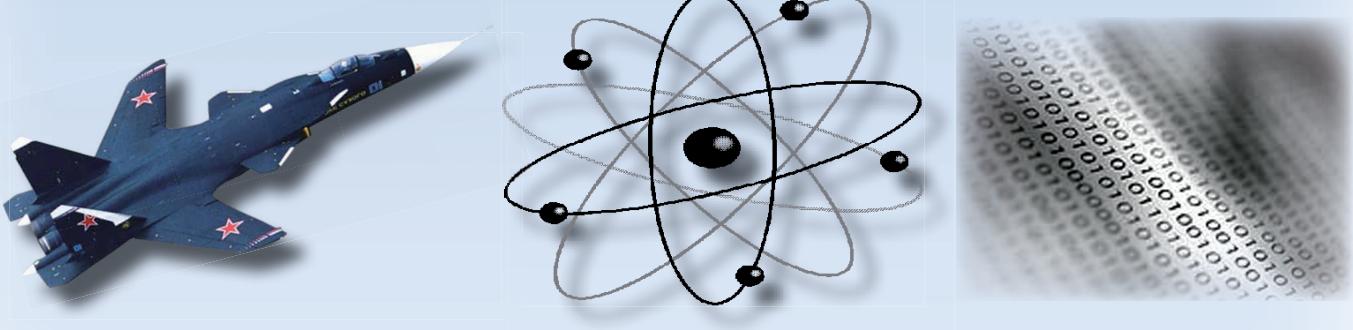


# Учёные записки

ISSN 2076-4359  
№ III (59)  
2022

Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета



Науки о природе и технике

16+



Рукописи проходят обязательное рецензирование.  
Редакция не возвращает рукописи авторам.

Журнал включен в перечень ведущих рецензируемых периодических изданий ВАК РФ

Зарегистрировано Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций России. Свидетельство ПИ № ФС7738212 от 30.11.2009.

ISSN 2076-4359 = Ученые записки Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta

Уважаемые авторы, пожалуйста, присылайте свои материалы на адрес электронной почты: journal@knastu.ru

Правила оформления материалов размещены на странице журнала «Учёные записки КнАГТУ», находящейся на сайте <http://www.knastu.ru>

Материалы, оформленные с нарушением данных правил, к рассмотрению не принимаются.

Адрес учредителя и издателя: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, д. 27  
Телефон для справок: +7 (4217) 24-13-48

Адрес редакции: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Комсомольская, д. 50, ауд.508  
Телефон для справок: +7 (4217) 24-13-48

Индекс журнала в каталоге Роспечать: 66090.  
Цена свободная.  
© Все права на опубликованные материалы принадлежат учредителю журнала – ФГБОУ ВО «КнАГУ», при их цитировании ссылка на журнал обязательна.

**Учредитель:**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

Журнал основан в 2010 году

#### Редакционная коллегия:

Главный редактор журнала:

Алексей Иванович Евстигнеев,  
д-р техн. наук, проф.

Заместитель главного редактора,  
ответственный секретарь серии «Науки о природе и технике»:

Сергей Николаевич Иванов,  
д-р техн. наук, доц.

Заместитель главного редактора,  
ответственный секретарь серии «Науки о человеке, обществе и культуре»:

Галина Алексеевна Шушарина,  
канд. филол. наук, доц.

Технический редактор:

Татьяна Николаевна Карпова

Дизайн и верстка:

Оксана Вадимовна Приходченко,  
канд. техн. наук

Менеджер информационных ресурсов:

Иван Константинович Андрианов,  
канд. техн. наук

#### Серия: «Науки о природе и технике»

Отделы:

1. Авиационная и ракетно-космическая техника (Сергей Иванович Феоктистов, д-р техн. наук, проф.);
2. Энергетика (Вячеслав Алексеевич Соловьев, д-р техн. наук, проф.);
3. Управление, вычислительная техника и информатика (Вячеслав Алексеевич Соловьев, д-р техн. наук, проф., Сергей Иванович Феоктистов, д-р техн. наук, проф., Сергей Николаевич Иванов, д-р техн. наук, доц., Николай Алексеевич Тарануха, д-р техн. наук, проф., Анатолий Александрович Буренин, д-р физ.-мат. наук, член-корреспондент РАН);
4. Математика и механика (Анатолий Александрович Буренин, д-р физ.-мат. наук, член-корреспондент РАН);
5. Машиностроение (Михаил Юрьевич Сарилов, д-р техн. наук, доц., Борис Николаевич Марьин, д-р техн. наук, проф., Борис Яковлевич Мокрицкий, д-р техн. наук, доц., Сергей Иванович Феоктистов, д-р техн. наук, проф., Анатолий Александрович Буренин, д-р физ.-мат. наук, член-корреспондент РАН);
6. Металлургия и металловедение (Владимир Алексеевич Ким, д-р техн. наук, проф., Олег Викторович Башков, д-р техн. наук, доц.);
7. Флот и кораблестроение (Николай Алексеевич Тарануха, д-р техн. наук, проф., Виктор Михалович Козин, д-р техн. наук, проф.);
8. Науки о земле и безопасности жизнедеятельности человека (Ирина Павловна Степанова, д-р техн. наук, проф.);
9. Строительство и архитектура (Николай Петрович Крадин, д-р архитектуры, проф., член-корреспондент РААСН, Олег Евгеньевич Сысоев, д-р техн. наук, доц.).

#### Серия: «Науки о человеке, обществе и культуре»

Отделы:

1. Философия, социология и культурология (Татьяна Алексеевна Чабанюк, д-р культурологии, проф., Виктория Юрьевна Прокофьева, д-р филол. наук, проф., Вера Ивановна Юдина, д-р культурологии, доц., Надежда Юрьевна Костюрина, д-р культурологии, доц., Илья Игоревич Докучаев, д-р филос. наук, проф., Александр Георгиевич Никитин, д-р филос. наук, проф.);
2. Филология и искусствознание (Олег Александрович Смоляков, д-р филос. наук, проф.);
3. Психология и педагогика (Татьяна Евгеньевна Наливайко, д-р пед. наук, проф.);
4. Политология и право (Владимир Александрович Смоляков, д-р полит. наук);
5. История (Жанна Валерьевна Петрунина, д-р ист. наук, проф.);
6. Экономика (Геннадий Иванович Усанов, д-р экон. наук, проф., Елена Витальевна Кизиль, д-р экон. наук, доц.).

Периодичность: два раза в квартал (один номер каждой серии в квартал)

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА  
«УЧЁНЫЕ ЗАПИСКИ КОМСОМОЛЬСКОГО-НА-АМУРЕ ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА»**

**СЕРИЯ: «НАУКИ О ПРИРОДЕ И ТЕХНИКЕ»**

**АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА**

ВЯЧЕСЛАВ ИВАНОВИЧ ШПОРТ, доктор технических наук

ЦУЙ СЮЙ, профессор Шенъянского аэрокосмического университета (КНР)

**ЭНЕРГЕТИКА**

АЛЕКСАНДР ЛООС, доктор философии, профессор Академии Грюндига в Нюрнберге (Германия)

ИШТВАН ВАЙДА, доктор технических наук, профессор, директор Института автоматики Будапештского университета технологии и экономики (Венгрия)

ШАНДОР ХАЛАС, доктор технических наук, профессор Будапештского университета технологии и экономики (Венгрия)

**УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА**

ЮРИЙ НИКОЛАЕВИЧ КУЛЬЧИН, академик РАН, доктор физико-математических наук, директор Института автоматики и процессов управления ДВО РАН

ТАКАО ИТО, доктор технических наук, профессор факультета бизнес-управления Университета Милякизи (Япония)

**МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА**

НИКИТА ФЁДОРОВИЧ МОРОЗОВ, академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой теории упругости Санкт-Петербургского государственного университета

ВЛАДИМИР АЛЕКСЕЕВИЧ ЛЕВИН, академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом математического моделирования, механики и мониторинга природных процессов Института автоматики и процессов управления ДВО РАН

БОРИС ДМИТРИЕВИЧ АННИН, академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом механики деформируемого твёрдого тела Института гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН

**МАШИНОСТРОЕНИЕ**

ЭДУАРД СТЕПАНОВИЧ ГОРКУНОВ, академик РАН, доктор технических наук, профессор, директор Института машиноведения УрО РАН

АНАТОЛИЙ ИВАНОВИЧ ХОЛЬКИН, академик РАН, доктор химических наук, профессор, главный научный сотрудник Института общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова

СЕРГЕЙ НИКОЛАЕВИЧ ГРИГОРЬЕВ, доктор технических наук, профессор, ректор Московского государственного технологического университета «Станкин»

**МЕТАЛЛУРГИЯ И МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ**

ЕВГЕНИЙ НИКОЛАЕВИЧ КАБЛОВ, академик РАН, доктор технических наук, профессор, директор Всероссийского института авиационных материалов

КОНСТАНТИН ВСЕВОЛОДОВИЧ ГРИГОРОВИЧ, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией диагностики материалов Института metallurgии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН

**ФЛОТ И КОРАБЛЕСТРОЕНИЕ**

ЛЕОНID АНАТОЛЬЕВИЧ НАУМОВ, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, директор Института проблем морских технологий ДВО РАН

**НАУКИ О ЗЕМЛЕ И БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНЕНДЕЯТЕЛЬНОСТИ**

ЕВГЕНИЙ ПЕТРОВИЧ КИСЕЛЕВ, академик РАСХН, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, ведущий научный сотрудник Дальневосточного ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательского института сельского хозяйства РАСХН

**СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА**

ШИ ТИЕМАО, доктор философии, профессор, проректор Шенъянского архитектурно-строительного университета (КНР)

**СЕРИЯ: «НАУКИ О ЧЕЛОВЕКЕ, ОБЩЕСТВЕ И КУЛЬТУРЕ»**

**ФИЛОСОФИЯ, СОЦИОЛОГИЯ И КУЛЬТУРОЛОГИЯ**

ДАВИД ИЗРАИЛЕВИЧ ДУБРОВСКИЙ, доктор философских наук, профессор, ведущий научный сотрудник Института философии РАН

ЮРИЙ МИХАЙЛОВИЧ СЕРДЮКОВ, доктор философских наук, профессор, профессор кафедры философии, социологии и права Дальневосточного государственного университета путей сообщения

**ФИЛОЛОГИЯ И ИСКУССТВОЗНАНИЕ**

СВЕТЛНА ГРИГОРЬЕВНА ТЕР-МИНАСОВА, доктор филологических наук, профессор, президент факультета иностранных языков и регионоведения Московского государственного университета

ВАН ЦЗИНЬЛИН, доктор философии, профессор, директор Института международного образования Чанчуньского университета (КНР)

**ПСИХОЛОГИЯ И ПЕДАГОГИКА**

ЕКАТЕРИНА ИОСИФОВНА АРТАМОНОВА, доктор педагогических наук, профессор кафедры педагогики высшей школы Московского педагогического государственного университета им. В. И. Ленина

**ПОЛИТОЛОГИЯ И ПРАВО**

НИКОЛАЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ МЕРЕЦКИЙ, доктор юридических наук, профессор, заведующий кафедрой уголовно-правовых дисциплин Дальневосточного государственного университета путей сообщения

**ИСТОРИЯ**

АЛЕКСАНДР МАНУЭЛЬЕВИЧ РОДРИГЕС-ФЕРНАНДЕС, доктор исторических наук, профессор, заведующий кафедрой новой и новейшей истории Московского педагогического государственного университета им. В. И. Ленина

**ЭКОНОМИКА**

АЛЕКСАНДР ЕВСТРАТЬЕВИЧ ЗУБАРЕВ, доктор экономических наук, профессор, первый проректор по стратегическому развитию и международному сотрудничеству Тихоокеанского государственного университета

УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА  
MANAGEMENT, COMPUTER SCIENCE AND INFORMATICS

**Феоктистов С. И., Андрианов И. К., Лин Х.**  
**S. I. Feoktistov, I. K. Andrianov, H. Lin**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ  
ПРИ ФОРМОИЗМЕНЕНИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТРУБ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
КОНИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ**

**DETERMINATION OF THE STRESS-STRAIN STATE WHEN FORMING CYLINDRICAL  
PIPES USING CONICAL TOOLING**

**Феоктистов Сергей Иванович** – доктор технических наук, профессор кафедры «Авиастроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: [serg\\_feo@mail.ru](mailto:serg_feo@mail.ru).

**Sergey I. Feoktistov** – Doctor of Engineering, Professor, Aircraft Building Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Pr., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: [serg\\_feo@mail.ru](mailto:serg_feo@mail.ru).

**Андрianов Иван Константинович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Общая физика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: [ivan\\_andrianov\\_90@mail.ru](mailto:ivan_andrianov_90@mail.ru).

**Ivan K. Andrianov** – PhD, Assistant Professor, General Physics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Pr., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: [ivan\\_andrianov\\_90@mail.ru](mailto:ivan_andrianov_90@mail.ru).

**Лин Хтет** – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27.

**Lin Htet** – Post-graduate Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Pr., Komsomolsk-on-Amur, 681013.

**Аннотация.** Рассмотрен метод определения напряжённо-деформированного состояния при деформировании цилиндрических труб с использованием конической оснастки, позволяющий определить поле напряжений и деформаций с учётом сжимаемости и упрочнения материала, который использует аппроксимацию диаграммы деформирования степенной функцией. Подход основан на использовании метода переменных параметров упругости при рассмотрении таких процессов, как раздача, протяжка, обжим (обжатие) и волочение.

**Summary.** A method for determining the stress-strain state during the deformation of cylindrical pipes using conical equipment is considered, which makes it possible to determine the stress field, taking into account the compressibility and hardening of the material, which uses the approximation of the deformation diagram by a power function. The approach is based on the use of the method of variable elasticity parameters when considering such processes as expansion, broaching, crimping (compression) and drawing.

**Ключевые слова:** цилиндрическая труба, раздача, протяжка, обжим (обжатие), волочение, упрочнение, степенная функция, метод переменных параметров упругости.

**Key words:** cylindrical pipe, distribution, broaching, crimping (compression), drawing, hardening, power function, method of variable elasticity parameters.

УДК 593.3

*Научное исследование выполнено при финансовой поддержке «Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских учёных и по государственной поддержке ведущих научных школ Российской Федерации» в рамках стипендии по проекту СП-2200.2022.5 «Разработка моделей и алгоритмов расчёта пластического формообразования заготовок штамповочного производства».*

Одной из важнейших задач при разработке технологических процессов деформирования цилиндрических труб, таких как раздача и протяжка, обжим и волочение, является определение напряжённо-деформированного состояния с учётом упрочнения материала. В большинстве известных решений аналогичных процессов рассматривается идеально жесткопластический материал или материал с линейным упрочнением [1–4].

При определении напряжённого состояния и при расчёте деформаций в процессах деформирования цилиндрических труб используется метод переменных параметров упругости [4; 5], позволяющий учитывать не только изменение толщины в процессе деформирования, но и упрочнение материала, которое для титановых и алюминиевых сплавов хорошо описывается степенной функцией. Стоит отметить, что вопросы моделирования пластических областей деформируемых изделий, оценки характеристик, влияющих на процесс деформирования образцов, рассматривались в работах [6–9]. Проблемы расчёта цилиндрических оболочек, находящихся в условиях силового нагружения, изучались в трудах [10–12]. Технологические вопросы формообразования, задачи оптимизации процессов раздачи и обтяжки рассматривались в исследованиях [13–15]. Задачи оценки шероховатости поверхностей изделий в условиях контактного взаимодействия, вопросы термомеханического анализа в рамках авиастроительных конструкций изучались в работах [16–25].

### Методика определения напряжённо-деформированного состояния при деформировании цилиндрических труб

Рассмотрим процесс деформирования цилиндрических труб с использованием конической оснастки. Решение поставленной задачи для идеально жесткопластического материала представлено в работах [3; 4]. В зависимости от схемы нагружения при увеличении диаметра трубы с использованием конического пuhanсона эти операции будут называть раздачей и протяжкой, при уменьшении диаметра в конической матрице – обжимом (обжатием) и волочением [4]. На рис. 1, а и б, при приложении сил сверху изображены соответственно схемы раздачи и обжима, при приложении сил снизу – протяжки и волочения.

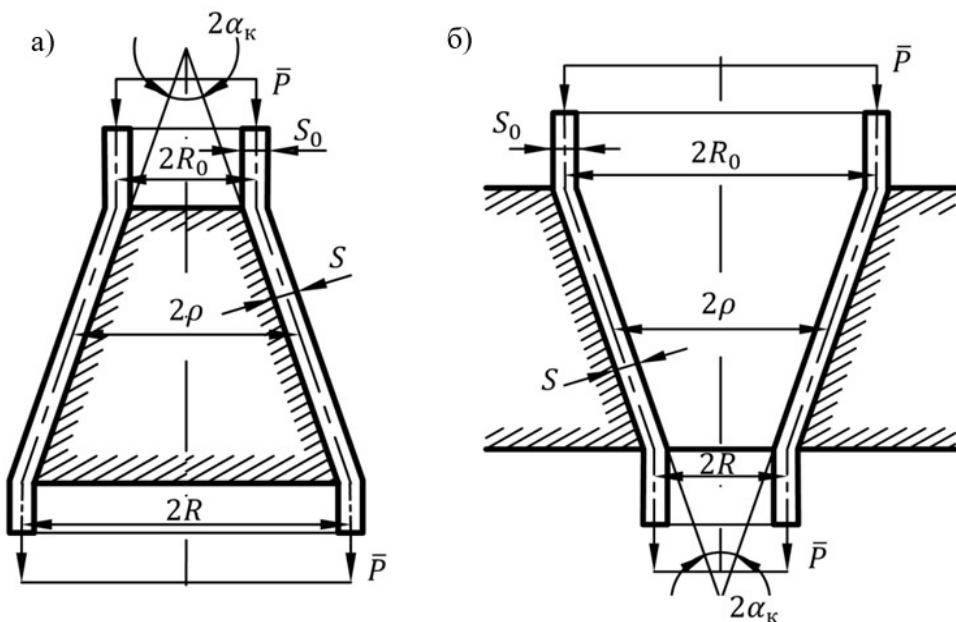


Рис. 1. Схемы раздачи и протяжки с использованием конического пuhanсона (а), обжима и волочения в конической матрице (б)

Для случая раздачи и протяжки, обжима и волочения с использованием конической оснастки уравнение равновесия может быть записано в следующей форме:

$$\frac{d(\sigma_m S)}{d\rho} = \frac{\sigma_\theta(1 + f_{tp} \operatorname{ctg} \alpha_k) - \sigma_m}{\rho} S, \quad (1)$$



где  $\sigma_m$  – меридиональное главное нормальное напряжение;  $\sigma_\theta$  – окружное главное нормальное напряжение;  $f_{tp}$  – коэффициент трения;  $S$  – толщина оболочки;  $\alpha_k = \text{const}$  – угол конусности Пуансо или угол конусности матрицы;  $\rho$  – радиус окружности срединной поверхности оболочки в сечении, перпендикулярном оси оболочки.

Для решения задачи о напряжённо-деформированном состоянии методом переменных параметров необходимо получить интегральное уравнение равновесия в деформациях.

Запишем уравнение (1) в виде

$$\frac{d(\sigma_m S)}{d\rho} + \frac{1}{\rho}(\sigma_m S) = \frac{\sigma_\theta S(1 + f_{tp} \operatorname{ctg} \alpha_k)}{\rho}.$$

Это уравнение можно рассматривать как линейное неоднородное уравнение первой степени:

$$Y' + A(\rho)Y = B(\rho), \quad (2)$$

где  $Y = \sigma_m S$ ,  $A(\rho) = 1/\rho$ ,  $B(\rho) = \sigma_\theta S(1 + f_{tp} \operatorname{ctg} \alpha_k)/\rho$ .

Такое уравнение можно решить методом Бернули:

$$Y = U(\rho)V(\rho),$$

$$\text{где } U(\rho) = \exp \left[ \int -A(\rho) d\rho \right] = 1/\rho, V(\rho) = \int \frac{B(\rho)}{U(\rho)} d\rho + C = \int B(\rho) \rho d\rho + C.$$

Таким образом, общее решение уравнения (2) можно записать в виде

$$Y = \frac{1}{\rho} \left[ \int B(\rho) \rho d\rho + C \right],$$

или

$$\sigma_m S = \frac{1}{\rho} \left[ \int_{\rho_0}^{\rho} \sigma_\theta S(1 + f_{tp} \operatorname{ctg} \alpha_k) d\rho + C \right]. \quad (3)$$

Используя уравнение (3) и уравнения связи напряжений и деформаций, в виде

$$\left. \begin{aligned} \sigma_m &= \frac{E^*}{(1 - \mu^*{}^2)} (e_m + \mu^* e_\theta) \\ \sigma_\theta &= \frac{E^*}{(1 - \mu^*{}^2)} (e_\theta + \mu^* e_m) \end{aligned} \right\},$$

а также учитывая граничные условия, можно записать интегральное уравнение равновесия в деформациях:

$$e_m = -\mu^* e_\theta + \frac{(1 - \mu^*{}^2)}{E^* S \rho} \left[ \int_{\rho_0}^{\rho} \frac{E^* S(1 + f_{tp} \operatorname{ctg} \alpha_k)}{(1 - \mu^*{}^2)} (e_\theta + \mu^* e_m) d\rho + \sigma_{m\rho_0} S_{\rho_0} \right], \quad (4)$$

где  $E^*$  и  $\mu^*$  – переменные параметры упругости;  $\sigma_{m\rho_0}$  и  $S_{\rho_0}$  – соответственно меридиональное напряжение и толщина деформируемой трубы на одной из границ.

Рассмотрим порядок решения задачи об определении напряжённо-деформированного состояния при деформировании цилиндрических труб со свободным краем ( $\sigma_{m\rho_0} = 0$ ) в конических матрицах. В этом случае окружные деформации можно считать известными и зависящими только от координаты рассматриваемой точки:

$$e_\theta = \ln \left( \frac{\rho}{R_0} \right),$$

где  $R_0$  – начальный радиус срединной поверхности трубы.

Границные условия определяются на свободном крае трубы. Положение свободного края трубы зависит от рассматриваемого процесса. При обжиме и раздаче  $\rho_0 = R$ , а при волочении и протяжке  $\rho_0 = R_0$  (см. рис. 2).

