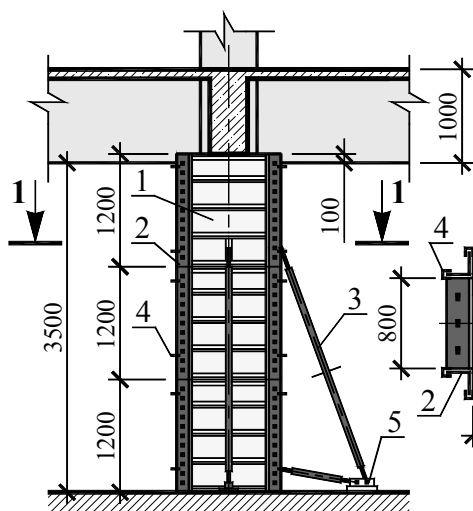


б)



Рис. 5. Усиление железобетонной колонны стальной обоймой с обетонированием: а – верхняя часть стальной обоймы усиления; б – нижняя часть стальной обоймы усиления

а)



б)

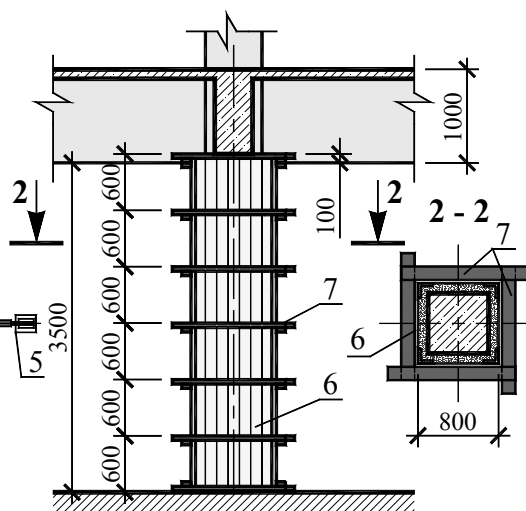


Рис. 6. Применяемая опалубка для усиления железобетонных колонн стальной обоймой с обетонированием: а – инвентарная мелкощитовая опалубка МОДОСТР-КОМБИ; б – неинвентарная разборно-переставная мелкощитовая опалубка; 1 – базовый щит (высота 1200 мм, ширина 800 мм); 2 – наружный угол; 3 – регулируемый подкос; 4 – замок; 5 – подпятник; 6 – деревянные щиты опалубки (доска  $150 \times 30$  мм); 7 – деревянные схватки (брус  $80 \times 50$  мм)



Монтаж элементов опалубки осуществляли ярусами высотой 1200 мм по мере укладки и уплотнения бетонной смеси. Крепление щитов опалубки к элементам стальной обоймы усиления колонны производили при помощи хомутов, схваток и клиньев. Демонтаж опалубки осуществлялся после достижения бетоном усиления прочности не менее 50 % от проектной.

Бетонные работы являлись заключительными из проводимого комплекса мероприятий по восстановлению и усилению железобетонных колонн

стальной обоймой с обетонированием. Для обетонирования колонн применялся бетон класса С20/25. Технология производства бетонных работ включала *приготовление, транспортировку, подачу, укладку и уход за бетоном* [6].

Сопряжение усиливаемых железобетонных колонн с балочными железобетонными перекрытиями позволило подавать и укладывать бетонную смесь в конструкцию усиления непосредственно через проемы в верхней части опалубки, а в труднодоступных местах – торкретированием (рис. 7).