Решение по определению напряжённо-деформированного состояния трубы, в соответствии с методом переменных параметров упругости, проводится методом последовательных приближений по рекуррентной схеме с использованием уравнения (4) для заданных граничных условий, т. е. при известном меридиональном напряжении на свободном крае трубы  $\sigma_{m\rho_0} = 0$ :

$$e_m^{(k+1)} = -\mu^{*(k)} \ln\left(\frac{\rho}{R_0}\right) + \frac{(1 - \mu^{*(k)2})}{E^{*(k)} S^{(k)} \rho} * \\ * \left[ \int_{\rho_0}^{\rho} \frac{E^{*(k)} S^{(k)} (1 + f_{tp} \operatorname{ctg} \alpha_k)}{(1 - \mu^{*(k)2})} \left( \ln\left(\frac{\rho}{R_0}\right) + \mu^{*(k)} e_m^{(k)} \right) d\rho \right],$$

где величины с индексом  $(k)$  и  $(k+1)$  обозначают соответственно их значения в  $k$ -м и  $(k+1)$ -м приближениях. Численное интегрирование проводят от  $R$  до  $R_0$  при обжиме и раздаче, а при волочении и протяжке – от  $R_0$  до  $R$ .

Как показали вычисления, результаты расчётов не зависят от выбора значений исходного приближения, поэтому в исходном приближении принимаем

$$e_m^{(0)} = 0; S^{(0)} = S_0; E^{*(0)} = 3G; \mu^{*(0)} = \mu,$$

где  $S_0$  – начальная толщина трубы;  $G$  – модуль упругости второго рода;  $\mu$  – коэффициент Пуассона.

Затем вычисляют деформации по толщине трубы:

$$e_z^{(k+1)} = \frac{\mu^{*(k)}}{(\mu^{*(k)} - 1)} \left( \ln\left(\frac{\rho}{R_0}\right) + e_m^{(k+1)} \right).$$

После оценки деформированного состояния определяют наряжённое состояние трубы, используя уравнения связи между напряжениями и деформациями:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_m^{(k+1)} &= \frac{E^{*(k)}}{(1 - \mu^{*(k)2})} (e_m^{(k+1)} + \mu^{*(k)} e_\theta^{(k+1)}) \\ \sigma_\theta^{(k+1)} &= \frac{E^{*(k)}}{(1 - \mu^{*(k)2})} (e_\theta^{(k+1)} + \mu^{*(k)} e_m^{(k+1)}) \end{aligned} \right\}.$$

После определения напряжённого состояния рассчитывают интенсивность напряжений и интенсивность деформаций и уточняют значение  $E_{\text{сек}}$ , используя уравнение аппроксимации диаграммы деформирования степенной функцией:

$$E_{\text{сек}}^{(k+1)} = \frac{A (e_i^{(k+1)})^n}{e_i^{(k+1)}}.$$

Затем уточняют значение переменных параметров упругости:

$$\left. \begin{aligned} E^{*(k+1)} &= \frac{E_{\text{сек}}^{(k+1)}}{1 + \frac{1 - 2\mu}{3E} E_{\text{сек}}^{(k+1)}}; \\ \mu^{*(k+1)} &= \frac{\frac{1}{2} - \frac{1 - 2\mu}{3E} E_{\text{сек}}^{(k+1)}}{1 + \frac{1 - 2\mu}{3E} E_{\text{сек}}^{(k+1)}}. \end{aligned} \right.$$

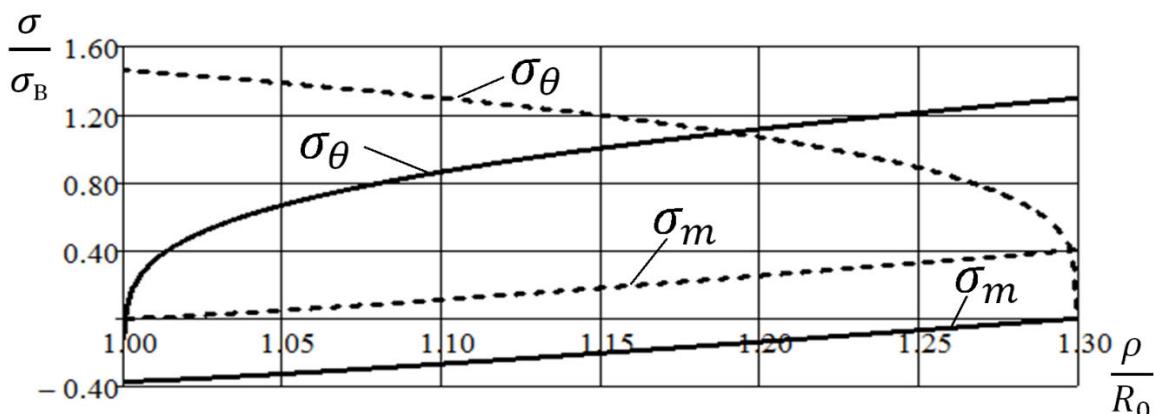
Для контроля сходимости процесса проводят сравнение значений интенсивностей напряжений:

$$|\sigma_i^{(k+1)} - \sigma_i^{(k)}| \leq \Delta\sigma_i.$$

Расчёт продолжают до тех пор, пока не будет достигнута заданная точность.

На рис. 2 представлены эпюры изменения меридиональных и окружных напряжений и эпюры изменения толщины стенки при раздаче и протяжке без противодавления. Расчёты проводились для прессованной трубы (ГОСТ 18482-79,  $R_0 = 25$  мм,  $S_0 = 1$  мм) из материала АМг6М.

а)



б)

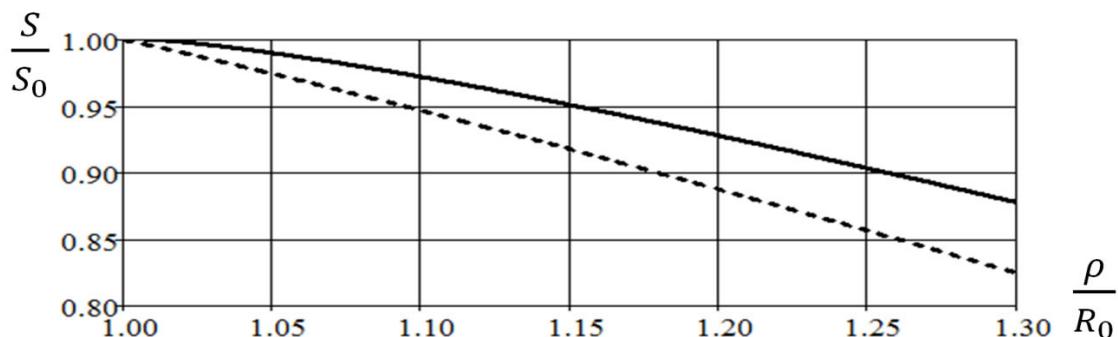


Рис. 2. Раздача и протяжка (— – раздача, - - - – протяжка): а – эпюры изменения меридиональных и окружных напряжений; б – эпюры изменения толщины стенки

Как показывает анализ приведённых эпюр, при протяжке, по сравнению с раздачей, оба напряжения растягивающие (см. рис. 2), и, соответственно, более интенсивно утоняется стенка деформируемой трубы. При обжиме, по сравнению с волочением, оба напряжения сжимающие (см. рис. 3), и, соответственно, происходит более интенсивное утолщение стенки деформируемой трубы.

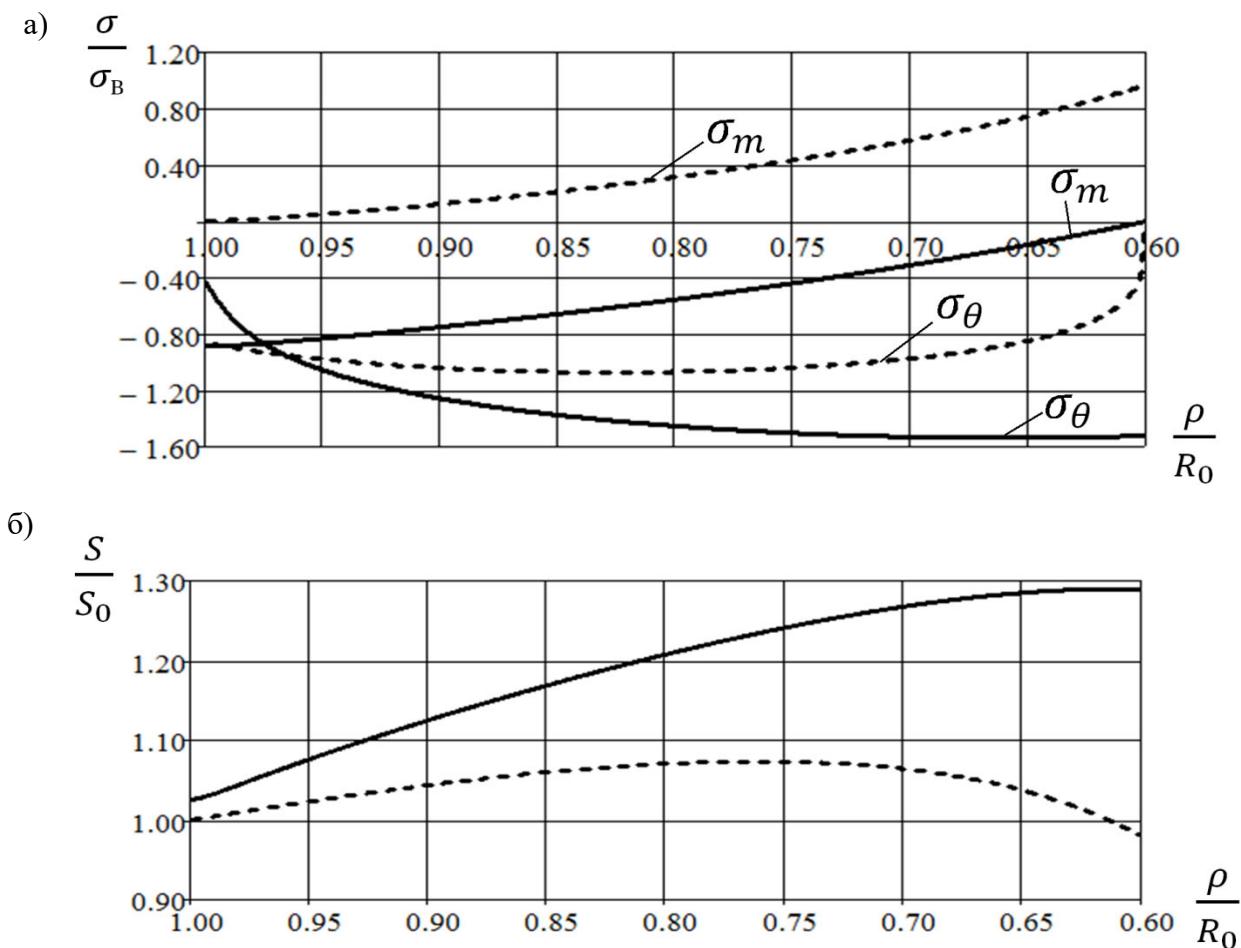


Рис. 3. Обжим и волочение (— – обжим, - - - – волочение): *а* – эпюры изменения меридиональных и окружных напряжений; *б* – эпюры изменения толщины стенки

После определения напряжённо-деформированного состояния и получения поля деформаций можно определить предельные возможности рассмотренных процессов, применяя диаграммы предельного деформирования (FLD-диаграммы).

## ЛИТЕРАТУРА

- Горбунов, М. Н. Технология заготовительно-штамповочных работ в производстве самолётов: учеб. для вузов / М. Н. Горбунов. – М.: Машиностроение, 1981. – 224 с.
- Горбунов, М. Н. Штамповка деталей из трубчатых заготовок / М. Н. Горбунов. – М.: Машгиз, 1960. – 190 с.
- Сторожев, М. В. Теория обработки металлов давлением / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.
- Малинин, Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести / Н. Н. Малинин. – М.: Машиностроение, 1975. – 399 с.
- Биргер, И. А. Круглые пластинки и оболочки вращения / И. А. Биргер. – М.: Оборонгиз, 1961. – 368 с.
- Полякова, Т. Д. Основные уравнения для моделирования пластической области в задаче об одноосном растяжении полого цилиндра / Т. Д. Полякова, О. В. Козлова // Актуальные проблемы информационно-телекоммуникационных технологий и математического моделирования в современной науке и промышленности: материалы I междунар. науч.-практ. конф. молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 20-25 марта 2021 г. / редкол.: Э. А. Дмитриев (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2021. – С. 28-30.

7. Евстигнеева, А. А. Математическая модель зависимости характеристик, влияющих на деформирование стальных образцов / А. А. Евстигнеева, О. С. Харламова, А. Л. Григорьева // Актуальные проблемы информационно-телекоммуникационных технологий и математического моделирования в современной науке и промышленности: материалы I междунар. науч.-практ. конф. молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 20-25 марта 2021 г. / редкол.: Э. А. Дмитриев (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2021. – С. 17-21.
8. Григорьева, А. Л. Растижение плоского образца в условиях плоского напряжённого состояния при различных полях скоростей перемещений / А. Л. Григорьева, А. И. Хромов, Я. Ю. Григорьев // Труды МАИ. – 2020. – № 111. – С. 1-17.
9. Брянский, А. А. Идентификация источников акустической эмиссии в полимерном композиционном материале в условиях циклического растяжения / А. А. Брянский, О. В. Башков // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2021. – № 3 (57). – С. 19-27.
10. Сысоев, О. Е. Уточнение расчётной модели колебаний для цилиндрических опор конструкций нефтегазовых платформ при передислокации / О. Е. Сысоев, Е. О. Сысоев, А. Ю. Добрышкин // Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – Т. 1. – № 3 (53). – С. 12-17.
11. Исследование свободных и вынужденных колебаний разомкнутых тонкостенных железобетонных оболочек / Е. О. Сысоев, К. К. Кахоров, О. Е. Сысоев, Е. В. Журавлева // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И. Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. – 2020. – № 1 (43). – С. 121-130.
12. Моделирование вынужденных колебаний разомкнутой оболочки с малой присоединённой массой при шарнирном опиании методом аппроксимации Паде / А. Ю. Добрышкин, О. Е. Сысоев, Е. О. Сысоев, Т. Лин // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И. Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. – 2020. – № 1 (43). – С. 22-33.
13. Моделирование процесса обтяжки панели с учётом больших деформаций в системе Marc / М. С. Дворецкий, А. Д. Макаров, К. Е. Герасимов, К. С. Бормотин // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы III Всерос. нац. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 06-10 апреля 2020 г. В 3 ч. Ч. 2 / редкол.: Э. А. Дмитриев (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2020. – С. 7-9.
14. Кравченко, Е. Г. Оценка качества технологических процессов машиностроительных производств / Е. Г. Кравченко, Т. А. Отряскина, А. А. Шершнёв // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № VII-1 (55). – С. 79-87.
15. Исследование процесса раздачи средней части трубной заготовки с подпором / С. Б. Марьин, Г. А. Щербатюк, В. Д. Кириллин, М. И. Пак // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № VII-1 (55). – С. 73-78.
16. Кравченко, Е. Г. Повышение точности контроля параметров шероховатости упрочнённых поверхностей деталей машиностроения / Е. Г. Кравченко, В. В. Алтухова // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2021. – № 8. – С. 347-352.
17. Саблин, П. А. Влияние микропрофиля обработанной поверхности на прочностные и эксплуатационные характеристики деталей машин / П. А. Саблин, В. С. Щетинин // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2021. – Т. 17. – № 8 (200). – С. 368-370.
18. Влияние режимов сварки на структуру и свойства металла шва стали 12x18h10т в различных пространственных положениях / Р. А. Мамадалиев, П. В. Бахматов, Н. В. Мартюшев, В. Ю. Скиба, А. И. Карлина // Металлург. – 2021. – № 11. – С. 43-50.
19. Атюков, Н. В. Разработка сети для распознавания образов в системе дополненной реальности / Н. В. Атюков, А. Л. Григорьева // Актуальные проблемы информационно-телекоммуникационных технологий и математического моделирования в современной науке и промышленности: материалы I междунар. науч.-практ. конф. молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 20-25 марта 2021 г. / редкол.: Э. А. Дмитриев (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2021. – С. 48-50.
20. Лапашинов, А. А. Влияние экспериментального сварочного флюса на поверхность сварного соединения / А. А. Лапашинов, П. В. Бахматов, Е. А. Старцев // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы IV Всерос. нац. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 12-16 апреля 2021 г. В 4 ч. Ч. 1 / редкол.: Э. А. Дмитриев (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2021. – С. 95-97.
21. Бердоносов, В. Д. Математическая модель взаимного движения беспилотных летательных аппаратов / В. Д. Бердоносов, Д. О. Журавлёв // Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами. – 2020. – № 3 (8). – С. 11-21.

22. Ардамехри, А. М. Моделирование поведения беспилотного летательного аппарата на основе информации с сенсоров / А. М. Ардамехри, С. А. Гордин // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы III Всерос. нац. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 06-10 апреля 2020 г. В 3 ч. Ч. 2 / редкол.: Э. А. Дмитриев (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2020. – С. 218-221.
23. Петров, А. С. Термомеханический анализ конструкции при сварке в системе Marc / А. С. Петров, М. С. Нюнайкина, К. С. Бормотин // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы III Всерос. нац. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 06-10 апреля 2020 г. В 3 ч. Ч. 2 / редкол.: Э. А. Дмитриев (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2020. – С. 31-32.
24. Колесник, М. Б. Алгоритм определения параметров передаточных элементов электромеханических преобразователей с учётом действующих напряжений / М. Б. Колесник, А. А. Просолович // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы IV Всерос. нац. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 12-16 апреля 2021 г. В 4 ч. Ч. 1 / редкол.: Э. А. Дмитриев (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2021. – С. 148-150.
25. Молчанов, И. В. Особенности конструкции стыковочного стенда хвостовой части фюзеляжа самолёта-истребителя / И. В. Молчанов, Р. И. Гусева // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы IV Всерос. нац. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 12-16 апреля 2021 г. В 4 ч. Ч. 1 / редкол.: Э. А. Дмитриев (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2021. – С. 286-288.

Феоктистов С. И., Андрианов И. К., Лин Х.  
S. I. Feoktistov, I. K. Andrianov, H. Lin

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТОЛСТОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК С УЧЁТОМ ФИЗИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ МАТЕРИАЛА

### MODELING OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THICK-WALLED CYLINDRICAL SHELLS TAKING INTO ACCOUNT PHYSICAL NONLINEARITY OF THE MATERIAL

**Феоктистов Сергей Иванович** – доктор технических наук, профессор кафедры «Авиастроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: [serg\\_feo@mail.ru](mailto:serg_feo@mail.ru).

**Sergey I. Feoktistov** – Doctor of Engineering, Professor, Aircraft Building Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Pr., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: [serg\\_feo@mail.ru](mailto:serg_feo@mail.ru).

**Андрianов Иван Константинович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Общая физика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: [ivan\\_andrianov\\_90@mail.ru](mailto:ivan_andrianov_90@mail.ru).

**Ivan K. Andrianov** – PhD, Assistant Professor, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Pr., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: [ivan\\_andrianov\\_90@mail.ru](mailto:ivan_andrianov_90@mail.ru).

**Лин Хтет** – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27.

**Lin Htet** – Post-graduate Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Pr., Komsomolsk-on-Amur, 681013.

**Аннотация.** В работе рассмотрен вопрос определения напряжённо-деформированного состояния толстостенных цилиндрических оболочек, нагруженных внутренним давлением с учётом физической нелинейности материала и сжимаемости. Задача решалась методом переменных параметров упругости при степенной аппроксимации диаграммы деформирования материала. Приведено сравнение полученных результатов с имеющимися аналитическими решениями для цилиндрических оболочек. Актуальность исследования обусловлена тем, что напряжения в таких конструкциях распределяются по толщине неравномерно, что требуется учитывать при расчёте на прочность. Кроме того, во многих современных решениях рассматривается упругопластическая модель материала без упрочнения или с линейным упрочнением, что не является точным. Согласно результатам исследования, решение осесимметричных задач методом переменных параметров упругости весьма эффективно и позволяет определять напряжённо-деформированное состояние при любой аппроксимации и схематизации диаграмм деформирования как с учётом сжимаемости материала, так и для несжимаемого материала.

**Summary.** The paper considers the problem of determining the stress-strain state of thick-walled cylindrical shells loaded with internal pressure, taking into account the physical nonlinearity of the material and compressibility. The problem was solved by the method of variable elasticity parameters with a power approximation of the deformation diagram of the material. The results obtained are compared with the available analytical solutions for cylindrical shells. The relevance of the study is due to the fact that stresses in such structures are distributed unevenly along the thickness, which must be taken into account when calculating strength. In addition, many modern solutions consider an elastic-plastic model of the material without hardening or with linear strengthening, which is not accurate. According to the results of the study, the solution of axisymmetric problems by the method of variable elasticity parameters is very effective and makes it possible to determine the stress-strain state with any approximation and diagram of deformation diagrams, both taking into account the compressibility of the material and for incompressible material.

**Ключевые слова:** толстостенная оболочка, напряжённо-деформированное состояние, переменные параметры упругости, физическая нелинейность материала.

Феоктистов С. И., Андрианов И. К., Лин Х.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ  
ТОЛСТОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК С УЧЁТОМ ФИЗИЧЕСКОЙ  
НЕЛИНЕЙНОСТИ МАТЕРИАЛА

**Key words:** thick-walled shell, stress-strain state, variable elasticity parameters, physical nonlinearity of the material.

УДК 593.3

*Научное исследование выполнено при финансовой поддержке «Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских учёных и по государственной поддержке ведущих научных школ Российской Федерации» в рамках стипендии по проекту СП-2200.2022.5 «Разработка моделей и алгоритмов расчёта пластического формообразования заготовок штамповочного производства».*

Толстостенные осесимметричные оболочки в настоящее время находят всё более широкое применение в различных инженерных конструкциях. Это сосуды высокого давления, кольцевые фундаменты, напорные трубы, тоннели и др. Напряжения в таких конструкциях распределяются по толщине неравномерно, что необходимо учитывать при расчёте на прочность. В большинстве известных решений рассматривается упругопластическая модель материала без упрочнения или с линейным упрочнением. Но, как показывает практика, при определении напряжённо-деформированного состояния в области упругопластического деформирования необходимо учитывать как физическую нелинейность материала (закон упрочнения при пластическом деформировании), так и сжимаемость материала.