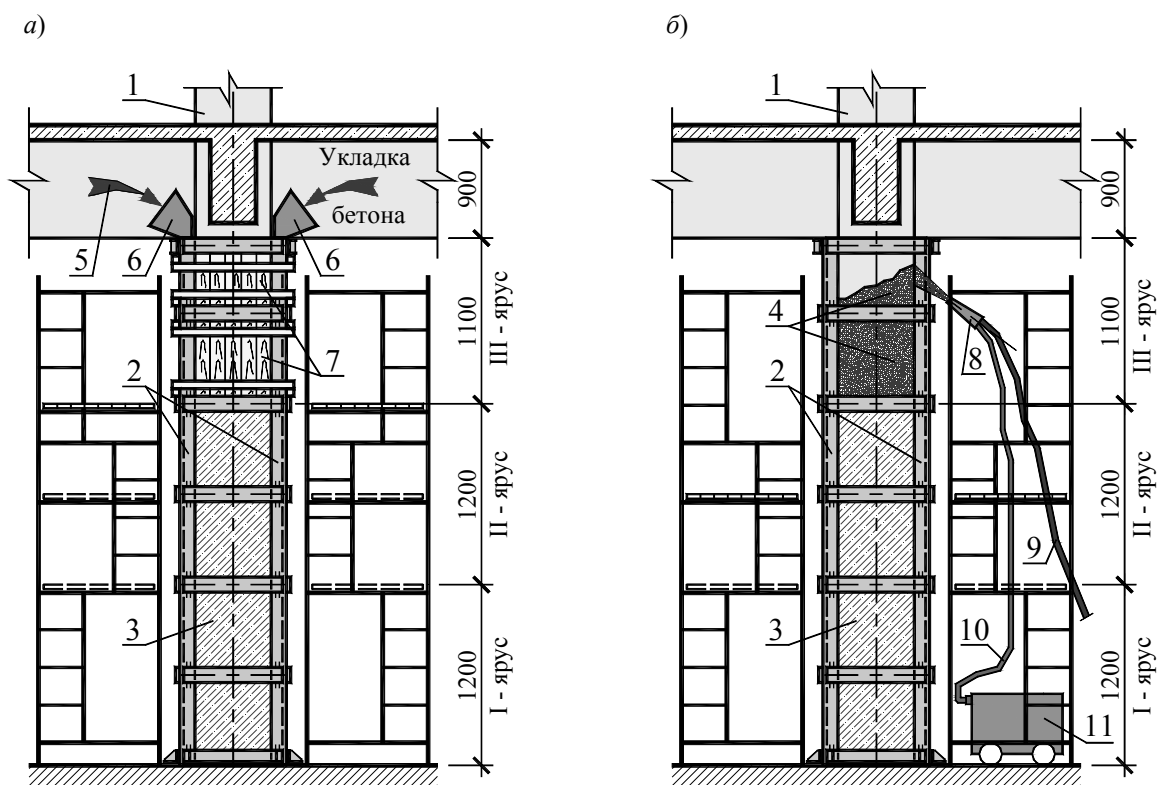


Рис. 7. Применяемые способы подачи и укладки при усилении железобетонных колонн стальной обоймой с обетонированием: а – подача и укладка бетонной смеси через проемы в верхней части опалубки; б – бетонирование конструкции усиления торкретированием; 1 – усиливаемая колонна; 2 – стальная обойма усиления; 3 – бетонная обойма; 4 – торкрет-бетон; 5 – бетонная смесь; 6 – распределительная воронка; 7 – опалубка; 8 – сопло; 9 – материальный шланг; 10 – шланг для воды; 11 – компрессор

При подаче и укладке бетонной смеси через проемы опалубки фронт бетонных работ по высоте разбивался на три яруса. Высота первого и второго ярусов составляла 1200 мм, а третьего – 1100 мм (рис. 7, а). Уплот-

нение бетонной смеси осуществлялось глубинным вибратором с гибким валом. Толщина укладываемых слоев не превышала 500 мм. Торкретирование производилось в два слоя толщиной по 50 мм каждый. Второй слой нано-

сился после отвердевания первого. Торкретирование усиливаемой колонны выполнялось снизу вверх (рис. 7, б). На лицевой поверхности торкретбетона не допускалось наличия высолов, трещин, следов выхода арматуры и механических повреждений.

После завершения бетонных работ выполнялся уход за твердеющим бетоном путем периодического его увлаж-

нения. Для ускорения набора прочности бетоном и сокращения ремонтно-восстановительных работ был дополнительно организован электропрогрев [4].

Виды на восстановленные и усиленные железобетонные колонны подготовительного отделения цеха АЦИ ОАО «Кричевцементношифер» представлены на рис. 8.

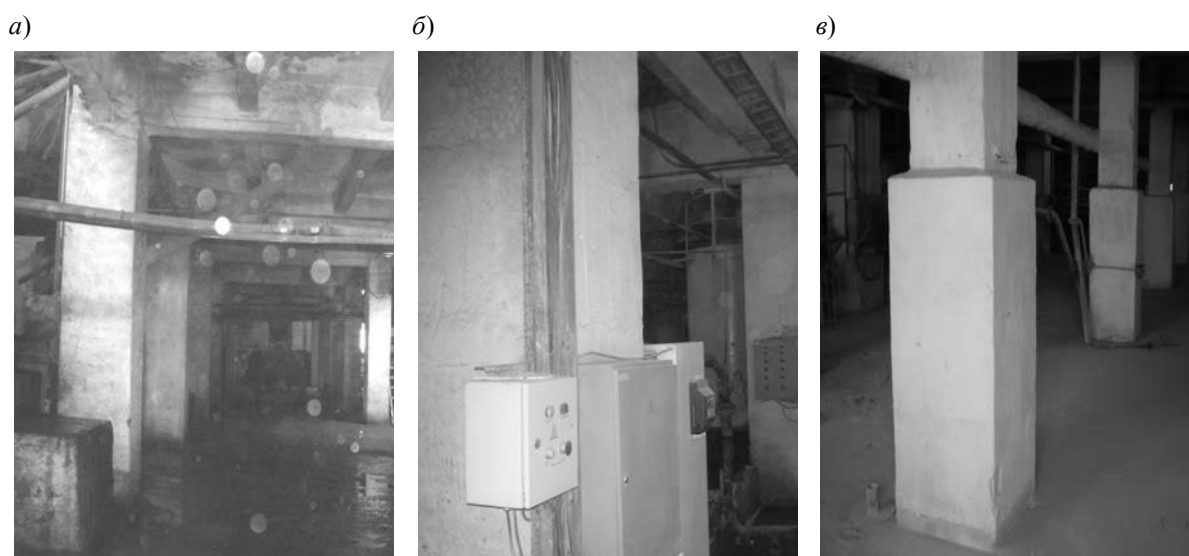


Рис. 8. Вид на восстановленные и усиленные железобетонные колонны подготовительного отделения цеха АЦИ ОАО «Кричевцементношифер»: а – усиленные железобетонные колонны 1-го этажа; б – усиленные железобетонные колонны 2-го этажа; в – местное усиление железобетонных колонн 2-го этажа

### Заключение

На основе результатов теоретических и экспериментальных исследований разработаны рекомендации производства ремонтно-восстановительных работ, содержащие технические и организационно-технологические решения по восстановлению и усилению, схемы производства опалубочных и бетонных работ, а также устройства стальных обойм для усиления железобетонных колонн, внедрение которых в производственных условиях на АЦИ ОАО «Кричевцемент-

ношифер» позволило получить годовой экономический эффект 4,0 млн белорус. р. в ценах 2001 г. (стоимость на текущий момент 7030 белорус. р.).

Безаварийная эксплуатация подготовительного отделения цеха АЦИ в течение последних 17 лет подтвердила на практике эффективную работоспособность и долговечность способа усиления стальной обоймой с обетонированием для железобетонных колонн при многочисленных значительных и критических дефектах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ТКП 45-1.04-305–2016.** Техническое состояние и техническое обслуживание зданий и сооружений. Основные требования / МАиС РБ. – Минск, 2016. – 107 с.
2. **ТКП 45-1.04-37–2008\*.** Обследование строительных конструкций зданий и сооружений. Порядок проведения / МАиС РБ. – Минск, 2014. – 39 с.
3. **Завадскас, Э.-К. К.** Системотехническая оценка технологических решений строительного производства / Э.-К.К. Завадскас. – Ленинград: Стройиздат, 1991. – 254 с.
4. **ТКП 45-1.03-314–2018.** Возведение строительных конструкций, зданий и сооружений. Основные требования / МАиС РБ. – Минск, 2018. – 123 с.
5. Рекомендации по оценке состояния и усилению строительных конструкций промышленных зданий и сооружений. – Москва: Стройиздат, 1991. – 184 с.
6. **Опанасюк, И. Л.** Организационно-технологические правила восстановления эксплуатационных качеств железобетонных колонн : практические рекомендации / И. Л. Опанасюк, С. В. Данилов. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2013. – 75 с.

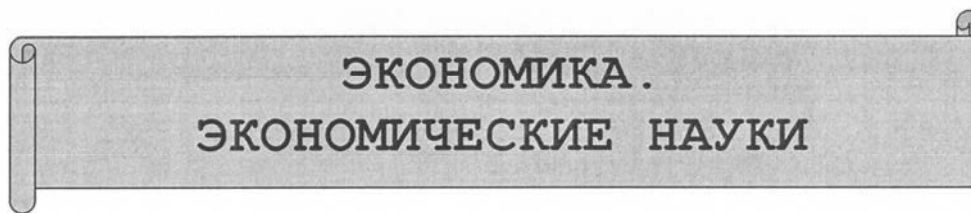
*Статья сдана в редакцию 7 марта 2019 года*

**Иван Лукьянович Опанасюк**, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: 8-029-542-96-82.

**Сергей Васильевич Данилов**, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет. Тел.: 8-029-745-95-97.

**Ivan Lukyanovich Apanasiuk**, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. Phone: 8-029-542-96-82.

**Sergey Vasilyevich Danilov**, senior lecturer, Belarusian-Russian University. Phone: 8-029-745-95-97.



УДК 669.018

*К. А. Токменинов*

**ПОВЫШЕНИЕ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ПРОДУКЦИИ  
НА ПРОМЫШЛЕННОМ ПРЕДПРИЯТИИ НА ПРИМЕРЕ ОАО «ОЛЬСА»**

UDC 669.018

*К. А. Tokmeninov*

**INCREASE OF PRODUCTS COMPETITIVENESS AT THE INDUSTRIAL  
ENTERPRISE BASED ON THE EXAMPLE OF JSC «OLSA»**

**Аннотация**

Рассмотрены вопросы состояния рынка основной продукции производства ОАО «Ольса», снижение ее конкурентоспособности, прежде всего, по сравнению с аналогичной продукцией китайского производства, выявлены главные причины. На базе проведенного анализа предложены некоторые пути развития предприятия с повышением конкурентоспособности продукции. В качестве основных направлений рассмотрены вопросы замены некоторых используемых материалов на инновационные, а также внедрение прогрессивных технологий и оборудования.