Необходимо отметить, что оценка напряжённо-деформированного состояния нагружаемых элементов с учётом физической нелинейности является актуальной задачей, решению которой посвящён ряд исследований в трудах [1–6]. Проблематика данного исследования также нашла отражение в других научных исследованиях. Вопросы моделирования деформационных процессов в условиях сжимаемости, малоцикловой усталости исследованы в работах [7–10]. Математические аспекты вычислительных методов при решении сложных систем нелинейных уравнений затронуты в трудах [11–13]. Аспекты моделирования цилиндрических оболочек, постановки задачи колебаний и оценки напряжённо-деформированного состояния проводились в исследованиях [14–16]. Особенности проведения технологических процессов формообразования, оптимизации и моделирования процессов штамповки рассматривались в работах [17; 18]. При описании физической модели материала, построении диаграмм деформирования важную роль играют механические характеристики материала, особенности поведения материала при деформировании и его свойства, что изучалось в работах [19–23]. Технологические особенности изготовления производственных деталей, в частности в области авиастроения, рассмотрены в трудах [24–26].

Основными уравнениями для расчётов за пределами упругости по деформационной теории являются: дифференциальные уравнения равновесия, условия совместности деформаций, зависимость между деформациями и напряжениями и условия на поверхности.

Рассмотрим цилиндрическую толстостенную оболочку (трубу) бесконечной длины, которая находится под действием внутреннего давления. В этом случае можно считать, что длина трубы не меняется, т. е. деформация вдоль трубы отсутствует, *деформированное состояние плоское* и  $e_z = 0$ .

Для объёмного осесимметричного напряжённого состояния в цилиндрической системе координат уравнения равновесия имеют вид [1]

$$\frac{\partial \sigma_\rho}{\partial \rho} + \frac{\partial \tau_{\rho z}}{\partial z} + \frac{\sigma_\rho - \sigma_\theta}{\rho} = 0;$$
$$\frac{\partial \tau_{z\rho}}{\partial \rho} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{z\rho}}{\rho} = 0.$$

В случае постоянного давления касательные напряжения вдоль трубы отсутствуют, производные по  $z$  равны нулю, а условия равновесия определяются одним уравнением:

$$\frac{d\sigma_\rho}{d\rho} = \frac{\sigma_\theta - \sigma_\rho}{\rho}. \quad (1)$$

Уравнения совместности логарифмических деформаций для осесимметричного деформированного состояния можно записать в виде дифференциального уравнения [2]:

$$\frac{de_\theta}{d\rho} = \frac{1 - \exp(e_\theta - e_\rho)}{\rho}, \quad (2)$$

где  $e_\rho$  и  $e_\theta$  – соответственно радиальные и тангенциальные (окружные) логарифмические деформации.

Уравнения связи между напряжениями и деформациями, в соответствии с методом переменных параметров упругости [3; 4], запишем в виде

$$\left. \begin{aligned} e_\rho &= \frac{1}{E^*} [\sigma_\rho - \mu^*(\sigma_\theta + \sigma_z)] \\ e_\theta &= \frac{1}{E^*} [\sigma_\theta - \mu^*(\sigma_z + \sigma_\rho)] \\ e_z &= \frac{1}{E^*} [\sigma_z - \mu^*(\sigma_\rho + \sigma_\theta)] \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где  $E^*$  и  $\mu^*$  – переменные параметры упругости [5].

Интенсивности напряжений и логарифмических деформаций в главных напряжениях и деформациях определяются выражениями

$$\begin{aligned} \sigma_i &= \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_\rho - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_\rho)^2}; \\ e_i &= \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(e_\rho - e_\theta)^2 + (e_\theta - e_z)^2 + (e_z - e_\rho)^2}. \end{aligned} \quad (4)$$

Диаграмма деформирования материала как связь между интенсивностью напряжений и интенсивностью логарифмических деформаций задаётся степенной функцией:

$$\sigma_i = \begin{cases} E_{\text{сек.упр}} & \text{при } e_i \leq e_{i\text{т}} \\ A e_i^n & \text{при } e_i > e_{i\text{т}} \end{cases}, \quad (5)$$

где  $E_{\text{сек.упр}} = \sigma_i / e_i = 3E/(2 + 2\mu)$  – значение секущего модуля в упругой области.

Для успешной реализации метода переменных параметров упругости необходимо получить интегральные уравнения.

В уравнении совместности логарифмических деформаций (2) проведём замену:

$$\frac{de_\theta}{d\rho} = \frac{1}{\exp(e_\theta)} \frac{d(\exp(e_\theta))}{d\rho}$$

и запишем данное уравнение в виде

$$\frac{d(\exp(e_\theta))}{d\rho} = \frac{1}{\rho} \exp(e_\theta) - \frac{1}{\rho} \exp(2e_\theta - e_\rho). \quad (6)$$

Условия на наружной поверхности оболочки (граничные условия): при  $\rho = R$ ,  $e_\theta = e_{\theta R} = \ln(R/R_0)$ ,  $\sigma_{\rho R} = 0$ .

Проведя очередную замену –  $\exp(e_\theta) = Y$ , представим уравнение (6) в виде нелинейного дифференциального уравнения первой степени:

$$\frac{dY}{d\rho} = A(\rho) \cdot Y + B(\rho),$$

где

$$A(\rho) = \frac{1}{\rho},$$

$$B(\rho) = -\frac{1}{\rho} \exp(2e_\theta - e_\rho).$$

Решаем это уравнение методом Бернулли, согласно которому общее решение уравнения (6) можно представить в виде

$$\exp(e_\theta) = -\rho \int \frac{1}{\rho^2} \exp(2e_\theta - e_\rho) d\rho + C \rho. \quad (7)$$

Принимая во внимание граничные условия – при  $\rho = R$ ,  $e_\theta = e_{\theta R} = \ln(R/R_0)$ , определим постоянную интегрирования  $C$ :

$$C = \frac{1}{R_0}.$$

Выражая из уравнения (7) тангенциальную логарифмическую деформацию и учитывая граничные условия, получим

$$e_\theta = \ln \left( -\rho \int_R^\rho \frac{1}{\rho^2} \exp(2e_\theta - e_\rho) d\rho + \frac{\rho}{R_0} \right), \quad (8)$$

где  $R_0$  – наружный радиус трубы в исходном состоянии без нагрузки,  $R$  – наружный радиус трубы в нагруженном состоянии.

Запишем полученное интегральное уравнение (8) в напряжениях, используя уравнения связи между напряжениями и деформациями (3) и учитывая, что для бесконечной трубы  $e_z = 0$  и, соответственно,  $\sigma_z = \mu^*(\sigma_\rho + \sigma_\theta)$ :

$$\sigma_\theta = \frac{\mu^*}{(1 - \mu^*)} \sigma_\rho + \frac{1}{(1 - \mu^{*2})} E^* \ln \left( -\rho \int_R^\rho \frac{1}{\rho^2} \exp \left\{ \frac{1}{E^*} [(2 + \mu^* - \mu^{*2}) \sigma_\theta - (1 + 2\mu^* + \mu^{*2}) \sigma_\rho] \right\} d\rho + \frac{\rho}{R_0} \right). \quad (9)$$

Для определения  $\sigma_\rho$  используем уравнение равновесия (1). Интегрируя данное уравнение, получим

$$\sigma_\rho = \int \frac{(\sigma_\theta - \sigma_\rho)}{\rho} d\rho + C.$$

Принимая во внимание граничные условия – при  $\rho = R$ ,  $\sigma_{\rho R} = 0$ , определим постоянную интегрирования  $C$ :

$$C = 0.$$

Таким образом получаем интегральное уравнение равновесия:

$$\sigma_\rho = \int_R^\rho \frac{(\sigma_\theta - \sigma_\rho)}{\rho} d\rho. \quad (10)$$

Решение по определению напряжённо-деформированного состояния трубы, в соответствии с методом переменных параметров упругости, проводится методом последовательных приближений по рекуррентной схеме с использованием уравнений (9) и (10) для заданных граничных условий

вий, т. е. при известном положении наружного края трубы  $R$  и радиальном напряжении на наружном крае  $\sigma_{\rho R} = 0$ :

$$\begin{aligned}\sigma_{\theta}^{(k+1)} &= \frac{\mu^{*(k)}}{(1 - \mu^{*(k)})} \sigma_{\rho}^{(k)} + \frac{1}{(1 - \mu^{*(k)2})} E^{*(k)} \ln \left( -\rho \int_R^{\rho} \frac{1}{\rho^2} \exp \left\{ \frac{1}{E^{*(k)}} [(2 + \mu^{*(k)} - \mu^{*(k)2}) \times \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \times \sigma_{\theta}^{(k)} - (1 + 2\mu^{*(k)} + \mu^{*(k)2}) \sigma_{\rho}^{(k)}] \right\} d\rho + \frac{\rho}{R_0} \right); \\ \sigma_{\rho}^{(k+1)} &= \int_R^{\rho} \frac{(\sigma_{\theta}^{(k+1)} - \sigma_{\rho}^{(k)})}{\rho} d\rho; \\ \sigma_z^{(k+1)} &= \frac{1}{2} (\sigma_{\rho}^{(k+1)} + \sigma_{\theta}^{(k+1)}),\end{aligned}$$

где величины с индексом  $(k)$  и  $(k+1)$  обозначают соответственно их значения в  $k$ -м и  $(k+1)$ -м приближениях. Численное интегрирование проводят от  $R$  до  $r^{(j)}$ , где  $r^{(j)}$  – внутренний радиус трубы в процессе деформирования. В нулевом приближении при  $j = 0$  считаем, что  $r^{(j)} = r_0$ , где  $r_0$  – внутренний радиус трубы в исходном состоянии без нагрузки.

Как показали вычисления, результаты расчётов не зависят от выбора значений исходного приближения для  $\sigma_{\rho}$ ,  $\sigma_{\theta}$ , и  $\sigma_z$ , поэтому в исходном приближении принимаем

$$\sigma_{\rho}^{(0)} = 0; \quad \sigma_{\theta}^{(0)} = 0; \quad \sigma_z^{(0)} = 0; \quad E^{(0)} = E; \quad \mu^{(0)} = \mu,$$

где  $E$  – модуль упругости материала, из которого изготовлена труба;  $\mu$  – коэффициент Пуассона.

После оценки напряжённого состояния определяют деформированное состояние трубы, используя уравнения связи между напряжениями и деформациями (3):

$$\left. \begin{aligned} e_{\rho}^{(k+1)} &= \frac{1}{E^{*(k)}} [\sigma_{\rho}^{(k+1)} - \mu^{*(k)} (\sigma_{\theta}^{(k+1)} + \sigma_z^{(k+1)})] \\ e_{\theta}^{(k+1)} &= \frac{1}{E^{*(k)}} [\sigma_{\theta}^{(k+1)} - \mu^{*(k)} (\sigma_z^{(k+1)} + \sigma_{\rho}^{(k+1)})] \\ e_z^{(k+1)} &= \frac{1}{E^{*(k)}} [\sigma_z^{(k+1)} - \mu^{*(k)} (\sigma_{\rho}^{(k+1)} + \sigma_{\theta}^{(k+1)})] \end{aligned} \right\}.$$

После расчёта деформированного состояния определяют интенсивность напряжений и интенсивность деформаций (4) и уточняют значение  $E_{\text{сек}}$ , используя уравнение (5):

$$E_{\text{сек}}^{(k+1)} = \frac{A (e_i^{(k+1)})^n}{e_i^{(k+1)}}.$$

Затем уточняют значение переменных параметров упругости [5]:

$$\begin{aligned} E^{*(k+1)} &= \frac{E_{\text{сек}}^{(k+1)}}{1 + \frac{1 - 2\mu}{3E} E_{\text{сек}}^{(k+1)}}; \\ \mu^{*(k+1)} &= \frac{\frac{1}{2} - \frac{1 - 2\mu}{3E} E_{\text{сек}}^{(k+1)}}{1 + \frac{1 - 2\mu}{3E} E_{\text{сек}}^{(k+1)}}.\end{aligned}$$

Для контроля сходимости процесса проводят сравнение значений интенсивностей напряжений:

$$\frac{\sigma_i^{(k+1)} - \sigma_i^{(k)}}{\sigma_i^{(k+1)}} 100\% \leq \Delta\sigma_i\%. \quad (11)$$

Расчёты продолжают до тех пор, пока не будет достигнута заданная точность в процентах (11).

После достижения заданной точности расчёта напряжённо-деформированного состояния уточняют положение внутреннего края трубы:

$$r^{(j+1)} = r_0 \exp(e_{\theta r}^{(j)}),$$

где  $e_{\theta r}^{(j)}$  – значение тангенциальной логарифмической деформации на верхней границе численного интегрирования, т. е. при  $\rho = r^{(j)}$ .

После уточнения внутреннего радиуса трубы в процессе деформирования и изменения верхнего предела численного интегрирования расчёты напряжённо-деформированного состояния повторяют до тех пор, пока не будет достигнута заданная точность определения внутреннего радиуса:

$$\frac{r^{(j+1)} - r^{(j)}}{r^{(j+1)}} 100\% \leq \Delta r\%.$$

После окончательного определения напряжённо-деформированного состояния можно рассчитать внутреннее давление в трубе, при котором произошло заданное перемещение наружного радиуса трубы:

$$p = -\sigma_{pr},$$

где  $\sigma_{pr}$  – значение радиального напряжения на внутренней поверхности трубы в заключение всех расчётов.

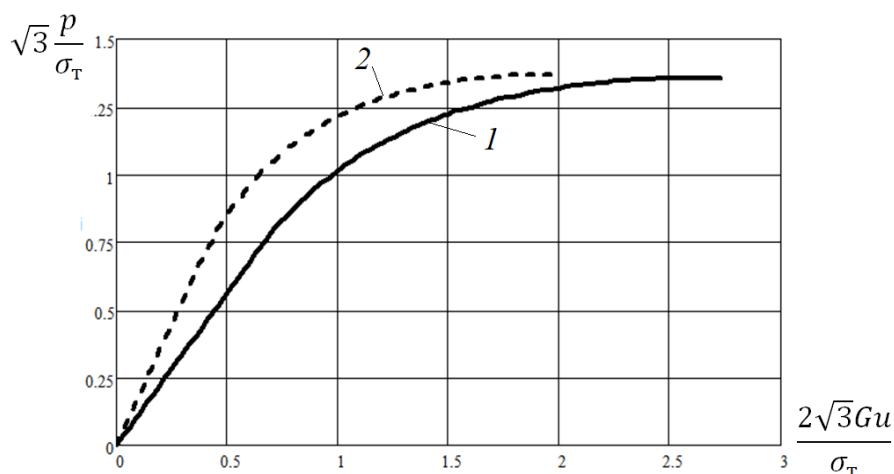
Сопоставим на примере толстостенной трубы расчёты, выполненные с учётом сжимаемости материала ( $\mu = 0,3$ ) и в случае несжимаемого материала ( $\mu = 0,5$ ), для идеального упругопластичного материала.

В этом случае диаграмма деформирования материала задаётся уравнением

$$\sigma_i = \begin{cases} E_{\text{сек.упр}} \text{ при } e_i \leq e_{it} \\ \sigma_T \text{ при } e_i > e_{it} \end{cases}.$$

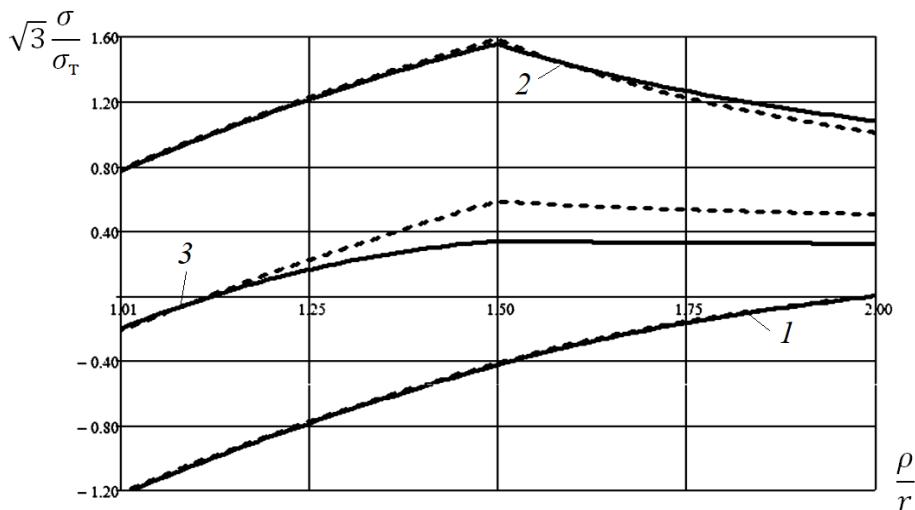
Другие параметры расчётов возьмём такими же, при которых был проведён аналогичный расчёт по теории течения и теории упругопластических деформаций [5]:  $R_0/r_0 = 2$ ,  $\mu = 0,3$ ,  $\sigma_T/\sqrt{3}G = 0,003$ , где  $G$  – модуль упругости второго рода.

Результаты расчётов представлены на рис. 1 и 2.



1 – с учётом сжимаемости материала; 2 – без учёта сжимаемости материала

Рис. 1. График зависимости давления от радиального перемещения точек наружной поверхности трубы



1 – радиальные напряжения  $\sigma_r$ ; 2 – окружные напряжения  $\sigma_\theta$ ; 3 – осевые напряжения  $\sigma_z$

Рис. 2. Эпюры напряжений в толстостенной трубе, нагруженной внутренним давлением: сплошная линия – с учётом сжимаемости материала, пунктирная линия – без учёта сжимаемости материала

Как показали сравнения полученных результатов с известными решениями аналогичных задач [5; 6], они очень хорошо согласуются.

Таким образом, можно сделать вывод, что решение осесимметричных задач методом переменных параметров упругости весьма эффективно и позволяет определять напряжённо-деформированное состояние при любой аппроксимации и схематизации диаграмм деформирования как с учётом сжимаемости материала, так и для несжимаемого материала.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Сторожев, М. В. Теория обработки металлов давлением / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.
2. Феоктистов, С. И. Автоматизация проектирования технологических процессов и оснастки заготовительно-штамповочного производства авиационной промышленности: моногр. / С. И. Феоктистов. – Владивосток: Дальнаука, 2001. – 183 с.
3. Биргер, И. А. Круглые пластинки и оболочки вращения / И. А. Биргер. – М.: Оборонгиз, 1961. – 358 с.
4. Биргер, И. А. Сопротивление материалов: учеб. пособие / И. А. Биргер, Р. Р. Мавлютов. – М.: Наука, 1986. – 560 с.
5. Малинин, Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести / Н. Н. Малинин. – М.: Машиностроение, 1975. – 399 с.
6. Прагер, В. Б. Теория идеально-пластических тел / В. Б. Прагер, Ф. Г. Ходж. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1956. – 398 с.
7. Моделирование деформационных процессов элементов сложных конструкций в условиях малоциклической деформации / А. Л. Григорьева, Я. Ю. Григорьев, А. И. Хромов, И. В. Канашин // Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – Т. 2. – № 2 (52). – С. 123-128.
8. Растяжение сжимаемой полосы с непрерывным полем скоростей перемещений в условиях плоской деформации / И. В. Канашин, А. Л. Григорьева, А. И. Хромов, Я. Ю. Григорьев, В. А. Машевский // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № III-1 (51). – С. 39-41.
9. Канашин, И. В. Растяжение полосы из сжимаемого материала с непрерывным полем скоростей перемещений в условиях плоской деформации / И. В. Канашин, А. Л. Григорьева, А. И. Хромов // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы III Всерос. науч. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 06-10 апреля 2020 г. В 3 ч. Ч. 2 / редкол.: Э. А. Дмитриев (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2020. – С. 278-281.

10. Захарова, Н. Н. К вопросу растяжения жёсткопластической полосы при плоском напряжённом состоянии / Н. Н. Захарова, А. И. Хромов // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы III Всерос. нац. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 06-10 апреля 2020 г. В 3 ч. Ч. 2 / редкол.: Э. А. Дмитриев (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2020. – С. 270-273.
11. Трещев, И. А. О некоторых классах многомерных асимптотически ограниченных функций в задачах алгоритмического анализа / И. А. Трещев // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: материалы IV Междунар. науч.-практ. конф., Комсомольск-на-Амуре, 16-26 февраля 2021 г. / редкол.: С. И. Сухоруков (отв. ред.), А. С. Гудим, Н. Н. Любушкина. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2021. – С. 298-301.
12. Юсупов, М. Ш. Применение метода гиперокружностей к двусторонней оценке упругой энергии / М. Ш. Юсупов, Н. В. Минеева // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы IV Всерос. нац. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 12-16 апреля 2021 г. В 4 ч. Ч. 3 / редкол.: Э. А. Дмитриев (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2021. – С. 335-337.
13. Страшко, Д. А. Использование ЭВМ для вычисления площадей плоских фигур с визуально заданной границей / Д. А. Страшко, М. М. Зарубин // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы III Всерос. нац. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 06-10 апреля 2020 г. В 3 ч. Ч. 2 / редкол.: Э. А. Дмитриев (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2020. – С. 388-390.
14. Моделирование колебаний тонкостенной цилиндрической оболочки при равномерном температурном воздействии при вариационной постановке задачи / Е. О. Сысоев, А. Ю. Добрышкин, О. Е. Сысоев, Е. В. Журавлева // Труды МАИ. – 2021. – № 117. – URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=122228> (дата обращения: 12.12.2020). – Текст: электронный.
15. Добрышкин, А. Ю. Гармоническое движение оболочечных конструкций / А. Ю. Добрышкин, И. В. Лозовский // Региональные аспекты развития науки и образования в области архитектуры, строительства, землеустройства и кадастров в начале III тысячелетия: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Комсомольск-на-Амуре, 16-17 декабря 2020 г. / редкол.: О. Е. Сысоев (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2021. – С. 203-205.
16. Добрышкин, А. Ю. Колебания стержня, несущего малую присоединённую массу / А. Ю. Добрышкин // Труды МАИ. – 2020. – № 110. – С. 2.
17. Бормотин, К. С. Численный метод оптимизации кинематической схемы формообразования панелей двойной кривизны / К. С. Бормотин, К. Е. Герасимов, М. И. Романютин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № VII-1 (47). – С. 59-69.
18. Кочкин, Р. А. Компьютерное моделирование процесса развалицовки трубчатой заготовки для ниппельного соединения / Р. А. Кочкин, А. К. Кузнецов, Д. А. Потянихин // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы IV Всерос. нац. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 12-16 апреля 2021 г. В 4 ч. Ч. 1 / редкол.: Э. А. Дмитриев (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2021. – С. 253-255.
19. Добрышкин, А. Ю. Экспериментальное исследование влияния воздействия температурного режима на модуль Юнга / А. Ю. Добрышкин, О. Е. Сысоев, Е. О. Сысоев // Труды МАИ. – 2020. – № 115. – С. 2.
20. Малышева, Д. П. Исследование влияния термообработки полимерных композиционных материалов на их физико-механические свойства / Д. П. Малышева, А. Е. Проценко, В. В. Петров // Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред: сборник трудов 10-й Всерос. науч. конф. с международным участием им. И. Ф. Образцова и Ю. Г. Яновского, посвящённой 100-летию со дня рождения академика И. Ф. Образцова, Москва, 17-19 ноября 2020 года. – М.: Общество с ограниченной ответственностью «Сам Полиграфист», 2020. – С. 183-185.
21. Идентификация свойств материала в устье усталостной трещины, развивающейся в структуре алюминиевого сплава 1163 / Х. Х. А. Кхун, Н. Т. Аунг, О. В. Башков, Г. А. Гадоев // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы IV Всерос. нац. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 12-16 апреля 2021 г. В 4 ч. Ч. 1 / редкол.: Э. А. Дмитриев (отв. ред.), А. В. Космынин (зам. отв. ред.). – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2021. – С. 92-94.