**Ключевые слова:**

компануд, технология порошковой металлургии, станки для водоабразивной резки, компоненты материала.

**Abstract**

The state of the market for the main products manufactured by JSC "Olsa" are considered, as well as a decrease in their competitiveness, primarily compared to the similar products made in China, and the main causes of this decrease are determined. Based on the analysis conducted, some ways of the enterprise development are proposed, which will lead to an increase in product competitiveness. As the main directions of the development, the issues of substituting innovative materials for some of the materials used are considered, as well as the introduction of advanced technologies and equipment.

**Keywords:**

compound, powder metallurgy technology, abrasive water-jet cutting machines, material components.

Продукция ряда промышленных предприятий Республики Беларусь испытывает определенные трудности в сбыте. Следует учесть, что промышленность страны экспортноориентирована. Рынки постоянно расширяются, но при этом возрастают требования к качеству продукции и уровню цен. Беларусь проводит работу по вступлению в ВТО.

Это в еще большей степени повысит требования к конкурентоспособности белорусской продукции. В настоящее время интенсивно развиваются всесторонние связи с Китайской Народной Республикой, что неизбежно приводит к росту объемов китайской продукции на рынке Республики Беларусь. Следует учитывать, что промышленные техно-

логии и оборудование в КНР, в основном, инновационные. Это существенно повышает конкурентоспособность продукции производства КНР. Вместе с тем моральный и физический износ оборудования на промышленных предприятиях Республики Беларусь достаточно высок. Именно поэтому весьма актуален вопрос перевода производства ряда видов продукции на новые технологии с использованием новых материалов отечественного производства. Это будет также соответствовать программе импортозамещения.

Приняв в качестве базового пред-

приятия ОАО «Ольса», рассмотрим два вида выпускаемой им продукции, необходимость повышения конкурентоспособности которых стоит достаточно остро.

ОАО «Ольса» на протяжении нескольких десятков лет выпускает скважинный насос «Ручеек». Объемы выпуска указанной продукции достаточно высоки – они изменяются в пределах 400...700 тыс. единиц в год. В случае снижения цены продукции на 20...23 % сбыт может составить 900 тыс. единиц в год. На рис. 1 представлен насос «Ручеек».



Рис. 1. Насос «Ручеек»

В настоящее время себестоимость насоса составляет 13 долл. США. Аналогичный насос китайского производства, по оценкам предприятия, имеет себестоимость на 3...4 долл. США ниже.

Проведенными в рамках дипломного проектирования исследованиями состава используемых в насосе материалов и технологии его изготовления было установлено, что снижение себестоимости изделия может быть осуществлено по двум направлениям: применение более прогрессивных электроизоляционных материалов (компаундов) и использование более прогрессивной технологии изготовления корпусов насоса из алюминиевых сплавов.

Необходимость замены применяемых для заливки электрической части насоса компаундов вызвана высоким процентом брака выпускаемой продукции из-за электрического пробоя в процессе приемочных испытаний готовых изделий. Бракуется до 5 % готовой продукции. При объеме выпуска 500 тыс. единиц в год брак составит 25 тыс. изделий. При этом потери предприятия могут достигать 250 тыс. долл. США с учетом того, что часть деталей из забракованной продукции возвращается в производство.

Применяемые на предприятии компаунды на 60 % состоят из эпоксид-

ной смолы ЭД-20, производимой в Республике Беларусь, и на 40 % из кварцевого песка. Песок используется в качестве балластного элемента, удешевляющего компаунд. Указанный состав компаунда освоен в промышленности более 50 лет назад. Основным недостатком используемого компаунда является то, что в кварцевом песке могут содержаться токопроводящие элементы, которые способствуют электрическому пробоя в процессе проводимых приемочных испытаний продукции. Кроме того, плотность песка существенно выше плотности смолы ЭД-20. Кварцевый песок имеет плотность  $\rho = 1,5 \text{ г/см}^3$ , а смола –  $\rho = 1,2 \text{ г/см}^3$ . Из-за разной плотности в полученной для заливки смеси песок начинает достаточно быстро оседать, что ухудшает качество компаунда.

Исходя из полученных результатов, необходимо было подобрать заменитель кварцевого песка, который бы отвечал следующим требованиям:

- имел электроизоляционные свойства не хуже, чем основной компонент – смола ЭД-20;
- плотность заменителя должна быть близка к плотности ЭД-20;
- стоимость не должна существенно превышать стоимость кварцевого песка.

В результате проведенных исследований в качестве заменителя кварцевого песка был выбран современный материал – гранулированный поликарбонат.

Удельная электрическая прочность поликарбоната и прочность эпоксидной смолы приблизительно равны и составляют в среднем 20 МВ/м. Плотность поликарбоната совпадает с плотностью смолы ЭД-20 и составляет  $\rho = 1,2 \text{ г/см}^3$ , что исключает расслоение компаунда. По стоимостным характеристикам различные поликарбонаты имеют достаточно большой ценовой диапазон. Но в данном случае к прочностным характеристикам и техноло-

гичности переработки гранул поликарбоната в фасонные изделия требования не предъявляются. Может быть выбран поликарбонат, представленный на рынке Республики Беларусь, стоимость которого выше стоимости кварцевого песка приблизительно на 10 %, что приемлемо. Таким образом, порошок поликарбоната, полученный из гранул, является наиболее эффективным заменителем кварцевого песка при изготовлении компаунда для заливки электрической части скважинного насоса «Ручеек».

При определении снижения себестоимости насоса за счет изменения состава используемого компаунда были учтены факторы, исключаящие отбраковку насосов из-за электрического пробоя, и некоторое увеличение себестоимости ввиду более высокой цены поликарбоната. При объеме производства 500 тыс. единиц в год снижение себестоимости за счет снижения брака для одного насоса составит около 1 р. Таким образом, установлено, что замена некоторых материалов или их составляющих на современные позволяет снизить себестоимость продукции и повысить ее качество. Это утверждение можно распространить не только на конкретную рассматриваемую продукцию, но и в целом на машиностроительную продукцию.

Вторым направлением снижения себестоимости насоса «Ручеек» и повышения конкурентоспособности является изменение технологии изготовления корпуса изделия.

Корпус насоса состоит из двух элементов – крышки и основания. Материалом для обеих частей является литейный алюминиевый сплав.

В настоящее время корпус изготавливается методом литья под давлением в кокиль. Указанной технологии присущи следующие недостатки, приводящие к повышенным производственным затратам:

- толщина стенки в силу технологических ограничений не может быть ме-

нее 3 мм, что является избыточным для заданных эксплуатационных условий;

– наличие отходов литья, требующих повторной переплавки, что приводит к дополнительному расходу материала и электрической энергии на переплав отходов;

– расплавление алюминия из заготовок для литья корпуса осуществляется в электропечах открытого типа, потребляющих электроэнергию круглосуточно, что приводит к повышенным энергетическим затратам.

Проведенными исследованиями было установлено, что в аналогичных насосах «Ручеек» производства корпуса изготовлены методом порошковой металлургии. Это позволяет уменьшить толщину стенки корпуса насоса в цилиндрической части с 3 до 1 мм. Причем для всего корпуса вес снизится в среднем на 0,75 кг. Для справки: вес насоса без кабеля – 3,6 кг. Цена на литейный алюминий в чушках составляет в среднем 2 р./кг.

Таким образом, при переходе с существующей технологии изготовления корпусов насосов методом литья на технологию порошковой металлургии стоимость материала корпуса снизится на 1,5 р.

Следует также учесть, что при существующей технологии неизбежны отходы, около 10 %, что в стоимостном выражении составит 0,4 р. Таким образом, общая сумма экономии на материале корпуса – 1,9 р.

Замена технологии изготовления корпуса насоса методом литья на спекание из порошков обеспечивает также экономию электроэнергии и снижение энергетических затрат.

В настоящее время для плавления алюминиевых чушек используются тигельные печи. Мощность печи составляет 50 кВт. Следует учесть, что для обеспечения работы печи в течение смены она должна быть заранее прогрета до рабочей температуры. Поэтому в качестве времени работы печи при одно-

сменном графике принимается 12 ч. Время получения двух элементов одного корпуса составляет 10 мин.

В случае перехода на технологию порошковой металлургии целесообразно использовать камерные печи, например, СНО–4.10.3/12 производства РФ. Это оборудование имеет мощность 24 кВт при размерах камеры 400 × 1000 × 300 мм, что вполне достаточно для производства корпусов насоса. Стоимость оборудования составляет 20 тыс. долл. США. Снижение мощности установки, по сравнению с существующей, будет в 2,1 раза.

Время изготовления корпуса сократится на 2 мин, а время работы оборудования при односменном графике будет составлять 8 ч, что в 1,5 раза меньше, чем при существующей технологии и используемом оборудовании.

Учитывая все приведенные факторы, энергозатраты на изготовление одного корпуса снизятся в 2,3 раза. При действующих тарифах на электроэнергию экономия затрат на изготовление одного корпуса составит 1,2 р.