22. Мыльников, В. В. Исследование изменений показателей сопротивления усталости стали 30ХГСН2А в процессе циклического деформационного упрочнения / В. В. Мыльников, Д. И. Шетулов, А. И. Пронин // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2020. – № 10 (784). – С. 52-60.
23. Маслова, В. В. Исследование прочностных свойств в охлаждающем канале жидкостного ракетного двигателя / В. В. Маслова, Д. А. Потянихин // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы III Всерос. нац. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 06-10 апреля 2020 г. в 3 ч. Ч. 2 / редкол.: Э. А. Дмитриев (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2020. – С. 27-29.
24. Оценка точности контроля шероховатости поверхностей изделий машиностроения / Е. Г. Кравченко, В. В. Алтухова, Е. А. Серёдкина, А. С. Гамаюнова // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № V-1 (53). – С. 55-64.
25. Мокрицкий, Б. Я. Лезвийная обработка заготовок деталей, имеющих упрочнение наплавками высокой твёрдости / Б. Я. Мокрицкий, В. Ю. Шелковников // Металлообработка. – 2021. – № 2 (122). – С. 3-7.
26. Муравьёв, В. И. Обеспечение свойств соединений титановых конструкций летательных аппаратов, полученных сваркой плавлением, одинаковых со свойствами основного металла / В. И. Муравьёв, П. В. Бахматов, В. В. Григорьев // Вестник Московского авиационного института. – 2021. – Т. 28. – № 3. – С. 218-227.

**Кобылицкий А. Н., Игнатенко И. В., Власенко С. А., Пухова А. И., Казакул А. А.**  
**A. N. Kobylitskiy, I. V. Ignatenko, S. A. Vlasenko, A. I. Pukhova, A. A. Kazakul**

## **ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАСЧЁТА АВАРИЙНО ДОПУСТИМЫХ ТОКОВ В ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**

### **EFFICIENCY OF USING AUTOMATED CALCULATION OF EMERGENCY ALLOWABLE CURRENTS IN POWER LINES**

**Кобылицкий Андрей Николаевич** – кандидат экономических наук, доцент кафедры «Экономика и коммерция» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск). E-mail: akobylitsky@mail.ru.

**Andrey N. Kobylitskiy** – PhD in Economics, Associate Professor, Economics and Commerce Department, Far Eastern State Transport University (Russia, Khabarovsk). E-mail: akobylitsky@mail.ru.

**Игнатенко Иван Владимирович** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Системы электроснабжения» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск). E-mail: eao79@yandex.ru.

**Ivan Vl. Ignatenko** – PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Power Supply Systems, Far Eastern State Transport University (Russia, Khabarovsk). E-mail: eao79@yandex.ru.

**Власенко Сергей Анатольевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы электроснабжения» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск). E-mail: vsa\_ens@mail.ru.

**Sergey A. Vlasenko** – PhD in Engineering, Associate Professor, Power Supply Systems Department, Far Eastern State Transport University (Russia, Khabarovsk). E-mail: vsa\_ens@mail.ru.

**Пухова Анастасия Игоревна** – аспирант кафедры «Системы электроснабжения» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск). E-mail: pu.shoc@mail.ru.

**Anastasia I. Pukhova** – Post-graduate Student, Power Supply Systems Department, Far Eastern State Transport University (Russia, Khabarovsk). E-mail: pu.shoc@mail.ru.

**Казакул Алексей Александрович** – кандидат технических наук, главный специалист группы электрических режимов и анализа системной надёжности Ситуационно-аналитического центра Управления оперативно-технологического и ситуационного управления АО «Дальневосточная распределительная сетевая компания» (Россия, Благовещенск). E-mail: disp1@drsks.ru.

**Alexey A. Kazakul** – PhD in Engineering, Chief Specialist Group of Electrical Modes and Analysis of System Reliability Situational-analytical Center, Department of Operational-technological and Situational Management of JSC «Far Eastern Distribution Grid Company» (Russia, Blagoveshchensk). E-mail: disp1@drsks.ru.

**Аннотация.** В статье рассматривается эффективность использования программы расчётов по определению аварийно-допустимых токов линий электропередачи. Рассмотрены особенности работы электросетевого комплекса. Отмечены сложности в получении полного объёма исходных данных при определении конечного результата работы программы. Приведены основные характеристики возможностей снижения потерь электрической энергии и снижения затрат при эксплуатации электросетевого комплекса. На основании полученных результатов проведена технико-экономическая оценка внедрения программного продукта и перспектив его тиражирования на весь электроэнергетический комплекс России.

**Summary.** The article discusses the efficiency of using the calculation program to determine the emergency allowable currents of power lines. The features of the operation of the electric grid complex are considered. Difficulties in obtaining the full amount of initial data in determining the final result of the program work are noted. The main characteristics of the possibility of reducing losses of electrical energy and reducing costs during the operation of the electric grid complex are given. Based on the results obtained, a technical and economic assessment of the implementation of the software product and the prospects for its replication for the entire electric power complex of Russia was carried out.



**Ключевые слова:** воздушная линия электропередачи, длительно допустимая токовая нагрузка, стоимость, отказ, программный продукт.

**Key words:** overhead power line, long-term current load, cost, failure, software product.

УДК 621.311

*Работа выполнена в рамках научно-исследовательской работы «Разработка методики для определения аварийно-допустимых токов для ВЛ 110 кВ» по договору между АО «ДРСК» и Дальневосточным государственным университетом путей сообщения.*

Процессы цифровизации, происходящие в настоящее время в России, затрагивают все отрасли российской экономики. Электроэнергетика – это отрасль, в которой процессы цифровизации и инновационно-инвестиционная деятельность приобретают большое значение. Особую важность процессы цифровизации электроэнергетики имеют на территории Дальневосточного федерального округа, для которого характерно наличие изолированных энергосистем, сложных природно-климатических и эксплуатационных условий [16]. Правительством РФ поставлена задача привлечения производительных сил на территории опережающего развития (ТОР), что невозможно осуществить без надёжной системы электроснабжения [9]. Авторами накоплен значительный опыт проведения поисковых научно-исследовательских работ в области цифровизации объектов электроэнергетики, что послужило основой для реализации работ по оценке эффективности внедрения программно-аппаратного комплекса аварийно-допустимых токов нагрузки [1].

Удалённость потребителей электрической энергии на территории Дальневосточного федерального округа ставит сложную задачу по соблюдению технологического режима поставщиками электрической энергии, такими, например, как АО «Дальневосточная распределительная сетевая компания».

Учёт капитальных затрат и экономической эффективности при новом строительстве, поэтапном введении генераторных мощностей и сетевых районов вносит свои корректизы в существующий технологический процесс [2]. Вводится временный режим эксплуатации линии электропередачи (ЛЭП) на пределе пропускной способности при величине тока, близкой к аварийной [5].

Нормативно закреплено предоставление данных о пропускной способности и возможности передачи дополнительных мощностей для работы диспетчеров энергосистем [12; 13].

Собственники сетевого оборудования должны самостоятельно оценивать возможности перегрузочной способности воздушных и кабельных линий на небольших промежутках времени [11]. В случае если предприятия электроэнергетики не станут использовать аварийно-допустимые токовые нагрузки (АДТН), они будут вынуждены включать в свои производственные программы мероприятия по усилению сетей и реализации систем противоаварийной автоматики [4].

Для решения поставленных задач специально разработан программный комплекс по определению АДТН для воздушных линий электропередачи (ВЛ) 110 кВ [1], алгоритм работы которого представлен на рис. 1. Основные задачи по предоставлению информации оператору решаются с помощью наличия базы данных всех проводов, паспортов расчётных объектов, возможности загрузки параметров по специальным формам, а также обратной выгрузки произведённых изменений для составления паспортов ЛЭП.

Для проведения технико-экономической оценки и значимости программной разработки необходимо оценить потребность использования методики расчёта АДТН при сетевом строительстве, а также при проведении ремонтных работ.

На основании фиксирующихся перегрузок по линиям 110 кВ с целью увеличения пропускной способности ЛЭП [3], питающих тяговые подстанции ОАО «РЖД» в одном из регионов Дальневосточного федерального округа, определена необходимость в строительстве ВЛ 110 кВ и замене проводов М-70 и АС-120 [14]. Стоимость этих мероприятий оценивается в 1285 млн р.

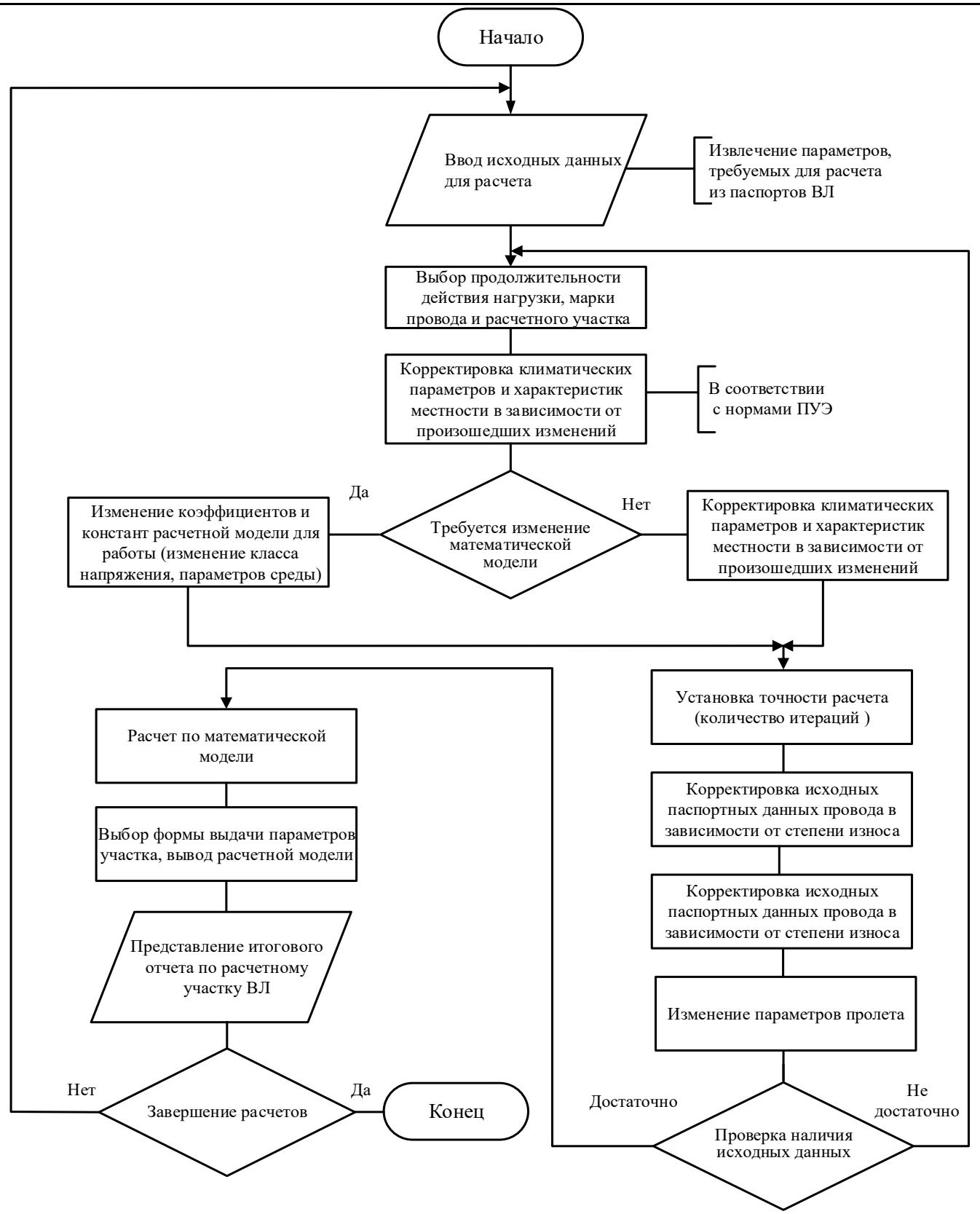


Рис. 1. Алгоритм работы программы по определению АДТН

Рассмотрим экономическую эффективность двух альтернативных мероприятий:

- научных исследований по определению АДТН с внедрением программно-аппаратного комплекса, при этом стоимость мероприятия 1450 тыс. р.;
- строительства ВЛ 110 кВ М-70 и АС-120.

Расчёты проведены для АО «Дальневосточная распределительная сетевая компания» (АО «ДРСК»).

В случае если рассматриваемых инвестиционных проектов несколько, применяются методы сравнительной экономической эффективности [6]. Поскольку новое строительство стоимостью 1285 млн р. значительно превышает расходы на проведение научных исследований, то рассматривается только экономическая эффективность для АО «ДРСК» [7].

Расчёт цены выполнен методом прямого калькулирования себестоимости научно-технической продукции, исходя из необходимого объёма проведения работ, материальных и трудовых затрат на основе анализа статистических данных по материальным и трудовым затратам на выполнение аналогичных научно-исследовательских работ.

Таким образом, расходы на проведение научно-исследовательской работы (НИР), которые включают разработку программно-аппаратного комплекса, составят 1450 тыс. р.

Первоначальная стоимость будет определяться расходами на поставку оборудования (программного продукта) и его сопровождение. В нашем случае предполагается установка программно-аппаратного комплекса АДТН на существующее оборудование и не планируется приобретение новых основных средств, кроме программного продукта, созданного в процессе реализации работы. Администрирование программно-аппаратного комплекса АДТН полагается осуществлять действующими сотрудниками АО «ДРСК», привлечение дополнительного персонала нецелесообразно.

Предварительная оценка ожидаемого технико-экономического эффекта является затруднительной в силу того, что внедряемый программно-аппаратный комплекс АДТН не имеет прямых аналогов, а результаты его использования могут быть полноценно проанализированы лишь после опытной эксплуатации [15]. Результаты НИР (рекомендации, математические модели, полученные методики испытаний АДТН, экспериментальное оборудование, проект изменений в технические инструкции по эксплуатации ВЛ) могут быть о проанализированы только после внедрения программно-аппаратного комплекса АДТН.

Снижение затрат на эксплуатацию ВЛ происходит за счёт:

- организации противоаварийных и послеаварийных мероприятий;
- восстановления линий после аварий;
- недоступа электроэнергии потребителям.

Кроме того, возникают следующие неэкономические эффекты:

– повышается прозрачность принятия решения о применении проводов конкретных конструкций и производителя;

- нарабатывается статистическая база для оценки влияния конструкции и материала провода, токовой нагрузки, для написания будущих стандартов и внесения изменений в Правила устройства электроустановок [11] (после подтверждения правильности подхода в условиях эксплуатации проводов в условиях АДТН).

Для оценки экономии затрат применяется статистика отказов [8], где в 50,5 % случаев (1,45 отказов в год на 100 км ВЛ) авария не привела к серьёзным повреждениям, таким как падение опор, обрыв провода, деформация траверс и т. д. Необходимость организации выездов аварийных бригад косвенно сильно влияет на надёжность работы сети, т. к. отвлекает внимание службы линий и диспетчерского персонала от организации наблюдения. В остальных случаях (49,5 %) авария приводит к механическим повреждениям ВЛ, длительным простоям и перерывам в электроснабжении потребителей [9].

Каждое отключение с успешным или неуспешным автоматически повторным включением требует выявления места повреждения и подъёма на высоту провода для осмотра [10] и, возможно, замены участка провода [14].

При применении программно-аппаратного комплекса АДТН ожидаемый эффект от снижения потока отказов при касании проводов и провода с грозотросом при АДТН составит  $1,45 \cdot 53 \cdot 121,60 = 77\ 026,31$  р. в год на 100 км ВЛ 110 кВ без учёта затрат на новый провод, недоотпуска электроэнергии потребителям. Снижение системного ущерба от аварий с обрывом проводов, грозотросов, падением опор по причине АДТН не рассчитывалось. Суммарный расчётный системный эффект составляет: 84 198,59 р. в год на 100 км ВЛ. Составление методики более полного расчёта, который учитывает все значимые факторы, будет частью выполняемой работы. Результаты исследований актуальны для большей части сетей в России.

Предполагается, что внедрение программно-аппаратного комплекса АДТН необходимо в каждом филиале АО «ДРСК» для оперативного принятия решений и реагирования на аварийные ситуации.

В состав АО «ДРСК» входят 4 филиала; для одного из них расчёт экономии расходов представлен в табл. 1.

Таблица 1  
 Расчёт экономии от внедрения программно-аппаратного комплекса

Показатель	Величина
Эффект, р. на 100 км	77 026,31
Протяжённость линий 110кВ Хабаровские ЭС, км	1669
Экономический эффект всего, тыс. р.	1285,57

В результате внедрения программно-аппаратного комплекса АДТН в Хабаровские электрические сети – филиал АО «ДРСК» экономия затрат (экономический эффект) составит 1285,57 тыс. р. в год.

Инвестиции в программно-аппаратный комплекс АДТН составят 1450 тыс. р., а показатели экономической эффективности следующие (см. табл. 2).

Таблица 2  
 Показатели коммерческой эффективности внедрения

Показатель	Величина	Критерий
Срок проекта ( $T_{норм}$ ), лет	3	требование заказчика
Чистый дисконтированный доход (ЧДД) на 3-й год, тыс. р.	3658,58	ЧДС > 0
Внутренняя норма доходности (ВНД), %	78 %	ВНД > ставка дисконта
Индекс доходности (ИД) на 3-й год	3,5	ИД > 1
Срок окупаемости ( $T_{окуп}$ ), лет	2	$T_{окуп} < T_{норм}$

Данные показатели экономической эффективности говорят о целесообразности внедрения программно-аппаратного комплекса АДТН в АО «ДРСК» и его филиалы.

В случае необходимости результаты расчётов экономической эффективности внедрения программно-аппаратного комплекса АДТН могут масштабироваться на различные производственные или структурные подразделения АО «ДРСК».

Общая экономия расходов составит 1310,51 млн р., в том числе:

- экономия капитальных вложений – 1283,55 млн р.;
- экономия эксплуатационных расходов – 1,286 млн р.;
- экономия налога на имущество – 25,671 млн р.