В результате проведенного исследования установлено, что при замене кварцевого песка, входящего в состав компаунда для заливки электрической части насоса, на поликарбонат брак из-за электрического пробоя будет отсутствовать. Это снизит себестоимость на 1 р.

Переход с технологии изготовления корпуса насоса литьем из алюминиевого сплава на технологию порошковой металлургии снизит себестоимость корпуса за счет сокращения расхода материала на 1,9 р. При этом существенно повысится качество насосов «Ручеек».

Снижение расходов за счет энергетической составляющей будет 1,2 р.

Таким образом, общее снижение себестоимости насоса составит 4,1 р.

Прогнозируемое снижение себестоимости производства погружных насосов, безусловно, обеспечит им высокую конкурентоспособность.

Можно также заявить, что внедре-

ние современных материалов, инновационных технологий и оборудования позволит повысить конкурентоспособность не только вновь осваиваемой промышленной продукции, но и при модернизации выпускаемой.

Вторым объектом анализа путей снижения затрат является складная кровать, выпускаемая ОАО «Ольса», представленная на рис. 2.

В процессе изучения конструкции и технологии изготовления этого изде-

лия были выявлены проблемы:

- недостаточная грузоподъемность кровати;
- повышенные затраты на этапе заготовительного производства из-за больших отходов и повышенного фонда оплаты труда;
- большая доля ручного труда на этапе заготовки элементов изделия;
- низкая производительность труда.

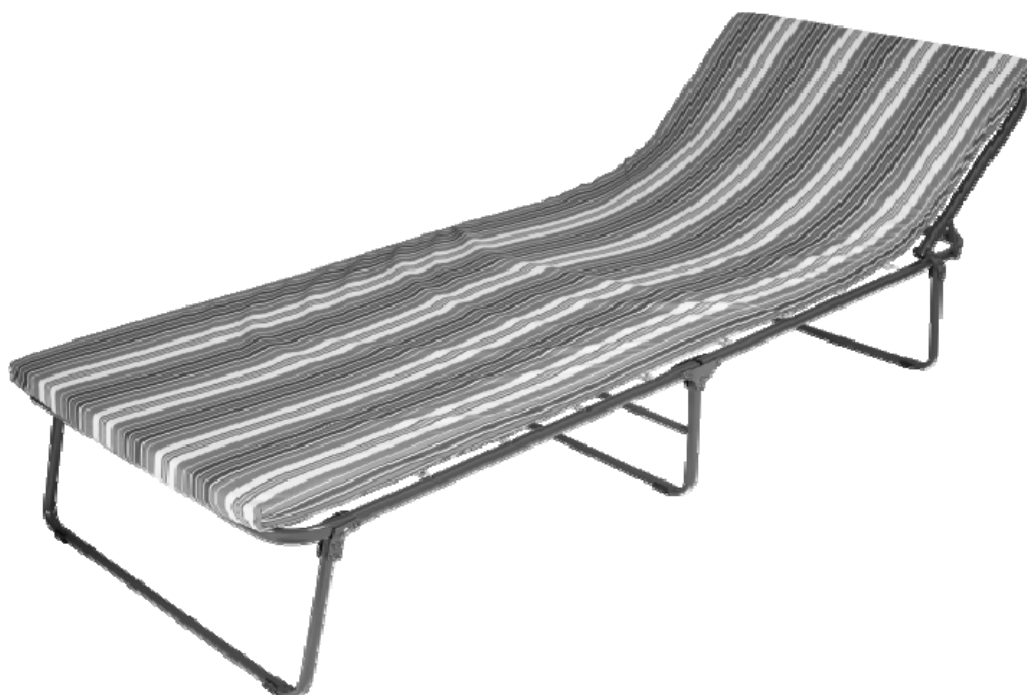


Рис. 2. Кровать раскладная «Надин»

Рассмотрим пути решения выше-описанных проблем.

Необходимо повысить несущую нагрузку раскладной кровати (раскладушки) без увеличения ее веса и стоимости. Проведенными исследованиями были установлены возможные пути решения проблемы. Рассматривалась технология запенивания внутренних полостей элементов раскладушки пенополиуретаном, установка внутри элементов кровати ребер жесткости, изменения конфигурации поперечного сечения сортамента элементов раскладушки.

Наиболее рациональным оказалось решение заменить круглое сечение трубы каркаса кровати на профиль квадратной формы. В настоящее время изготовление сортамента в виде труб различного профиля осуществляется на автоматизированных линиях. При этом конфигурация профиля задается в программе системы управления оборудованием и конечная стоимость продукции практически не зависит от нее.