Таким образом, использование программы определения аварийно-допустимых токовых нагрузок ВЛ необходимо для оценки допустимости нормальных, ремонтных и послеаварийных режимов в условиях эксплуатации; для оценки объёмов дополнительного сетевого строительства при технологическом присоединении потребителей и объектов по производству электрической энергии, точной настройки устройств защиты для снижения затрат при отключении участков линий электропередачи.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Алгоритм контроля токов в ЛЭП в заданных эксплуатационных условиях / И. В. Игнатенко, С. А. Власенко, А. И. Пухова [и др.] // Энергия единой сети. – 2021. – № 3 (58). – С. 44-53.
2. Анализ электромеханических систем методами имитационного моделирования / С. Н. Иванов, К. К. Ким, А. А. Просолович, М. И. Хисматулин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № III-1 (51). – С. 29-38.
3. ГОСТ 839-2019. Провода неизолированные для воздушных линий электропередачи. Технические условия = Non-insulated conductors for overhead power lines. Specifications: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утверждён и введён в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 ноября 2019 г. № 1285-ст: замен ГОСТ 839-80: дата введения 2020-05-01 / разработан ОАО «ВНИИКП». – М.: Стандартинформ, 2019. – 45 с.
4. Руководство по оценке эффективности инвестиций в энергосберегающие мероприятия / А. Н. Дмитриев, И. Н. Ковалев, Ю. А. Табунщиков, Н. В. Шилкин. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2005. – 120 с.
5. Игнатенко, И. В. Обеспечение работоспособности линий электропередачи при проведении плановых и аварийных работ / И. В. Игнатенко, С. А. Власенко, А. И. Пухова // StudNet. – 2021. – Т. 4. – № 11. – URL: <https://stud.net.ru/wp-content/uploads/2021/11/6.pdf> (дата обращения: 12.10.2021). – Текст: электронный.
6. Кириченко, Л. П. Экономическая эффективность формирования и использования человеческого капитала корпорации / Л. П. Кириченко, А. С. Мотырева // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о человеке, обществе и культуре. – 2021. – № VI-2 (52). – С. 115-120.
7. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов (утв. Минэкономики РФ, Минфином РФ, Госстроем РФ 21 июня 1999 г. № ВК 477) // Справ.-правовая система Консультант-Плюс. – URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_28224/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_28224/) (дата обращения: 12.10.2021). – Текст: электронный. – Режим доступа: по подписке.
8. Методические рекомендации по оценке эффективности и разработке инвестиционных проектов и бизнес-планов в электроэнергетике на стадии предГЭО и ГЭО (с типовыми примерами) [утверждено приказом ОАО РАО «ЕЭС России» от 31 марта 2008 г. № 155] // Электронный фонд нормативно-технической и нормативно-правовой информации Консорциума «Кодекс». – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200088779> (дата обращения: 12.10.2021). – Текст: электронный.
9. О территориях опережающего социально-экономического развития в Российской Федерации: федеральный закон № 473-ФЗ от 29 декабря 2014 г. (ред. от 13.07.2020) // Справ.-правовая система Консультант-Плюс. – URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_172962/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_172962/) (дата обращения: 12.10.2021). – Текст: электронный. – Режим доступа: по подписке.
10. Определение предельных токовых нагрузок воздушных линий электропередачи с учётом сохранения их габарита / И. В. Игнатенко, С. А. Власенко, Н. П. Пазенко [и др.] // III Международный научно-образовательный форум «Хэйлунцзян-Приамурье»: сборник материалов Международной научной конференции, Биробиджан, 03 октября 2019 года. – Биробиджан: ПГУ им. Шолом-Алейхема, 2019. – С. 663-672.
11. Правила устройства электроустановок. – 7-е изд. – Новосибирск: Сиб. унив. изд., 2006. – 854 с.
12. Об утверждении перечня предоставляемой субъектами электроэнергетики информации, форм и порядка её предоставления: Приказ Министерства энергетики РФ от 23 июля 2012 г. № 340 (с изм. и доп.) (зарег. в Минюсте России 06 сентября 2012 г. № 25386) // Информационно-правовой портал «Гарант». – URL: <https://base.garant.ru/70225816/> (дата обращения: 03.09.2021). – Текст: электронный.
13. Об утверждении Правил предоставления информации, необходимой для осуществления оперативно-диспетчерского управления в электроэнергетике: Приказ Минэнерго России от 13 февраля 2019 г. № 102 (зарег. в Минюсте России 03 июня 2019 г. № 54824) // Информационно-правовой портал «Гарант». – URL: <https://base.garant.ru/72260250/> (дата обращения: 03.09.2021). – Текст: электронный.
14. Сухичев, М. И. Физические обоснования при выборе сечения проводов воздушных линий электропередач для нормального режима работы // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2016. – № 4 (254). – С. 77-88.
15. Теоретические основы математического моделирования процессов преобразования мощности в совмещённых энергетических устройствах / С. Н. Иванов, К. К. Ким, О. В. Приходченко, А. А. Просолович // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № I-1 (41). – С. 37-44.
16. Digital information exchange technologies at electric power facilities of the railway transport and its cost-benefit / A. N. Kobylitsky, I. V. Ignatenko, S. A. Vlasenko, E. Y. Tryapkin, I. A. Rebrov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – № 918. – 012185. – DOI 10.1088/1757-899X/918/1/012185.

Горьковый М. А., Егорова В. П., Горьковый А. И., Мельниченко М. А.  
M. A. Gorkavyy, V. P. Egorova, A. I. Gorkavyy, M. A. Melnichenko

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА РОБОТИЗИРОВАННОГО ПРОЦЕССА

### RESEARCH OF APPLICATION FEATURES OF FUNCTIONAL DECOMPOSITION METHOD IN DEVELOPING SIMULATION MODELS OF A ROBOTIC PROCESS DIGITAL TWIN

**Горьковый Михаил Александрович** – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Управление инновационными процессами и проектами» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: mixkomsa@gmail.com.

**Mikhail A. Gorkavyy** – PhD of Engineering, Head of the Department of Management of Innovative Processes and Projects, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: mixkomsa@gmail.com.

**Егорова Валерия Павловна** – аспирант, старший преподаватель кафедры «Управление инновационными процессами и проектами» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: Ler4ik\_007\_94@mail.ru.

**Valeria P. Egorova** – Post-graduate Student, Senior Lecturer, Management of Innovative Processes and Projects Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: Ler4ik\_007\_94@mail.ru.

**Горьковый Александр Иванович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: gorkavyy\_ai51@mail.ru.

**Aleksandr I. Gorkavyy** – PhD of Engineering, Associate Professor, Electro Drive Engineering and Industrial Automation Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: gorkavyy\_ai51@mail.ru.

**Мельниченко Маркел Андреевич** – аспирант, преподаватель кафедры «Управление инновационными процессами и проектами» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: markel.96dk@mail.com.

**Markel A. Melnichenko** – Post-graduate Student, Assistant Lecturer, Management of Innovative Processes and Projects Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: markel.96dk@mail.com.

**Аннотация.** В работе представлены возможности применения инструментов функционального моделирования к разработке имитационных моделей цифровых двойников колаборативных роботизированных процессов. В результате исследований получен прототип типовой структуры отдельной технологической операции роботизированного процесса, который может выступать основой для проектирования агента коммуникации (платформы) мультиагентной модели. Продемонстрированы необходимость и специфика использования отдельных инструментов идентификации для формирования предпосылок качественного проектирования объектно-ориентированной структуры цифрового двойника. В виде концептуальной схемы представлена взаимосвязь методов идентификации и проектирования. На основе проведённых исследований показана последовательность действий применения инструментов функциональной декомпозиции в нотации IDEF0, а также составлена функциональная декомпозиция технологической операции «позиционирование» в рамках технологического процесса роботизированной сварки. Представленная декомпозиционная картина интерпретирована и описана с помощью синтаксических конструкций высокоуровневого языка программирования C++.

**Summary.** The paper presents possibilities of applying functional modeling tools to the development of digital twins simulation models of collaborative robotic processes. As a result of the research, a prototype of a typical structure of a separate technological operation of a robotic process was obtained, which can serve as the basis for

designing a communication agent (platform) of a multi-agent model. The necessity and specifics of using individual identification tools to form the prerequisites for the high-quality design of an object-oriented structure of a digital twin are demonstrated. In the form of a conceptual diagram, the relationship between identification and design methods is presented. On the basis of the research, the sequence of actions for using functional decomposition tools in the IDEF0 notation is shown, and a functional decomposition of the “positioning” technological operation within the technological process of robotic welding is also compiled. The presented decomposition picture is interpreted and described with the help of syntactic constructions of the high-level C++ programming language.

**Ключевые слова:** роботизированный процесс, нотация IDEF0, цифровой двойник, функциональное моделирование, процессная модель, коллаборативный робот, высокоуровневый язык программирования, объектно-ориентированное проектирование.

**Key words:** robotic process, IDEF0 notation, digital twin, functional modeling, process model, collaborative robot, high-level programming language, object-oriented design.

УДК 004.94

*Данное исследование выполнено в рамках деятельности Консорциума устойчивого развития и технологического лидерства и НИОКР «Разработка методов повышения энергетической эффективности роботизированных технологических процессов», финансируемой за счёт средств ФГБОУ ВО «КнАГУ» № ВН002/2020. Исследование проводилось с использованием оборудования Научно-образовательного центра «Промышленная робототехника и передовые промышленные технологии».*

**Введение.** Степень цифровизации процессов производства, особенно в высокотехнологичных сферах промышленности, таких как, например, производство аэрокосмических изделий сложной конфигурации, определяет уровень конкурентоспособности продукции. Наиболее комплексными технологиями автоматизации систем управления производственными процессами на базе коллаборативных роботизированных машин, согласно [5; 6], являются технологии Digital Twin (DT). Эффективность таких систем управления напрямую зависит от трёх составляющих: адекватности имитационных моделей цифрового двойника [4], алгоритмов их обработки, а также интерфейсов коммуникации [7]. Среди инструментов идентификации управляемого процесса или объекта, позволяющих обеспечить формирование элементов поля знаний, функциональная декомпозиция (ФД) играет ключевую роль, поскольку, во-первых, функционально связывает сущности, во-вторых, детализирует структурную декомпозицию (СД) за счёт анализа связей, выявляя новые сущности, в-третьих, позволяет более тонко настроить системы критериев качества будущих моделей.

Особую роль в процессе идентификации инструменты функциональной декомпозиции играют при формировании имитационных моделей недетерминированных процессов, для которых характерны свойства стохастичности и неопределённости; к таким процессам в том числе относят производственные процессы на базе коллаборативных роботов, функционирующих совместно с человеком [7]. Коллаборативные человеко-машинные системы на базе роботов обычно применяются в производстве инновационной, штучной или опытной продукции, следовательно, цифровой двойник и его системы управления должны обладать высокими показателями адаптивности как в части параметров, так и в части структуры [4]. Идентификационные процедуры, связанные с функциональной декомпозицией, могут помочь в достижении требуемого уровня адаптивности. Цель данной работы заключается в демонстрации возможностей использования инструментов функциональной декомпозиции на примере нотации IDEF0 применительно к задачам проектирования имитационных моделей цифрового двойника коллаборативного роботизированного процесса.

**Методология.** Методология функционального моделирования подразумевает разбиение процесса на функциональные модули, функции или операции с последовательным выделением стрелок пяти типов: стрелки входа, стрелки выхода, стрелки управления, стрелки механизма,

стрелки вызова [11]. Характеристики типов стрелок представлены в работе [2], на рис. 1 отражены позиции отображения типов стрелок.



Рис. 1. Типовая структура подпроцесса функциональной модели

Характерными особенностями коллаборативного роботизированного процесса (КРП) являются его универсальность и возможность использования отдельных подсистем (роботов, технического зрения, оснастки и т.п.) для выполнения различных технологических операций или их последовательностей. Таким образом, КРП может описываться одной структурной схемой и множеством функциональных моделей, что отличает его от описания роботизированного процесса на базе промышленных роботов, для которого количество циклов исполнения одного комплекса перемещений достаточно высоко и в пределах цикла процесса описывается одной функциональной моделью [3]. Поэтому имитационные модели цифрового двойника роботизированного технологического процесса должны обладать высокой степенью адаптивности, что определяет особенности идентификации процессов с применением функционального моделирования.

С учётом специфики КРП стрелки «вход» и «выход», характеризующие материальные ресурсы, в большинстве случаев (если речь идёт о производстве высокотехнологичной продукции аэрокосмического назначения) будут определять передел изделия, например, «сваренные полупатрубки» или «изделие, прошедшее дефектоскопию». При этом, особенно при наличии в системе управления роботизированным процессом (СУРП) на базе DT механизмов оптимизации (например, повышения энергоэффективности или сокращения времени исполнения технологического процесса [9] и т. п.), входные и выходные стрелки могут носить информационную природу, например «оптимизированная управляющая программа» или «результат трансляции кода на другой язык», или «управляющий сигнал на запуск следующего подпроцесса» и т. п.

Стрелки типа «механизм» будут отражать четыре вида возможных элементов инфраструктуры:

1. оборудование, в том числе аппаратное обеспечение (промышленные роботы, позиционеры, контроллеры, лазерное оборудование и т. д.);
2. программное обеспечение (CAD/CAM/CAE-системы, СУРП, SCADA, локальные модули управления, локальные модули оптимизации, модели поведения и т. д.);
3. персонал (программисты, инженеры, эксперты и т. д.);
4. оснастку (проволока, газ, захваты и т. д.).

Стрелки типа «управление» будут характеризовать различные сигналы автоматики (сигналы с датчиков, в том числе с системы безопасности), управляющие программы роботов и другого оборудования, руководящую документацию (стандарты, технологические инструкции, параметры оптимизации и т. д.), ключевые показатели эффективности (KPI) и др. Стрелки типа «вызов» определят интерфейсы взаимодействия с вышеупомянутыми или параллельными процессами в автоматизированной системе управления производственными процессами.

Разработка функциональной модели должна осуществляться одновременно с другими инструментами идентификации (СД и причинно-следственная декомпозиция (ПСД)), представленными на рис. 2, тогда функциональная декомпозиция, помимо преследования своих задач, позволит уточнить элементы структурной декомпозиции, основания классификации сущностей семантических сетей, упорядочить поля единиц хранения данных и знаний, например фреймов или прототипов, что в целом позволит создать библиотеки классов (выраженных в том числе на языке UML [8]) и создаст предпосылки качественного проектирования объектно-ориентированной структуры DT.

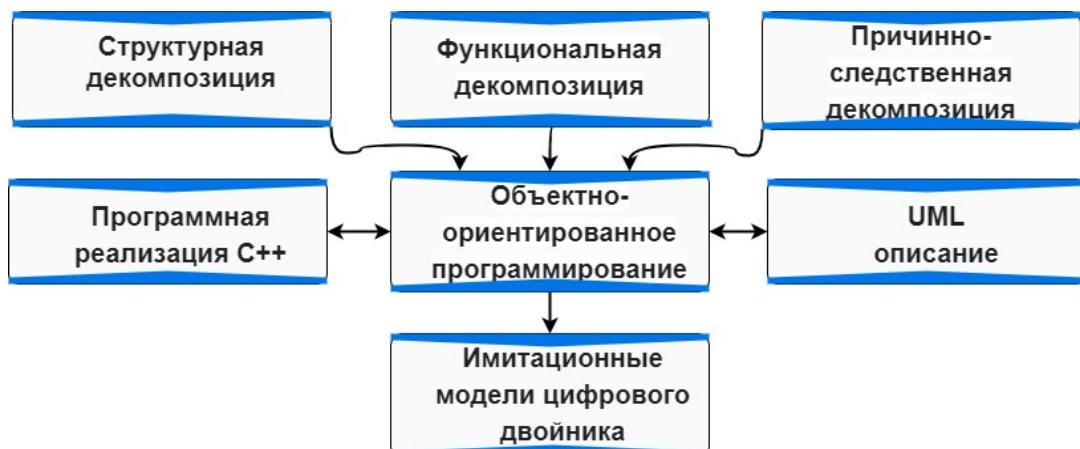


Рис. 2. Обобщённая схема взаимосвязи методов идентификации и проектирования

**Результаты и обсуждение.** Последовательность действий применения инструментов функциональной декомпозиции в нотации IDEF0 при проектировании роботизированных технологических процессов на базе коллаборативных машин в целях получения исходных данных для объектно-ориентированного проектирования (ООП) системы управления на базе DT представлена в табл. 1.

Результатом проведения части предложенной процедуры, а именно шагов 1-6 (см. табл. 1), для технологической операции позиционирования роботом детали в пространстве в рамках технологического процесса сварки [9; 12] может являться функциональная модель, представленная на рис. 3. Основная задача данной операции – это изменение координат локальной базы детали внутри глобальной системы координат робота для реализации последующих технологических операций, например сварки. Операция предусматривает возможность коррекции эталонных управляющих программ перемещения робота с учётом данных о реальном состоянии, поступающих с системы технического зрения. Ключевыми механизмами реализации подпроцесса являются: роботизированное оборудование, система технического зрения и другие измерительные устройства, персонал и программное обеспечение. Управление делится на статические модули управляющей программы и корректирующие модули, работающие по данным системы технического зрения и других измерительных устройств. Кроме того, подпроцесс управляет на основе общей нормативной и технологической документации (в электронном и бумажном виде). Переключение режимов подпроцесса осуществляется средствами программных модулей, реализующих жёсткую логику.

Таблица 1

Последовательность действий применения инструментов  
функциональной декомпозиции в нотации IDEF0

Действие	Инструменты идентификации и проектирования
1	2
1. Выделить ограниченное количество значимых технологических операций (подпроцессов) в составе технологического процесса	ФД
2. Определить последовательность технологических операций и степень изменчивости параметров и структуры операции	ФД, СД, ПСД
3. Определиться с ключевыми механизмами, которые целесообразно учитывать в имитационных моделях цифрового двойника	ФД, СД
4. Уточнить наименование и характеристики промежуточных изделий, получаемых по результатам проведения технологических операций для формирования «входов-выходов» процессов, а также их значимые характеристики	ФД, СД
5. Уточнить промежуточные продукты каждого процесса, например, сигналы, отчёты и т. п. (выходы процессов и входы управляющего процесса)	ФД, СД
6. Декомпозировать управляющие воздействия – по факту элементы управляющих программ	ФД, СД
7. Оценить затратность привлечения каждого механизма и реализации подготовки управленческого воздействия по переменным: затраты времени, затраты энергии, затраты компетенций, рискованность	ФД, СД, ПСД
8. Получить интегральную оценку ресурсозатратности подпроцесса, сформировать функционал качества подпроцесса с учётом поставленных КПИ выше-стоящей системы	ПСД, ФД
9. Сформировать графическую визуализацию для обеспечения создания интерфейсов пользователя	ПСД
10. Сформировать критерии наличия или отсутствия необходимости подключения «моделей оптимизации» для снижения затрат или повышения качества	ПСД, ФД
11. Оценить потенциал снижения затрат ресурсов	ПСД
12. Разработать проект модели	ООП
13. Разработать программное обеспечение модели (реализация инициализации модели, анализа модели, формирования прогноза по модели, интеграция модели в систему управления)	ООП

В то же время сущности, обозначенные стрелками на диаграмме, должны найти отражение в структурных схемах и семантических сетях. Процесс применения ФД, СД и ПСД должен носить итеративный характер, что приведёт к последовательному улучшению результатов в каждом направлении.

Для обеспечения выполнения шагов 12 и 13 (см. табл. 1) процессная модель должна быть переформатирована с учётом принципов ООП [8]. Результаты изменения формата модели (см. рис. 3) представлены на рис. 4. Если процессная модель (см. рис. 3) была построена с точки зрения физического мира, то модель на рис. 4 показана с позиции представления процесса в виртуальном мире, т. е. в качестве виртуального процесса, реализуемого имитационной моделью цифрового двойника. В таком случае основными элементами представления сущностей (стрелок) будут объекты определённых классов, определяющие поведение агентов, разрабатываемых на шагах 12 и 13 имитационной модели (см. табл. 1). При этом сам подпроцесс целесообразно реализовать также в форме агента-платформы, обеспечивающей реализацию коммуникаций между агентами, пред-

ставленными в качестве объектов на рис. 4. Важным требованием, предъявляемым к агенту-платформе, является обеспечение адаптивности и возможности интеграции новых агентов в случае необходимости, а также дезинтеграции неактуальных агентов. Кроме того, агент-платформа должен обладать методами, обеспечивающими в случае необходимости взаимодействие с внешним виртуальным миром, например с DT вышестоящей системы. По факту эти методы, реализующие функциональную связь «вызов» (см. рис. 1), определяют интерфейсы взаимодействия и интеграции отдельных DT в системы Smart Factory и Digital Factory [6].



Рис. 3. Функциональная декомпозиция технологической операции «Позиционирование» в рамках технологического процесса роботизированной сварки

На рис. 4 представлены объекты 11 классов, количество классов может варьироваться в зависимости от типа технологической операции роботизированного процесса. Для упрощения инициализации агента-платформы объекты упорядочены в массивы, структуры, либо с использованием других типов структуризации. Варианты использования тех или иных типов представлены в работе [10]. Используемый формат процессной модели позволит упростить переход к следующему этапу представления знаний – формированию комплекса диаграмм на языке UML (см. табл. 1, шаг 12), эффективность применения которого в задачах разработки систем управления роботизированными процессами раскрыта в работе [1]. Так, представление процессной модели в предложенном формате (см. рис. 4) позволит сформировать в проектном виде диаграмму классов системы. Однако детализировать методы ограничиваясь только данной информацией не представляется возможным. Для этих целей необходимо выполнить шаги 7-11 (см. табл. 1), т. е. должна быть сформирована логика работы самих агентов (отражающих механизмы, входы, выходы и управления), а также логика их взаимодействия.

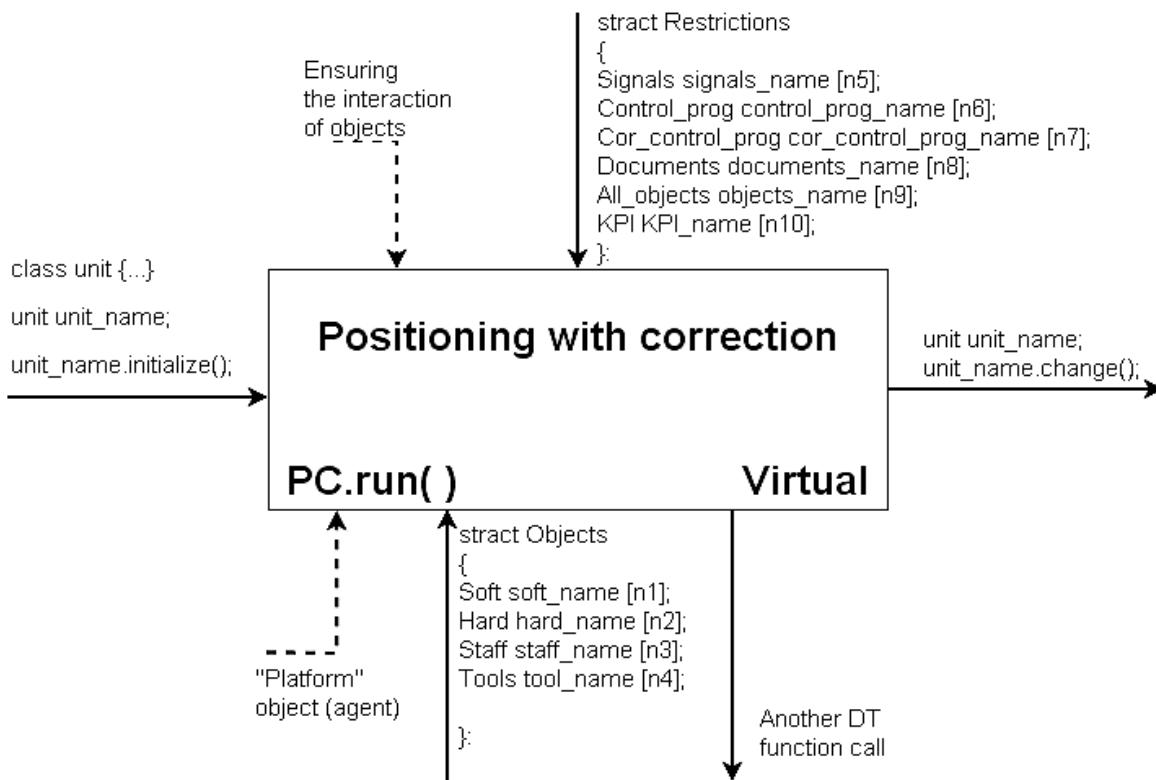


Рис. 4. Функциональная декомпозиция технологической операции «позиционирование» в формате синтаксических конструкций языка программирования C++

Каждый агент (объект) должен иметь методы, вычисляющие значения своих полей, оценки внешней среды и в том числе собственной целевой функции, платформа же должна обеспечивать: во-первых, интерпретацию возвращаемых методами отдельных агентов переменных внутри общего пространства процесса, во-вторых, нормализацию получаемых от агентов значений переменных для вычисления целевой функции агента-платформы (подпроцесса), а также формирование сигналов обратной связи агентам.

Реализацию этих механизмов предлагается вести на базе критериев, в основе которых лежат следующие переменные: значимость изделия, технологическая себестоимость, надёжность, вероятность, время, энергия, финансы, риски, компетенции (экспертный ресурс), вычислительные мощности, человеческие ресурсы (физические ресурсы) и т. д. Несмотря на то что функциональная декомпозиция не является ключевыми инструментами реализации шагов 7-11 (см. табл. 1), опора на процессные модели позволит повысить степень адекватности итоговой модели (см. табл. 1, шаг 13) и будет являться ориентиром при разработке структуры ООП программного решения.

**Заключение.** Таким образом, применение инструментов процессного моделирования с учётом требований ООП позволит повысить детализацию и качество разработки систем управления коллаборативными роботизированными процессами на базе цифровых двойников. Использование объектно-ориентированного подхода в паре с функциональной декомпозицией, например в нотации IDEF0 за счёт организации итеративных процедур, уточнит специфику высокотехнологичного производства и позволит:

- выявить специфику подпроцессов, которая может быть выражена, например, в специфике методов объектов, специфике полей;
- выявить общие характеристики подпроцессов, определяющие наследование классов;

- создать предпосылки обеспечения модульности программ, реализующих имитационные модели цифрового двойника и определяющих свойства адаптивности структуры подпроцесса, при которой возможна безболезненная замена программного модуля, обслуживающего подпроцесс цифрового двойника или изменение его характеристик;

- построить структурную схему DT, поскольку структурная схема двойника напрямую не соответствует структурной схеме физического объекта (см. рис. 3 и 4);

- сформировать требования к библиотекам классов;

- произвести оценку подпроцесса по интегральным критериям: стоимость, временные затраты, риски, привлекаемые компетенции, энергетические затраты, KPI и т. д.

Наличие библиотеки типовых процессов роботизированного производства и соответствующих платформ (специальных агентов) позволяет обеспечить оптимизацию всего процесса в целом через коррекцию подпроцессов в DT и по аналогии с конструктором формировать необходимые в данный момент программные блоки (в среде моделирования), настраивать их, подключать необходимые модели поведения (оптимизации), создавая при этом «пользовательскую» имитационную модель, используя процессные модели IDEF0 и объектно-ориентированные модели на UML.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Pujani, A. The Application of Function Models In Software Design: A Survey Within the Software Community / A. Pujani, B. Lucienne // International Journal of Software Engineering. – 2021. – P. 27-62.
2. Bocast, A. Activation Rules and Rule Sets for IDEF0 Functions. – 2015. – DOI:10.13140/RG.2.1.3334.7926/.
3. Waissi, Gary, R. Automation of strategy using IDEF0 – A proof of concept / Gary, R. Waissi, Mustafa Demir, Jane E. Humble, B. Lev // Operations Research Perspectives. – 2015. – P. 106-113. DOI: 10.1016/j.orp.2015.05.001.
4. Malik, A. A. Framework to implement collaborative robots in manual assembly: a lean automation approach / A.A. Malik, A. Bilberg // Proceedings of the 28th DAAAM International Symposium, Vienna, Austria. – 2017. – P. 1151-1160. DOI: 10.2507/28th.daaam.proceedings.160/.
5. Maruyama, T. Digital Twin-Driven Human Robot Collaboration Using a Digital Human / T. Ueshiba, M. Tada, H. Toda, Y. Endo, Y. Domae, Y. Nakabo, T. Mori, K. Suita // Sensors. – 2021. – 21. – 8266. – DOI:10.3390/s21248266.
6. Rosen, R. About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing / R. Rosen, G. Von Wichert, L. George, D. B. Kurt B. // IFAC-PapersOnLine, 2015, p. 567-572. DOI:10.1016/j.ifacol.2015.06.141.
7. Sun, X. A digital twin-driven human-robot collaborative assembly-commissioning method for complex products / X. Sun, R. Zhang, S. Liu // Int J Adv Manuf Technol 118. – 2020. – P. 3389-3402. DOI: 10.1007/s00170-021-08211-y.
8. Буч, Г. Язык UML / Г. Буч, Д. Рамбо, И. Якобсон // Руководство пользователя. – 2-е изд. – М.: ДМК Пресс, 2006. – 496 с.
9. Внедрение интеллектуальных роботизированных систем в производственные процессы судостроительного предприятия / М. А. Горьковый, А. И. Горьковый, А. С. Гудим, М. А. Мельниченко, В. П. Егорова // Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – Т. 2. – № 2 (52). – С. 97-104.
10. Лафоре, Р. Объектно-ориентированное программирование в C++. Классика Computer Science / Р. Лафоре. – СПб.: Питер, 2013. – 928 с.
11. Р-50.1.028-2001. Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Методология функционального моделирования = Continuous acquisition and life-cycle support. Methodology of functional modeling; рекомендации по стандартизации: издание официальное: утверждены и введены в действие Постановлением Госстандарта России от 2 июля 2001 г. № 256-ст: введены впервые: дата введения 2002-07-01 / разработаны Научно-исследовательским Центром CALS-технологий «Прикладная Логистика» при участии Всероссийского научно-исследовательского института стандартизации (ВНИИстандарт). – М.: ИПК Издательство стандартов, 2010. – 53 с.
12. Концепция формирования управляющей программы для роботизированного комплекса лазерной сварки / С. И. Сухоруков, С. П. Черный, А. С. Мешков, Д. А. Киба // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № VII-1 (47). – С. 26-33.

Краснояров Н. А., Дмитриева Т. Л.  
СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ  
И ВОЗМОЖНОСТИ ИХ АВТОМАТИЗАЦИИ

Краснояров Н. А., Дмитриева Т. Л.  
N. A. Krasnoyarov, T. L. Dmitrieva

## СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ И ВОЗМОЖНОСТИ ИХ АВТОМАТИЗАЦИИ

### CURRENT STATE OF NON-DESTRUCTIVE TESTING METHODS AND POSSIBILITIES OF THEIR AUTOMATION

**Краснояров Никита Алексеевич** – аспирант кафедры автоматизации и управления Иркутского национально исследовательского технического университета (Россия, Иркутск); 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83. E-mail: nik.kras.home@gmail.com.

**Nikita A. Krasnoyarov** – Post-graduate Student, Automation and Control Department, Irkutsk National Research Technical University (Russia, Irkutsk); 664074, Irkutsk, Lermontov st., 83. E-mail: nik.kras.home@gmail.com.

**Дмитриева Татьяна Львовна** – доктор технических наук, зав. кафедрой механики и сопротивления материалов Иркутского национального исследовательского технического университета (Россия, Иркутск); 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83. E-mail: dmitrievat@list.ru.

**Tatiana L. Dmitrieva** – Doctor of Technical Sciences, Head of Mechanic and Strength of Materials Department, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia); 664074, Irkutsk, Lermontov st., 83. E-mail: dmitrievat@list.ru.

**Аннотация.** Надёжный и достоверный неразрушающий контроль конструкций и материалов необходим для снижения возможных проблем с безопасностью при их эксплуатации. Существуют различные подходы к такому контролю, связанные с вопросами обеспечения качества в течение всего жизненного цикла изделия. В статье приводится анализ известных методов неразрушающего контроля для обнаружения и оценки развития дефектов в материалах конструкций. К таким методам относятся акустическая эмиссия, ультразвуковой контроль, инфракрасная термография, корреляция цифровых изображений, а также рентгеновская и нейтронная визуализация. Для каждого метода приведены краткая историческая справка, принципы, стандартная методика, оборудование и средства, используемые при исследовании. На основе анализа было выявлено, что дальнейшее развитие методов неразрушающего контроля материалов будет направлено на создание интеллектуальных и автоматизированных систем контроля с высокой точностью и возможностью эффективной обработки данных.

**Summary.** Reliable nondestructive testing of structures and materials is necessary to reduce possible safety problems in their operation. There are various approaches to such control related to the issues of quality assurance throughout the product life cycle. The article analyzes the known methods of non-destructive testing for detecting and assessing the development of defects in structural materials. Such methods include acoustic emission, ultrasonic control, infrared thermography, digital image correlation and X-ray and neutron imaging. For each method a brief historical background, principles, standard technique, equipment, and tools used in the study are given. On the basis of the analysis, it was found out that further development of non-destructive testing methods will be aimed at creating intellectual and automated testing systems with high accuracy and possibility of effective data processing.

**Ключевые слова:** неразрушающий контроль, конструкции, дефекты, повреждения, обнаружение и оценка, контроль состояния конструкций, автоматизация, механизация.

**Key words:** nondestructive testing, structures, defects, damages, detection and assessment, control of structures, automation, mechanization.

УДК 620.191

**Актуальность механизации и автоматизации методов неразрушающего контроля.** В настоящее время всё чаще возникает потребность в диагностике состояния различных конструкций и их элементов. Рост требований к качеству конструкций выдвигает задачу неразрушающего

контроля состояния самих конструкций, их элементов и использованных материалов, а также задачу автоматизации проводимой диагностики. Так, например, скорость автоматического ультразвукового контроля стыковых сварных швов составляет до 25 м/мин, а ручного – 3-5 м/ч. Скорость рентгенографического контроля аналогичных сварных швов составляет до 2 м/мин, что в несколько раз превосходит скорость ручной рентгенографии [1]. Кроме того, при ручном подходе подготовительные операции, контроль, отметку дефектных участков, расшифровку результатов, их регистрацию и выдачу заключения производит оператор, от квалификации которого зависит качество произведенных операций. В связи с этим актуальность автоматизации этих процессов несомненна, поскольку чем больше операций будет автоматизировано, тем более качественные и достоверные результаты будут получены [1].

Дефекты и повреждения в элементах конструкций могут возникать в различных местах, что затрудняет обнаружение всех повреждённых участков [13]. Кроме того, накопление повреждений в материале тесно связано с фактической прочностью, жёсткостью и прогнозированием срока службы элемента. Таким образом, надёжный и достоверный неразрушающий контроль необходим для уменьшения риска возникновения ситуаций, связанных с нарушением безопасности, а также затрат на техническое обслуживание [20] и, как следствие, сведения к минимуму нарушений технологического процесса с возможными жертвами.

Существует множество методов неразрушающего контроля, основанных на различных принципах. Если рассматривать современные методы анализа и диагностики параметров объектов, то в зависимости от физических явлений, которые укладываются в методы неразрушающего контроля и государственные стандарты, можно выделить следующие: магнитный, электрический, вихревоковый, радиоволновый, тепловой, оптический, радиационный, акустический и проникающими веществами. Если же обратиться к утверждённым методам Гостехнадзора, то их насчитываются одиннадцать: ультразвуковой, акусто-эмиссионный, радиационный, магнитный, вихревоковый, капиллярный, визуально-измерительный, вибродиагностический, электрический, тепловой, оптический.

В данной статье рассматриваются наиболее известные методы для обнаружения и оценки дефектов и повреждений в конструкциях, а также существующие способы их механизации и автоматизации. Вместе с тем полное описание всех методов выходит за рамки данной статьи.

**Неразрушающий контроль и методы оценки.** Термин «неразрушающий контроль» охватывает широкий спектр аналитических методов для проверки, оценки химических и физических свойств материалов, а также самих конструкций без причинения им ущерба.

На сегодняшний день существует множество методов неразрушающего контроля, основанных на различных принципах. Их можно разделить на пять групп:

1. видимый контроль (т.е. видимый человеческому глазу);
2. методы на основе акустических волн, такие как акустическая эмиссия и ультразвуковой контроль;
3. оптические методы, включающие инфракрасную термографию;
4. методы, основанные на визуализации, например, рентгеновский/нейтронный контроль;
5. методы, основанные на электромагнитном поле [5].

Рассмотрим некоторые из них. Принцип любого метода неразрушающего контроля зависит от лежащих в его основе характеристик электромагнитных волн. Достижения в области генерации и распознавания различного спектра волн позволили широко применять неразрушающий контроль в промышленности [9].

**Визуальный контроль.** Визуальный контроль является основным методом неразрушающего контроля для выявления повреждений. Он экономически выгоден, гибок и быстр, а его недостатки вполне очевидны [19]. Метод включает визуально-оптический и капиллярный контроль. Визуально оптический метод остаётся ведущей процедурой контроля поверхностных дефектов в конструкциях [28]. Достаточно недорогой и широко применяемый капиллярный метод используется для обнаружения поверхностных дефектов литья, ковки и сварки в непроницаемых материа-

лах, которые включают трещины, поры, негерметичности, усталостные трещины, появившиеся в процессе эксплуатации и т. д.

Методы визуального контроля особенно эффективны при обнаружении макроскопических дефектов, таких как некачественные соединения, некорректные размеры, плохое качество обработки поверхности. Обычно для этого используется простое в обращении оборудование, но точность проверки зависит от уровня подготовки специалиста, условий выполняемых процедур и используемого оборудования [18].

**Акустическая эмиссия.** Метод основан на излучении и регистрации волн в результате возникновения напряжения в материале при быстрой перестройке его структуры [13]. Обнаружение и отслеживание этих внезапных всплесков напряжения производится с помощью массивов высокочувствительных датчиков [33].

Метод уникален тем, что сигналы (т. е. волны напряжения) излучаются исследуемым образцом, а не внешними источниками (как в других методах), регистрируются данные о возникающем напряжении или перемещении, а не геометрические дефекты, контролируются динамические процессы в материале, отслеживается развитие дефектов, что существенно повышает эффективность усталостных испытаний без применения механических воздействий. Такой контроль может обнаруживать усталостные трещины, разрушение кристаллической решётки материалов [19]. Однако обработка и анализ полученных данных требуют определённых навыков, опыта или автоматизации. Для решения этой проблемы был разработан подход, где выполнялась оценка нескольких параметров, дополняющих анализ повреждений, таких как кумулятивное количество событий [21], энергия [24], продолжительность или частота полученных сигналов. Возможно дополнять проверку повреждений с помощью других методов неразрушающего контроля, например микроскопии, чтобы обеспечить более надёжные результаты [16].

Существует также определённый интерес к комбинированному методу акустической эмиссии с ультразвуковым контролем, а именно к акустико-ультразвуковому методу, впервые представленному в 1981 году [12]. При использовании ультразвукового преобразователя повторяющиеся ультразвуковые импульсы воздействуют на материал, а результирующие волны дают информацию, которая способствует определению механизмов повреждения. Неразрушающий акустико-ультразвуковой контроль в основном используется для определения степени тяжести внутренних дефектов и неоднородностей в материалах [19].

**Ультразвуковой контроль.** Это метод акустического контроля, который в настоящее время активно применяется во многих областях производства [32]. Он работает с распространением поверхностных, объёмных и направленных волн.

Существуют различные типы ультразвуковых систем с сотнями режимов и частот волн. Стандартная система ультразвукового контроля состоит из передатчика, приёмника, преобразователя и устройств отображения. Передатчик может быть расположен под углом к образцу или в виде массивов датчиков [25]. Направленные волны могут генерироваться с помощью ультразвукового зонда, лазера, пьезоэлектрического элемента, встречно-штыревого преобразователя [11].

На текущий момент существуют как отечественные, так и зарубежные установки, которые механизируют либо автоматизируют поиск дефектов в самих конструкциях и использованных материалах. В данных установках автоматически изменяются характеристики ультразвукового поля искателя в зависимости от расстояния до излучателя, размеры сечения пучка, учитывается изменение его интенсивности от центра до периферии, поглощение или рассеяние в контролируемом изделии.

Во время автоматизированного контроля настраивается и устанавливается требуемая точность параметров сканирования. Зачастую применяются три способа поиска дефектов. При первом способе производят равномерное прозвучивание элемента, поскольку неизвестно распределение и расположение дефектов. Во втором способе уже имеются предварительные сведения (зачастую статистические), на основании которых прозвучивают места наиболее вероятного расположения дефектов. В третьем способе происходит самонастройка системы по обнаружению дефекта, его величины, точных координат во время равномерного прозвучивания изделия [1].

В зарубежном подходе к автоматизации ультразвукового контроля был использован искатель дефектов с качающейся диаграммой направленности (или, иначе, качающимся лучом). Также был предложен вариант искателя в виде иммерсионной ультразвуковой головки с бегущей блендой. В данных методах применяют иммерсионный ввод ультразвуковых волн в изделие, а также контактный с использованием контактирующих смазок [1].

**Инфракрасная термография.** Метод используется для обнаружения и обработки инфракрасного излучения объекта путём измерения и сопоставления теплового распределения [3]. Каждый объект с температурой выше абсолютного нуля испускает электромагнитное излучение, попадающее в инфракрасный спектр.

Метод инфракрасной термографии эффективно используется для контроля всего срока службы конструкций. Он применяется в научных исследованиях и различных областях промышленности, таких как диагностика зданий [14], прогнозирующее или профилактическое обслуживание, в медицине [10].

Классическая система инфракрасной термографии представляет собой инфракрасный радиометр с источником энергии либо без него, панель синхронизации и управления, устройство вывода информации. Радиометр является основой этой системы, он поглощает ИК-излучение и преобразует его в электрическое напряжение. Затем преобразованное излучение передаётся и отображается в виде инфракрасных изображений распределения температуры [28]. Возможны варианты пассивной и активной термографии [14]. В пассивной термографии тепловое излучение испускается непосредственно с поверхности испытуемого образца в естественных условиях с последующей проверкой. Для активной термографии испытуемый образец нагревается или охлаждается, а затем тепловые отклики обнаруживаются и регистрируются в соответствии с законом Стефана – Больцмана для выявления внутреннего состава этого образца.

Активная термография подразделяется на несколько видов в зависимости от способов воздействия на испытуемые образцы. Импульсная термография, которая также известна как оптическая, синхронная [17] или лазерная термография [26], использует различные оптические источники, такие как фотоспышки, галогенные лампы, лазеры [34]. Индукционная термография использует электрические токи для возбуждения электромагнитных волн [31]. Механическая термография применяет механические колебания для взаимодействия с внутренними структурами с последующим обнаружением тепловых волн от дефектов [36], она может быть реализована с помощью вибротермографии, микроволновой термографии или ультразвуковой термографии.

Автоматические методы анализа термограмм материалов в настоящее время только начинают разрабатываться, некоторые методы находятся на стадии исследований, но всё ещё не применяются в промышленности. На текущий момент существующие разработки позволяют решать задачи автоматического анализа термоизображений, а также автоматизировать поиск дефектов [7].

Работа с изображениями или термограммами состоит из нескольких этапов: 1) определение области диагностирования; 2) компьютерное преобразование участков изображений в набор количественных измерений (признаков); 3) построение общей классификации, которая относит тот или иной участок изображения к заранее установленному классу [29]. В современных реалиях стандартная практика использования и разработки автоматизированных систем распространяется в основном в медицине.

**Корреляция цифровых изображений.** Это простой и экономически эффективный оптический метод неразрушающего контроля для измерения деформаций, которые являются важнейшим параметром в строительных проектах. Изображения обычно получают с помощью ПЗС-камер. Система корреляции изображений отслеживает участки на поверхности образца и сравнивает цифровые фотографии на разных стадиях деформации для построения двумерных (2D) или трёхмерных (3D) векторных полей деформации и напряжений [27]. Таким образом, любые изменения в структуре или поверхности могут быть легко отражены для получения подробной информации о поверхностных напряжениях, деформациях или о распространении трещин, что делает метод хорошим инструментом для изучения распространения трещин и деформаций. Он обеспечивает более точный мониторинг деформаций, чем обычные экстензометры или тензодатчики, которые часто

имеют несовершенное крепление к измеряемой поверхности и ограничения, накладываемые усреднёнными значениями напряжений или деформаций по длине датчика [27].

Хотя системы корреляции цифровых изображений гибки и универсальны, стандартизация оборудования для её применения в каждой конкретной ситуации достаточно затруднена [30]. Но если взять во внимание механику усталостного разрушения, то главным параметром, который требует автоматизации, является оценка длины, скорости роста, раскрытия трещин. Стандартный алгоритм распознавания трещин в образцах содержит в себе несколько этапов: анализ последовательности изображений, выделение объекта с максимальной площадью, которая соответствует области наибольших неравномерностей на изображении оптического потока, анализ отдельных изображений, построение структуры трещин, поиск вершины трещины.

**Методы визуализации на основе рентгенографии и нейтронографии.** Методы основаны на фазово-контрастной визуализации, которая была впервые разработана в 1930-х годах. Они позволяют получать изображения с высоким разрешением, до атомного или молекулярного уровня. На сегодняшний день считается, что рентгенография проводится либо с помощью рентгеновских трубок в лаборатории, либо с помощью источников излучения. В качестве альтернативы нейтронная визуализация использует нейтроны, генерируемые реакторами или источниками расщепления [15].

Рентгенография и нейтронография позволяют получить представление о микроструктурах, остаточных напряжениях, полях напряжений и деформаций на атомном и кристаллическом уровнях. Их принципы измерения и обнаружения схожи. Падающие лучи направляются на образец, далее рассеянные лучи регистрируются детекторами в зависимости от импульса и/или переданной энергии [2]. Дифракционные спектры могут быть использованы для определения характеристик кристаллической структуры, остаточного напряжения.

Хотя синхротронное излучение и нейтронография имеют общие принципы, нейтронный метод превосходит по глубине проникновения. Рентгеновские лучи можно использовать только для неразрушающего контроля в приповерхностных областях [8]. В свою очередь нейтроны не несут электрического заряда, поэтому отсутствует электростатическое взаимодействие с атомами [2].

**Рентгенография.** Обычно для визуализации в лабораторных условиях источником рентгеновского излучения является рентгеновская трубка. Между нитью накала и металлической мишенью в вакуумной рентгеновской трубке прикладывается напряжение 30-60 кВ, заставляя высокоэнергетические электроны, испускаемые нитью накала, сталкиваться с металлической мишенью и излучать рентгеновские лучи. Длина волны рентгеновского излучения рассчитывается в зависимости от материала мишени. Наиболее часто используется металлическая мишень из меди, которая испускает сильные рентгеновские лучи [6].