Основным видом деформации элементов раскладушки является прогиб ее элементов. Для этого вида деформа-



ции большое значение имеет жесткость нагружаемых элементов. Для упрощения оценки несущей способности раскладушки рассмотрим жесткость сплошного круглого и квадратного сечений. Для круглого сечения жесткость

$$W = \frac{\pi D^3}{32}, \quad (1)$$

где  $D$  – диаметр сечения.

Для квадратного сечения жесткость

$$W = \frac{b^3}{6}, \quad (2)$$

где  $b$  – сторона сечения.

В настоящее время для изготовления раскладушек используется круглая труба диаметром 18 мм. Для обеспечения равной массы примем сторону квадратной трубы – 16,5 мм.

Используя формулы (1) и (2), а также установленные размеры круглого и квадратного поперечных сечений элементов раскладушки, определим, что жесткость и несущая способность раскладушки с элементами квадратного профиля на 30 % выше, чем с круглым.

Несущая способность раскладушки в настоящее время составляет 100 кг. Это является сдерживающим фактором сбыта. Повышение несущей способности до 130 кг позволит увеличить сбыт до планируемых объемов.

Следует также отметить, что использование квадратного профиля упрощает конструкцию элементов взаимного крепления деталей раскладушки и улучшает технологию изготовления и сборки.

При обосновании дальнейших путей снижения производственных затрат рассматриваемой продукции был проведен анализ морального и физического износа оборудования на промышленных предприятиях г. Могилева и Могилевской области. Он показал, что наибольший процент износа оборудования

наблюдается на заготовительных участках, который составляет 75 % и более. Поэтому предметом рассмотрения будет также являться целесообразность и эффективность замены существующих прессов на ОАО «Ольса» на прогрессивное оборудование.

Следует отметить, что современные автоматизированные линии и иное оборудование с ЧПУ позволяют существенно расширить номенклатуру используемого сортамента, повысить конструктивные и технологические характеристики изделий, снизить производственные затраты.

В настоящее время рубка исходных труб для получения шести заготовок элементов раскладной кровати осуществляется на прессах. Этот процесс имеет ряд недостатков, приводящих к повышенным затратам:

- большой процент отходов, так как установленные на прессе механические ограничители длины заготовки не позволяют оперативно изменять этот параметр. За один установ рубится вся партия одного типоразмера элемента раскладной кровати. Для следующего элемента пресс перенастраивается. Это приводит к повышенным отходам и увеличению трудоемкости работ;
- исходные трубы, имеющие стандартную длину 6 м, рубятся по одной штуке. В процессе задействованы двое рабочих. Это приводит к низкой производительности и повышенному фонду оплаты труда;
- при рубке края трубы деформируются. Это вызывает необходимость проведения дополнительных операций по их правке, что приводит к дополнительным затратам.

Рассмотрим пути решения выявленных проблем, снижения производственных затрат и повышения конкурентоспособности продукции.

Для снижения количества отходов и повышения производительности труда необходимо существующие технологии и оборудование заменить на прогрес-

сивное с ЧПУ. Оборудование должно обеспечивать возможность раскроя всего пакета исходных труб одновременно. Тем самым будет существенно сокращено операционное время, повышена производительность труда. При раскрое пачки труб должна быть заложена возможность резки заготовок различной длины по установленной программе, что позволит минимизировать отходы. В процессе резки труб механическое воздействие на края заготовок должно отсутствовать или быть минимальным. Этим будет исключена операция правки краев заготовок после их резки.

Указанным требованиям наиболее полно отвечают технология лазерной резки и технология водоабразивной резки металлов. При выборе окончательного варианта технологии следует учитывать фактические условия организации труда на предприятии, квалификацию персонала, возможность организации обслуживания высокотехнологического оборудования. Для ОАО «Ольса» наиболее полно указанным требованиям отвечают установки для водоабразивной резки. Эти установки менее требовательны к условиям эксплуатации, чем лазерные.

Следует отметить, что технологии водоабразивной резки в последние годы начинают интенсивно внедряться в различные отрасли промышленности. Это связано с тем, что при сравнительно невысокой цене они весьма эффективно могут применяться в различных производствах. Основные преимущества установок для водоабразивной резки следующие:

- повышенные производительность, скорость резки и качество деталей;
- высокая точность позиционирования режущей головки и, как следствие, высокая точность изготовления. Как правило, последующая механическая обработка не требуется;
- материал заготовки может быть любым (нет необходимости использовать дорогостоящий «совместимый с

лазером» материал). Это позволит расширить возможности предприятия по использованию установок;

- существенная экономия сырья за счет сокращения отходов;
- практически отсутствует механическое воздействие на заготовку (поперечная и вертикальная силы), что исключает ее деформацию;
- глубина реза стальной заготовки может достигать 200 мм;
- отсутствует тепловое повреждение материала заготовки;
- качество зоны реза практически соответствует готовому изделию, финишная обработка не требуется или минимальна.