Основным недостатком лабораторных систем рентгенографии является отсутствие возможности глубоко проникать в строительные материалы, поскольку это зависит от энергии и длины волны рентгеновского излучения [4]. При использовании гамма-лучей, имеющих более высокую проникающую способность, чем рентгеновские лучи, накладываются ограничения в связи с тем, что они генерируются из радиоактивного источника, который нельзя выключить и трудно назвать компактным в сравнении с рентгеновской трубкой. Таким образом, у рентгена довольно низкая эффективность обнаружения и ему требуется длительное время на измерения.

Следует отметить, что ограничения по глубине проникновения были преодолены благодаря быстрому развитию синхротронных установок, поскольку их рентгеновский поток является параллельным, монохроматическим с потоком и яркостью более высоких порядков, что позволяет очень быстро получать изображения с высоким разрешением.

Выделяют четыре поколения синхротронных установок. Установка первого поколения была построена в США в 1946 году и в основном использовалась для изучения физики высокоэнергетических частиц. Синхротроны второго поколения были разработаны в 1980-х годах и предназначались для генерации синхротронного света. В них использовались поворотные магниты. Источники света третьего поколения появились спустя десятилетие [38] на установках, в которых использовались вводные устройства для получения интенсивных и регулируемых рентгеновских лучей. Установки четвёртого поколения создаются на основе лазеров на свободных электронах.

Эти установки предлагают продвинутые возможности для создания более ярких источников света [35]. По состоянию на 2020 год в мире насчитывается около 50 синхротронных установок, выполняющих различные исследования в области техники, здравоохранения и медицины, материаловедения, химии, культурного наследия, наук об окружающей среде и т. д.

За последнее десятилетие преобразователи ионизирующего излучения в видимый свет получили широкое применение в промышленности. Сюда можно отнести флуорескопический экран, сцинтилляционный кристалл, электронно-оптический преобразователь и электролюминесцентный экран, которые одновременно являются и усилителями яркости изображения [1]. Перечисленные преобразователи позволяют механизировать процесс проверки. На текущий момент управление процессом и оценку качества конструкций производит оператор, который следит за изображением контролируемого образца.

Примером полной автоматизации рентгенографического контроля служит отечественная разработка анализа видеосигнала, состоящая из формирователя зоны контроля, преобразователя яркости видеосигнала, схемы сравнения двух яркостей в зоне контроля и конечного формирователя логических операций [1]. Недостатком данной разработки является её небольшой размер, что ограничивает габариты изделий, которые возможно проконтролировать с её помощью.

*Нейтронная рентгенография* – это способ визуализации неоднородностей материалов, использующий преимущества рассеивания и поглощения потока частиц между различными структурами внутри объекта [23]. Нейтроны имеют волновой характер, длины их волн составляют порядок межатомных расстояний, а кинетическая энергия близка к энергии колебания атомов. Таким образом, они открывают возможности для изучения дифракции и неупругого рассеяния, которые были экспериментально продемонстрированы в 1946 году с использованием графитового реактора во время Манхэттенского проекта в США [2]. В 1960-х и 1970-х годах был достигнут прогресс в сканировании деформаций с использованием нейтронов.

Схематический пример работы состоит в следующем. Импульсный пучок нейтронов с широким диапазоном собственной энергии направляется рассеянным на образец, затем детекторы собирают дифрагированные нейтроны под фиксированным углом. Поскольку нейтроны могут проникать вглубь материалов, деформации/напряжения могут быть измерены датчиками. Такая визуализация позволяет получить плоское или объёмное изображение распределения коэффициента ослабления в материале, таким образом можно визуализировать внутреннюю структуру и состав материала [37].

Нейтронная визуализация обеспечивает пространственное разрешение изображения в несколько сотен микрон, а в лучшем случае менее 10 мм. С точки зрения эффективности такая визуализация занимает несколько часов или дней в сравнении с минутами или секундами рентгенографии, это связано с низким потоком нейтронов. В связи с тем, что нейтронографический метод дифракции требует наличия либо ядерного реактора, либо специальных устройств расщепления, практика повсеместного использования данного метода, а тем более автоматизация процессов проверки, затруднительна.

**Перспективы и выводы.** Учитывая сложный характер обнаружения дефектов и повреждений в различных конструкциях, возможные ошибки, связанные с интерпретацией человеком компьютерных данных, выводимых представленными методами неразрушающего контроля, совершенствование технического контроля в текущее десятилетие направлено на появление автоматических систем обнаружения и распознавания дефектов с использованием различных алгоритмов и искусственного интеллекта. Особенное развитие получают методы инфракрасной термографии и корреляции цифровых изображений, поскольку они связаны с запросами не только промышленности, но и медицины.

Каждый описанный в статье метод имеет свой собственный потенциал, однако возможность массового применения у них ограничена, поскольку зачастую они достаточно дорогостоящие, громоздкие и не всегда применимы для каждого конкретного случая.

Надлежащий выбор подходящего способа контроля может быть достаточно сложным, однако он необходим для получения полной информации, используемой для поддержания качества и увеличения срока службы выпускаемой продукции.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Химченко, Н. В. Неразрушающий контроль в химическом и нефтяном машиностроении / Н. В. Химченко, В. А. Бобров. – М.: Машиностроение, 1978. – 264 с.
2. Применение инфракрасной термографии в современной медицине (обзор литературы) / И. С. Кожевников, М. Н. Панков, А. В. Грибанов, Л. Ф. Старцева, Н. А. Ермошина // Экология человека. – 2017. – № 2. – С. 30-46.
3. Analysis of residual stress by diffraction using neutron and synchrotron radiation / Fitzpatrick M. E., Lodini A. – Boca Raton, FL: CRC Press, 2003. – 368 p.
4. Infrared thermal imaging: fundamentals, research and applications / Vollmer M., Mollmann K. P. – 2nd ed. Hoboken NJ: John Wiley&Sons, 2017. – 794 p.
5. Introduction to the characterization of residual stress by neutron diffraction / Hutchings M. T., Withers P. J., Holden T. M. – Boca Raton, FL: CRC press, 2005. – 420 p.
6. New technologies in electromagnetic non-destructive testing / Huang S., Wang S. – Berlin: Springer, 2016. – 232 p.
7. Viscoelastically prestressed composites: towards process optimisation and application to morphing structures / Wang B. – Hull: University of Hull, 2016. – 242 p.
8. Allen A. J., Hutchings M. T., Windsor C. G. Neutron diffraction methods for the study of residual stress fields // Advances in Physics. – 1985. – Vol. 34. – P. 445-473.
9. Ferguson B., Zhang X. C. Materials for terahertz science and technology // Nature Materials. – 2002. – Vol. 1. – P. 26-33.
10. Lahiri B. B., Bagavathiappan S., Jayakumar T. Medical applications of infrared thermography: a review // Infrared Physics and Technology. – 2012. – Vol. 55. – P. 221-235.
11. Su Z., Ye L., and Lu Y. Guided Lamb waves for identification of damage in composite structures: a review // The Journal of Sound and Vibration. – 2006. – Vol. 295. – P. 753-780.
12. Vary A. Acousto-ultrasonic characterization of fiber reinforced composites // Materials Evaluation. – 1982. – Vol. 40. – P. 1-15.
13. Amenabar I., Lopez F. Mendikute A. In introductory review to THz non-destructive testing of composite mater // Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. – 2013. – Vol. 34. – P. 152-169.
14. Balaras C. A., Argiriou A. A. Infrared thermography for building diagnostics // Energy and Buildings. – 2002. – Vol. 34. – P. 171-183.
15. Banhart J., Borbely A., Dzieciol K. X-ray and neutron imaging – complementary techniques for materials science and engineering // The International Journal of Materials Research. – 2010. – Vol. 101. – P. 1069-1079.
16. Barre S., Benzeggagh M. L. On the use of acoustic emission to investigate damage mechanisms in glass-fibre-reinforced polypropylene // Composites Science and Technology. – 1994. – Vol. 52. – P. 369-376.
17. Busse G., Wu D., Karpen W. Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography // Journal of Applied Physics. – 1992. – Vol. 71. – P. 3962-3965.
18. Drewry M. A., Georgiou G. A. A review of NDT techniques for wind turbines // The British Institute of Non-Destructive Testing. – 2007. – Vol. 49. – P. 137-141.
19. Gholizadeh S. A review of non-destructive testing methods of composite materials // Procedia Structural Integrity. – 2016. – Vol. 1. – P. 50-57.
20. Hamstad M. A. A review: acoustic emission, a tool for composite-materials studies // Experimental Mechanics. – 1986. – Vol. 26. – P. 7-13.
21. Huguet S., Godin N., Gaertner R. Use of acoustic emission to identify damage modes in glass fibre reinforced polyester // Composites Science and Technology. – 2002. – Vol. 62. – P. 1433-1444.
22. Ibarra-Castanedo S., D. Gonzalez M., Klein M., Pilla S., Vallerand X. Malague Infrared image processing and data analysis // Infrared Physics & Technology. – 2004. – Vol. 46 (1-2). – P. 75-83.
23. Kockelmann W., Zhang S. Y., Kelleher J. F. IMAT – a new imaging and diffraction instrument at ISIS // Physics Procedia. – 2013. – Vol. 43. – P. 100-110.
24. Kordatos E. Z., Dassios K. G., Aggelis D. G. Rapid evaluation of the fatigue limit in composites using infrared lock-in thermography and acoustic emission // Mechanics Research Communications. – 2013. – Vol. 54. – P. 14-20.



25. Li C., Pain D., Wilcox P. D. Imaging composite material using ultrasonic arrays // NDT&E international. – 2013. – Vol. 53. – P. 8-17.
26. Li T., Almond D. P. Crack imaging by scanning pulsed laser spot thermography // NDT&E international. – 2011. – Vol. 44. – P. 216-225.
27. McCormick N., Lord J. Digital image correlation // Mater Today. – 2010. – Vol. 13. – P. 52-54.
28. Meola C., Carlomagno G. M. Application of infrared thermography to adhesion science // Journal of Adhesion Science and Technology. – 2006. – Vol. 20. – P. 589-632.
29. Mona A. S. Ali, Gehad I. S., Tarek G., Aboul E. H., Vaclav S., Lincoln F. S. Detection of Breast Abnormalities of Thermograms based on a New Segmentation Method // Proceedings of the 2015 Federated Conference on Computer Science and Information Systems. ACSIS. – 2015. – Vol. 5. – P. 255-261.
30. Pan B. Digital image correlation for surface deformation measurement: historical developments, recent advances and future goals // Measurement Science and Technology. – 2018. – Vol. 29. – № 82001.
31. Riegert G., Zweschper T., Busse G., Lockin thermography with eddy current excitation // Quantitative InfraRed Thermography Journal. – 2004. – Vol. 1. – P. 21-32.
32. Rose J. L. A baseline and vision of ultrasonic guided wave inspection potential // The Journal of Pressure Vessel Technology. – 2002. – Vol. 124. – P. 273-282.
33. Scruby C. B. An introduction to acoustic emission // Journal of Physics. – 1987. – Vol. 20. – P. 946-953.
34. Sun J. G. Analysis of pulsed thermography methods for defect depth prediction // The Journal of Heat Transfer. – 2006. – Vol. 128. – P. 329-338.
35. Tavares P. F., Leemann S. C., Sjostrom M. The MAXIV storage ring project // Journal of Synchrotron Radiation. – 2014. – Vol. 21. – P. 862-877.
36. Tenek L. H., Henneke E. G., Gunzburger M. D. Vibration of delaminated composite plates and some applications to non-destructive testing // Composite Structures. – 1993. – Vol. 23. – P. 253-262.
37. Vontobel P., Lehmann E. H., Hassanein R. Neutron tomography: method and applications // Physica B: Condensed Matter. – 2006. – P. 385-386, 475-480.
38. Wang B, Tan D, Lee T. L. Ultrafast synchrotron Xray imaging studies of microstructure fragmentation in solidification under ultrasound // Acta Mater. – 2018. – Vol. 144. – P. 505-515.
39. Zhong S. Progress in terahertz nondestructive testing: a review // Frontiers of Mechanical Engineering. – 2019. – Vol. 14. – P. 273-281.

Колесник М. Б.

ПОЛУЧЕНИЕ АППРОКСИМИРУЮЩИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ДЛЯ УЧЁТА ВЛИЯНИЯ  
ПАРАМЕТРОВ НАГРУЗКИ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Колесник М. Б.

M. B. Kolesnik

## ПОЛУЧЕНИЕ АППРОКСИМИРУЮЩИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ДЛЯ УЧЁТА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ НАГРУЗКИ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

### OBTAINING APPROXIMATING DEPENDENCIES TO ACCOUNT FOR THE INFLUENCE OF LOAD PARAMETERS ON THE ASYNCHRONOUS MOTOR ENERGY PERFORMANCE

**Колесник Максим Борисович** – студент кафедры электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: kolmax2001@mail.ru.

**Maxim B. Kolesnik** – Student, Electromechanics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: kolmax2001@mail.ru.

**Аннотация.** Рассмотрено влияние коэффициента использования асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором на энергетические характеристики. Приведены графики зависимостей коэффициента полезного действия и мощности для двигателей с разным классом энергоэффективности при изменении нагрузки. Получены аналитические выражения, позволяющие корректировать мощность электромеханического преобразователя с учётом характера нагрузки.

**Summary.** The influence of the utilization factor of an asynchronous motor with a short-circuited rotor on the energy characteristics is considered. Graphs of the dependences of the efficiency and power for engines with different energy efficiency classes when the load changes are given. Analytical expressions are obtained that allow adjusting the power of an electromechanical converter taking into account the nature of the load.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, коэффициент использования, коэффициент полезного действия, коэффициент мощности, аппроксимация.

**Key words:** asynchronous motor, utilization factor, efficiency factor, power factor, approximation.

УДК 621.31:621.25

**Введение.** На сегодняшний день выпускается и эксплуатируется большое количество электродвигателей постоянного и переменного тока. При проектировании в них закладывается детерминированный диапазон мощности, в пределах которого теоретически двигатель наиболее эффективно преобразует электрическую энергию в механическую мощность на валу, связанном с нагрузкой. Однако при эксплуатации электромеханического преобразователя (ЭМП) мощность и момент сопротивления нагрузки часто не соответствуют номинальной мощности и врачающему моменту двигателя на валу, при котором он работает с оптимальными по величине значениями коэффициента полезного действия  $\eta$  и коэффициента мощности  $\cos\varphi$ . Это приводит к ухудшению энергетических показателей и снижению эффективности, что противоречит энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года, которая предусматривает в качестве основных приоритетов энергетическую эффективность и максимально возможное использование оборудования, имеющего подтверждение производства на территории Российской Федерации. Перечень такого оборудования включает оборудование и технологии мониторинга и автоматизированного управления технологическими процессами, что подтверждает актуальность проведения исследований влияния нагрузки на энергетические характеристики одного из самых распространённых типов ЭМП.

**Постановка задачи исследования.** Одним из условий повышения энергетической эффективности ЭМП является учёт характера нагрузки при проектировании преобразователя, особенно

если изменение нагрузки приводит к несоответствию мощности двигателя энергетически обоснованному диапазону. Примером такого механизма является электропривод задвижки магистрального трубопровода, который выбран в качестве объекта исследования. Широкое использование запорных арматур связано с большой протяжённостью трубопроводных магистралей в Российской Федерации, которая составляет более 250 тыс. км. На валу электропривода запорной арматуры наблюдается резкое нелинейное изменение нагрузки, достигающее нескольких порядков, что обусловлено гидродинамикой движения клина задвижки. Это, в свою очередь, приводит к ухудшению энергетических показателей и, как следствие, снижению экономических [1–7].

**Влияние коэффициента использования двигателя на энергетические показатели.** Проделанный анализ показал, что стандартные методики проектирования электрических машин не позволяют учесть динамику изменения параметров нагрузки при эксплуатации [8–14].

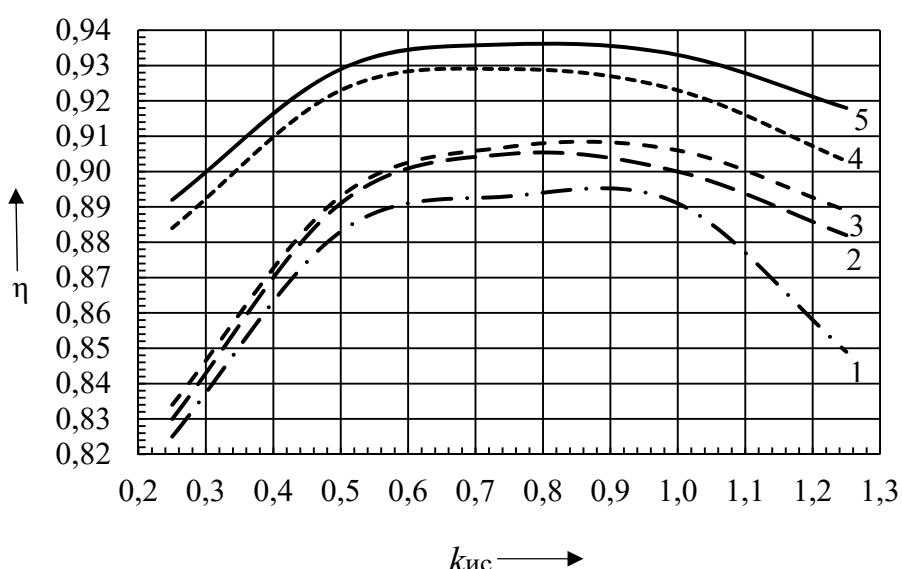
Для количественного обоснования необходимости учёта характера нагрузки при проектировании можно ввести коэффициент использования  $k_{ic}$ , который определяется отношением фактической мощности на валу  $P_{val}$  к номинальной мощности двигателя  $P_{2n}$ :

$$k_{ic} = \frac{P_{val}}{P_{2n}}$$

Получение аналитических выражений, устанавливающих связь энергетических характеристик ЭМП и параметров быстроизменяющейся нагрузки, осложняется большой номенклатурой асинхронных двигателей.

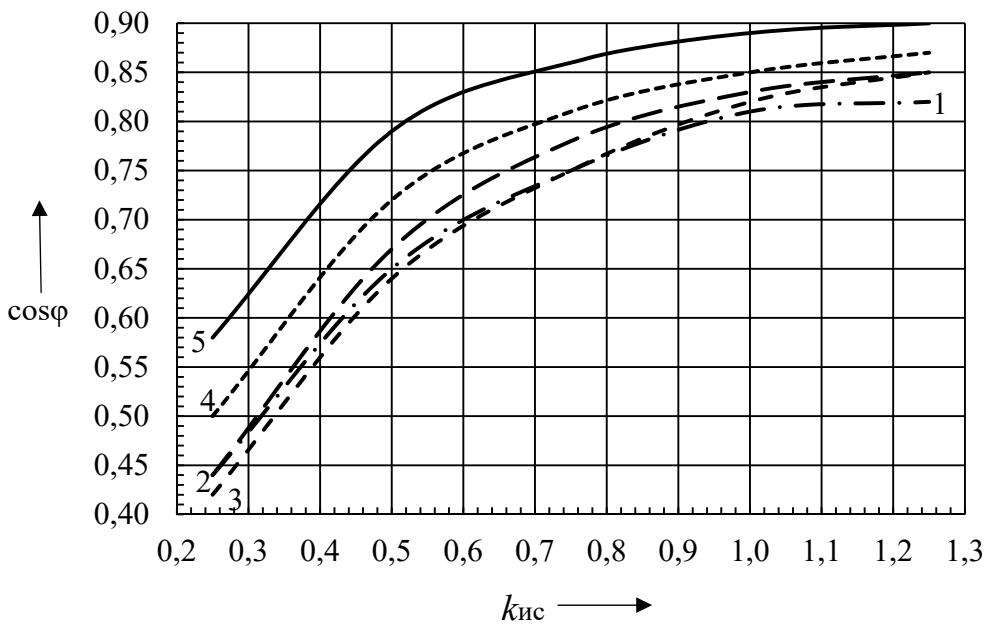
При выборе двигателя важно обращать внимание, к какому классу энергоэффективности он принадлежит (IE1 – стандартная; IE2 – высокая; IE3 – очень высокая энергоэффективность и т. д.). Это связано с тем, что с увеличением класса энергоэффективности ужесточаются требования точного нахождения  $\eta$  и  $\cos\varphi$ . Двигатель с более высоким классом энергоэффективности является более предпочтительным вариантом, т. к., несмотря на его более высокую стоимость, при продолжительной эксплуатации его применение экономически более целесообразно. Однако обеспечение и поддержание класса энергоэффективности при эксплуатации зависит от степени использования ЭМП.

Для оценки влияния коэффициента использования получены зависимости  $\eta$  и  $\cos\varphi$  для четырёхполюсных двигателей с классом энергоэффективности IE1 в диапазоне мощностей 15...55 кВт (см. рис. 1-2).