Резка материала осуществляется водным лучом с добавкой кварцевого или гранатового песка. Давление в струе достигает 500 атм. Специальным насосом обеспечивается указанное давление в струе воды, которая формируется в водный луч при продавливании через алмазную фидьеру.

Маркетинговые исследования показали, что с учетом стандартной длины исходных для резания на заготовки труб 6 м целесообразно рассмотреть приобретение портальной установки гидроабразивной резки KNUTH Water-Jet 2060. Такая установка производства КНР предлагается на белорусском рынке. Размеры рабочего стола представлены в нескольких вариантах. В данном случае наиболее подходящим будет стол длиной до 6 м, шириной 0,8 м, при этом обеспечивается резка металла толщиной до 20 см.

С учетом того, что один слой заготовок на столе выбранной установки будет включать 44 трубы диаметром 18 мм, теоретически может быть осуществлен раскрой 13 слоев одновременно, что составит 572 шт. Из этого следует, что одна пачка труб должна содержать от 44 труб и более. Верхний предел количества заготовок в пачке параметрами оборудования практически не ограничен.

На рис. 3 изображена рассмотренная установка.

Цена указанной установки в зави-

симости от комплектации может составлять 73122...83909 белорус. р.



Рис. 3. Портальная установка гидроабразивной резки KNUTH Water-Jet 2060

Проведенными исследованиями установлено, что срок окупаемости инвестиционного проекта по замене имеющегося оборудования на заготовительном участке ОАО «Ольса» для производства кроватей раскладных на высокотехнологичную установку гидроабразивной резки не превысит 2...2,5 лет при существующих объемах производства.

### **Выводы**

Проведенными исследованиями установлено, что на ряде промышленных предприятий имеет место значительный физический и моральный износ используемого оборудования и применение в ряде случаев устаревших технологий, связанных с ним.

Необходимо отметить, что за последние годы в мире достигнут значительный прогресс в разработке и применении новых конструкционных материалов и изделий на их основе. Однако широкое их внедрение в продукцию

иногда идет более замедленными темпами, чем следовало ожидать. Речь ведется о новых полимерных и композиционных материалах, малоотходных и безотходных технологиях, таких как порошковая металлургия и некоторых других. Большой эффект дает внедрение инновационного оборудования с ЧПУ, в частности, для гидроабразивной резки материалов.

На базе ОАО «Ольса» были выявлены проблемы недостаточной конкурентоспособности продукции и причины этого.

Предложены пути решения выявленных проблем, позволяющие существенно снизить производственные затраты на основную продукцию предприятия. Приведены некоторые обоснования эффективности мероприятий, связанных с внедрением инновационного оборудования, технологий, материалов.

Предложены конкретные варианты применения новых материалов и технологий при производстве погружных насосов «Ручеек» и раскладных

кроватей, которые обеспечат устойчивое положение на рынках соответствующей продукции.

Следует отметить, что выявленные проблемы при производстве и сбыте продукции, разработанные предложения на базе предприятия ОАО «Ольса» являются в значительной степени типовыми и для других промышленных

предприятий.

Поэтому предложенный подход может быть применен более широко, в том числе при проведении студенческих научно-исследовательских работ и дипломном проектировании для последующего практического использования в работе предприятий.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учебное пособие / Под ред. А. А. Берлина. – 3-е изд., испр. – Санкт-Петербург: Профессия, 2011. – 560 с.
2. **Токменинов, К. А.** Эффективность освоения полимерных композиционных материалов в промышленности / К. А. Токменинов // Russian Economic Bulletin. – 2018. – № 3. – С. 12–17.

**Константин Александрович Токменинов**, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.  
E-mail: KTokmeninov@gmail.com.

**Konstantin Alexandrovich Tokmeninov**, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.  
E-mail: KTokmeninov@gmail.com.

# ВЕСТНИК БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 2(63) 2019

Ответственный за выпуск

И. В. Брискина

Оформление обложки

Н. П. Полевничая

Дизайн и компьютерная верстка

Н. П. Полевничая

Адрес редакции: пр-т Мира, 43, Белорусско-Российский университет, 212000, г. Могилев.  
Телефон: 25-09-05, e-mail: bru@bru.by.

Журнал «Вестник Белорусско-Российского университета» зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь. Свидетельство о государственной регистрации средства массовой информации № 1240 от 08.02.2010.

Подписано в печать 28.05.2019. Формат 60×84/8. Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура Таймс.  
Усл. печ. л. 11,86. Уч.-изд. л. 6,31. Тираж 100 экз. Заказ 2763.

Отпечатано в унитарном полиграфическом коммунальном предприятии «Могилевская областная укрупненная типография имени Спиридона Соболя». ЛП 02330/23 от 30.12.2013. Ул. Первомайская, 70, 212030, г. Могилев.