$1 - P_{2n} = 15 \text{ кВт}; 2 - P_{2n} = 22 \text{ кВт}; 3 - P_{2n} = 30 \text{ кВт}; 4 - P_{2n} = 45 \text{ кВт}; 5 - P_{2n} = 55 \text{ кВт}$

Рис. 1. Зависимость  $\eta = f(k_{ic})$  для четырёхполюсных двигателей  
с классом энергоэффективности IE1



$1 - P_{2H} = 15 \text{ кВт}; 2 - P_{2H} = 22 \text{ кВт}; 3 - P_{2H} = 30 \text{ кВт}; 4 - P_{2H} = 45 \text{ кВт}; 5 - P_{2H} = 55 \text{ кВт}$

Рис. 2. Зависимость  $\cos\varphi = f(k_{ic})$  для четырёхполюсных двигателей  
с классом энергоэффективности IE1

Сравнительный анализ зависимостей на рис. 1 показывает, что эффективное использование электродвигателя достигается при нагрузке, равной 0,6...0,9. При этом на рис. 1-2 значения  $\eta$  и  $\cos\varphi$  в заданном диапазоне изменяются следующим образом:

$$\begin{aligned}
 P_{2H} = 15 \text{ кВт} & \quad \eta = 0,891 \dots 0,895; \quad \cos\varphi = 0,700 \dots 0,790; \\
 P_{2H} = 22 \text{ кВт} & \quad \eta = 0,901 \dots 0,905; \quad \cos\varphi = 0,725 \dots 0,815; \\
 P_{2H} = 30 \text{ кВт} & \quad \eta = 0,903 \dots 0,907; \quad \cos\varphi = 0,695 \dots 0,795; \\
 P_{2H} = 45 \text{ кВт} & \quad \eta = 0,927 \dots 0,929; \quad \cos\varphi = 0,767 \dots 0,838; \\
 P_{2H} = 55 \text{ кВт} & \quad \eta = 0,934 \dots 0,936; \quad \cos\varphi = 0,830 \dots 0,881.
 \end{aligned}$$

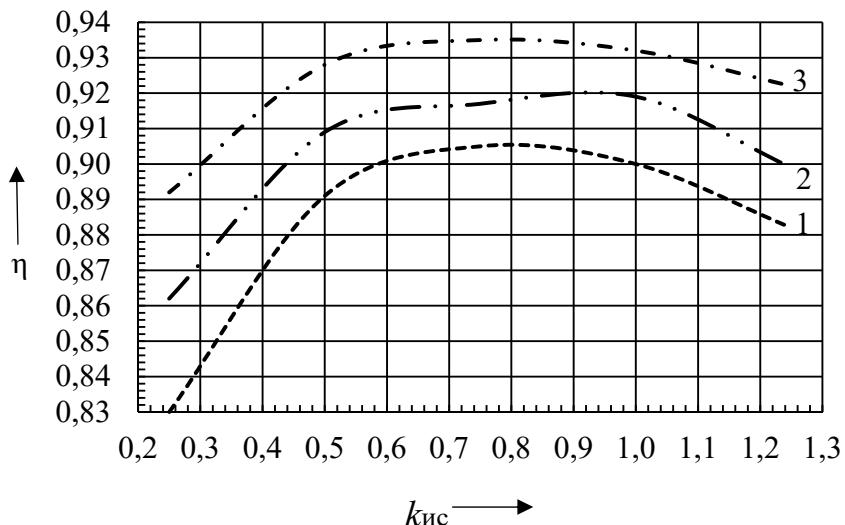
Следует отметить, что диапазон работы двигателей с максимальной энергоэффективностью небольшой и при уменьшении номинальной мощности двигателя он также уменьшается, поэтому в данном случае точность учёта характера нагрузки должна повышаться. С возрастанием мощности диапазон работы двигателей с заданной энергоэффективностью расширяется, но в крупных машинах изменение  $k_{ic}$  при относительно небольшом изменении  $\eta$  приводит к существенным потерям в абсолютных единицах.

Построенные графики зависимостей  $\eta = f(k_{ic})$  и  $\cos\varphi = f(k_{ic})$  аппроксимированы в виде полиномиальных выражений четвёртого порядка и представлены ниже под номерами, соответствующими мощности  $P_{2H}$ . Область определения функций находится в следующем диапазоне  $k_{ic} = 0,25 \dots 1,25$ .

$$\begin{aligned}
 1. \eta(k_{ic}) &= -0,6827k_{ic}^4 + 2,0907k_{ic}^3 - 2,4533k_{ic}^2 + 1,3173k_{ic} + 0,619; \\
 \cos\varphi(k_{ic}) &= -0,8533k_{ic}^4 + 2,88k_{ic}^3 - 3,8667k_{ic}^2 + 2,68k_{ic} - 0,03. \\
 2. \eta(k_{ic}) &= -0,2347k_{ic}^4 + 0,8853k_{ic}^3 - 1,3373k_{ic}^2 + 0,9147k_{ic} + 0,672; \\
 \cos\varphi(k_{ic}) &= -0,32k_{ic}^4 + 1,44k_{ic}^3 - 2,62k_{ic}^2 + 2,33k_{ic} - 3 \cdot 10^{-12}. \\
 3. \eta(k_{ic}) &= -0,3307k_{ic}^4 + 1,1467k_{ic}^3 - 1,5633k_{ic}^2 + 0,9843k_{ic} + 0,669; \\
 \cos\varphi(k_{ic}) &= -0,7467k_{ic}^4 + 2,6133k_{ic}^3 - 3,6333k_{ic}^2 + 2,6367k_{ic} - 0,05. \\
 4. \eta(k_{ic}) &= -0,2453k_{ic}^4 + 0,8373k_{ic}^3 - 1,1367k_{ic}^2 + 0,6997k_{ic} + 0,768; \\
 \cos\varphi(k_{ic}) &= -0,5333k_{ic}^4 + 2,1867k_{ic}^3 - 3,4867k_{ic}^2 + 2,6633k_{ic} + 0,02. \\
 5. \eta(k_{ic}) &= -0,2347k_{ic}^4 + 0,8k_{ic}^3 - 1,0733k_{ic}^2 + 0,658k_{ic} + 0,783;
 \end{aligned}$$

$$\cos\varphi(k_{ic}) = -0,8533k_{ic}^4 + 3,2k_{ic}^3 - 4,5867k_{ic}^2 + 3,08k_{ic} + 0,05.$$

На рис. 3-4 приведены графики зависимостей  $\eta = f(k_{ic})$  и  $\cos\varphi = f(k_{ic})$  для четырёхполюсных двигателей мощностью  $P_{2H} = 22$  кВт с разными классами энергоэффективности.

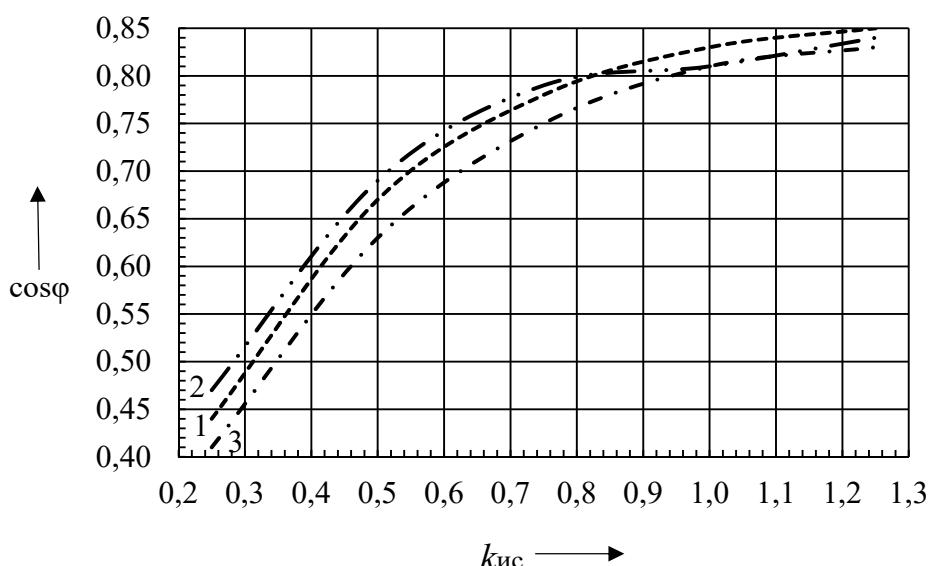


1 – IE1; 2 – IE2; 3 – IE3

Рис. 3. Зависимость  $\eta = f(k_{ic})$  для четырёхполюсных двигателей мощностью  $P_{2H} = 22$  кВт с разной энергоэффективностью

На рис. 3-4 значения  $\eta$  и  $\cos\varphi$  в заданном диапазоне изменяются следующим образом:

- |     |                            |                                   |
|-----|----------------------------|-----------------------------------|
| IE1 | $\eta = 0,901 \dots 0,906$ | $\cos\varphi = 0,725 \dots 0,815$ |
| IE2 | $\eta = 0,915 \dots 0,920$ | $\cos\varphi = 0,742 \dots 0,805$ |
| IE3 | $\eta = 0,933 \dots 0,935$ | $\cos\varphi = 0,687 \dots 0,793$ |



1 – IE1; 2 – IE2; 3 – IE3

Рис. 4. Зависимость  $\cos\varphi = f(k_{ic})$  для четырёхполюсных двигателей мощностью  $P_{2H} = 22$  кВт с разной энергоэффективностью

Построенные графики зависимостей  $\eta = f(k_{ic})$  и  $\cos\varphi = f(k_{ic})$  аппроксимированы в виде полиномиальных выражений четвёртого порядка и представлены ниже под номерами, соответствующими классу энергоэффективности:

1.  $\eta(k_{ic}) = -0,2347k_{ic}^4 + 0,8853k_{ic}^3 - 1,3373k_{ic}^2 + 0,9147k_{ic} + 0,672;$   
 $\cos\varphi(k_{ic}) = -0,32k_{ic}^4 + 1,44k_{ic}^3 - 2,62k_{ic}^2 + 2,33k_{ic} - 3 \cdot 10^{-12}.$
2.  $\eta(k_{ic}) = -0,5227k_{ic}^4 + 1,6587k_{ic}^3 - 1,9833k_{ic}^2 + 1,0723k_{ic} + 0,694;$   
 $\cos\varphi(k_{ic}) = -0,5333k_{ic}^4 - 0,9067k_{ic}^3 - 0,4333k_{ic}^2 + 1,4767k_{ic} + 0,14.$
3.  $\eta(k_{ic}) = -0,1707k_{ic}^4 + 0,6293k_{ic}^3 - 0,9093k_{ic}^2 + 0,5907k_{ic} + 0,792;$   
 $\cos\varphi(k_{ic}) = -0,2133k_{ic}^4 + 0,96k_{ic}^3 - 1,9067k_{ic}^2 + 1,94k_{ic} + 0,03.$

**Заключение.** В статье рассмотрено влияние коэффициента использования на энергетические показатели асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором серии 7AVE со степенью защиты IP54. Приведены значения коэффициентов полезного действия и мощности для двигателей с разным классом энергоэффективности при изменении нагрузки в диапазоне 0,25...1,25 от номинальной. Получены аппроксимирующие зависимости, позволяющие корректировать мощность электромеханического преобразователя с учётом характера нагрузки и оценивать его энергоэффективность при изменении нагрузки на валу.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Колесник, М. Б. Повышение эффективности привода герметичной задвижки / М. Б Колесник // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2022. – С. 144-146.
2. Определение потерь в передаточных механизмах специальных электромеханических приводов / С. Н. Иванов [и др.] // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № V-1 (45). – С. 107-114.
3. Анализ совместимости в задаче управления безредукторным приводом стрелочного перевода / М. Б. Колесник [и др.] // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № VII-1 (47). – С. 14-19.
4. Постановка задачи выбора и алгоритм определения параметров передаточных элементов электромеханических преобразователей с учётом действующих напряжений / С. Н. Иванов [и др.] // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № I-1 (49). – С. 29-36.
5. Иванов, С. Н. Обеспечение эксплуатационной совместимости асинхронных двигателей с линейным перемещением исполнительного элемента / С. Н. Иванов, М. Б. Колесник, Ю. Б. Колошенко // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № V-1 (53). – С. 24-29.
6. Колесник, М. Б. Анализ напряжённо-деформированного состояния асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при осевых нагрузках / М. Б. Колесник, А. А. Просолович // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № VII-1 (55). – С. 24-29.
7. Иванов, С. Н. Учёт осевых нагрузок при проектировании электромеханических приводов / С. Н. Иванов [и др.] // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного университета. Науки о природе и технике. – 2022. – № I-1 (57). – С. 63-67.
8. Проектирование электрических машин: учеб. для вузов / И. П. Копылов, Б. К. Клоков, В. П. Морозов, Б. Ф. Токарев; под ред. И. П. Копылова. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: Высш. шк., 2002. – 757 с.
9. Гольдберг, О. Д. Проектирование электрических машин: учеб. для вузов / О. Д. Гольдберг, Я. С. Гурин, И. С. Свириденко. – М.: Высш. шк., 1984. – 431 с.
10. Копылов, И. П. Электрические машины / И. П. Копылов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 360 с.
11. Вольдек, А. И. Электрические машины / А. И. Вольдек. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.
12. Иванов-Смоленский, А. В. Электрические машины: учеб. для вузов / А. В. Иванов-Смоленский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. – 656 с.
13. Брускин, Д. Э. Электрические машины и микромашины / Д. Э. Брускин, А. Е. Зохорович, В. С. Хвостов. – М.: Высш. шк., 1990. – 528 с.
14. Асинхронные двигатели серии 4А: справ. / А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболенская. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с.



**Ким К. К., Иванов С. Н., Колесова А. В.  
K. K. Kim, S. N. Ivanov, A. V. Kolesova**

## МЕТОД УЧЁТА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОНТАКТНОГО ПРОВОДА С ПАНТОГРАФОМ

### METHOD OF ACCOUNTING FOR THE INTERACTION OF THE CONTACT WIRE WITH THE PANTOGRAPH

**Ким Константин Константинович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электротехника и теплоэнергетика» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, Санкт-Петербург); 190031, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9; тел. 8(903)096-57-70. E-mail: kimkk@inbox.ru.

**Konstantin K. Kim** – Dr. Sc., Professor, Head of Theoretical Electrical Engineering Department, Sankt-Petersburg State Transport University Emperor Alexander I (Russia, Sankt-Petersburg); house 9, Moskovsky Av., Sankt-Petersburg, Russia. E-mail: kimkk@inbox.ru.

**Иванов Сергей Николаевич** – доктор технических наук, профессор кафедры электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: ivanov.sn@email.knastu.ru.

**Sergey N. Ivanov** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Electromechanics Department, Komsomolsk-na-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: ivanov.sn@email.knastu.ru.

**Колесова Анна Владимировна** – старший преподаватель кафедры «Электротехника и теплоэнергетика» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, Санкт-Петербург). E-mail: toe@pgups.ru.

**Anna V. Kolesova** – Senior Lecturer, Theoretical Electrical Engineering Department, Sankt-Petersburg State Transport University Emperor Alexander I (Russia, Sankt-Petersburg). E-mail: toe@pgups.ru.

**Аннотация.** Высокоскоростное движение электропоездов требует повышения качества сбора тока, которое непосредственно определяется взаимодействием пантографа и контактной сети. В данной статье приведены результаты построения возможных моделей взаимодействия пантографа с контактным проводом на основе граничной задачи для самосопряжённых операторов.

**Summary.** The high-speed movement of electric trains requires an increase in the quality of current collection, which is directly determined by the interaction of the pantograph and the contact network. This article presents the results of constructing possible models of interaction between a pantograph and a contact wire based on the boundary value problem for self-adjoint operators.

**Ключевые слова:** пантограф, контактный провод, качество токосъёма, однопараметрическая модель, эластичность.

**Key words:** pantograph, contact wire, current collection quality, one-parameter model, elasticity.

УДК 538.3:538.4

**Введение.** Высокоскоростное движение электропоезда требует улучшения качества токосъёма. Основная проблема состоит в описании взаимодействия контактного провода и пантографа [1–5]. В данной статье рассматривается класс моделей этого взаимодействия и метод их реализации. Простейшая однопараметрическая модель позволяет рассчитать собственные частоты контактной подвески с учётом следующих допущений:

- сила натяжения по длине контактного провода постоянна;
- перемещения контактного провода учитываются только в вертикальной плоскости;

- вследствие малой амплитуды колебаний нелинейности колебательного процесса не учитываются;

- скорость поезда и сила нажатия пантографа постоянны.

**Теоретические основы исследования.** На основе принятой модели исследуемый процесс можно сформулировать как граничную задачу для самосопряжённого оператора. Формальное отображение, принятое для модельного уравнения, запишется

$$\frac{\partial^2 Y(x, t)}{\partial t^2} + \hat{L}Y(x, t) = \frac{F}{\rho S} \delta(x - vt),$$

где  $Y(x, t)$  – переход из состояния покоя в точке  $x$  в момент  $t$  контактного провода;  $\hat{L}$  – самосопряжённый оператор в дифференциальном виде, не зависящий от  $t$ ;  $\rho, S, F, v$  – соответственно учитываемые при моделировании плотность контактного провода, площадь его поперечного сечения, действующая со стороны пантографа сила, скорость перемещения.

В статике взаимодействие пантографа и контактного провода описывается следующим выражением:

$$\hat{L}y(x, x_0) = \frac{F}{\rho S} \delta(x - x_0), \quad (1)$$

где  $y(x, x_0)$  – топологическое изменение в точке  $x$  контактного провода из состояния покоя в тот момент, когда пантограф находится в точке  $x_0$ . Любой самосопряжённый оператор  $\hat{L}$  обладает полной системой ортонормированных собственных функций  $\{\psi_n(x)\}$  в  $L^2$ .

Эти функции удовлетворяют соответствующим граничным условиям и уравнению

$$\hat{L}\psi_n = \lambda_n \psi_n.$$

Поэтому любую функцию  $z(x)$  можно разложить в сходящийся ряд, используя в качестве основы выражение

$$z(x) = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \psi_n(x).$$

Если предположить, что моделью реального процесса является такой процесс, когда рассматриваемые функции достаточно гладки и удовлетворяют всем необходимым условиям, то коэффициенты разложения могут быть найдены как

$$B_n = \int_{X_1}^{X_2} z(x) \psi_n(x) dx,$$

где  $X_1$  и  $X_2$  – величины, определяющие границы области  $\hat{L}$ .

Использование разложения в ряд вместо функции упрощает поиск процедуры.

Для уравнения статического взаимодействия функция  $y(x, x_0)$  и правая часть уравнения (1) предварительно раскладываются в ряд, элементы которого находятся из выражений

$$y(x, x_0) = \sum_{n=1}^{\infty} R_n(x_0) \psi_n(x);$$

$$\frac{F}{\rho S} \delta(x - x_0) = \sum_{n=1}^{\infty} D_n(x_0) \psi_n(x),$$

где  $D_n(x_0)$  – коэффициенты, которые могут быть вычислены путём интегрирования из последнего уравнения:



$$D_n(x_0) = \frac{F}{\rho S} \psi_n(x_0).$$

Для получения уравнения для значений  $R_n(x_0)$  используется ортогональность функций  $\psi_n(x)$ :

$$R_n(x_0) \lambda_n = \frac{F}{\rho S} \psi_n(x_0).$$

С использованием атрибутов оператора модели может быть найдена упругость контактного провода. Для этого учитывается определение эластичности:

$$\eta(x) \equiv \frac{y(x, x)}{F},$$

в модифицированном виде

$$\eta(x) = \frac{1}{\rho S} \sum_n \frac{\psi_n^2(x)}{\lambda_n}.$$

Интегрирование последнего приводит к средней эластичности  $\bar{\eta}$ :

$$\bar{\eta} = \frac{1}{\rho S L} \sum_n \frac{1}{\lambda_n}.$$

Аналогичный подход применим и к уравнению модели. Решение ищется в виде

$$Y(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \phi_n(t) \psi_n(x),$$

где  $\phi_n(t)$  – неизвестные коэффициенты разложения.

Подстановка этого ряда в уравнение модели с учётом  $\hat{L} \psi_n = \lambda_n \psi_n$  позволяет получить

$$\phi_n''(t) + \lambda_n \phi_n(t) = \frac{F}{\rho S} \psi_n(vt).$$

Это уравнение имеет известное решение:

$$\phi_n(t) = P_{1n}(t) \sin(\sqrt{\lambda_n} t) + P_{2n}(t) \cos(\sqrt{\lambda_n} t),$$

где

$$P_{1n}(t) = \frac{f}{\sqrt{\lambda_n}} \int_0^t \psi_n(v\tau) \cos(\sqrt{\lambda_n} \tau) d\tau;$$

$$P_{2n}(t) = -\frac{f}{\sqrt{\lambda_n}} \int_0^t \psi_n(v\tau) \sin(\sqrt{\lambda_n} \tau) d\tau,$$

здесь  $f \equiv \frac{F}{\rho S}$ .

Использование этого результата позволяет получить выражение для величины смещения контактного провода:

$$Y(x, t) = f \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\psi_n(x)}{\sqrt{\lambda_n}} \int_0^t \psi_n(v\tau) \sin(\sqrt{\lambda_n} (t - \tau)) d\tau.$$

Для использования полученных результатов необходимо выбрать явную форму оператора модели  $\hat{L}$ .

Средняя эластичность вдоль анкерного участка должна быть практически постоянной. Для этого необходимо предположить, что на контактный провод действуют определённые силы. Предположительно эти силы периодически распределены вдоль анкерного участка, а их величины пропорциональны смещению контактного провода из состояния покоя в точке приложения силы.

Рассматривая простую однопараметрическую модель взаимодействия контактной сети и пантографа можно записать

$$\hat{L} \equiv -\frac{T}{\rho S} \frac{d^2}{dx^2} - \sum_{i=1}^N \frac{\varepsilon_i}{\rho S} \delta(x - x_i),$$

где  $\hat{L}$  – очевидный самосопряжённый оператор;  $x_i, \varepsilon_i, N, T$  – соответственно координаты точек приложения силы, константы пружины, количество действующих сил на анкерный участок, натяжение контактного провода.

Полное модельное уравнение для анкерной секции с учётом использованного метода принимает вид

$$\frac{\partial^2 Y(x, t)}{\partial t^2} - \frac{T}{\rho S} \frac{\partial^2 Y(x, t)}{\partial x^2} - \sum_{i=1}^N \frac{\varepsilon_i}{\rho S} \delta(x - x_i) Y(x, t) = f \delta(x - vt)$$

с граничными условиями  $Y(0, t) = Y(L, t) = 0$ .

**Реализация модели и метода.** Рассматривается задача в следующей физической постановке. К натянутому однострунному проводу длиной  $2L$  с торцевым закреплением прикреплена пружина в средней части. Решение задачи сводится к нахождению собственных частот этой системы. Провод разделён пружиной на две однородные изотропные части. Для анализа колебаний в каждой части применимо волновое уравнение, решение которого с учётом фазовой скорости  $c$  представимо в виде

$$a_n \sin(k_n x) + b_n \cos(k_n x),$$

где  $k_n = \sqrt{\frac{\lambda_n}{c^2}}$ , здесь  $c = \sqrt{\frac{T}{\rho S}}$ .

Коэффициенты волнового уравнения определяются из граничных условий, принимаемых с учётом того, что решение должно быть равно нулю в точках  $x = 0$  и  $x = 2L$ . Так как  $b_n = 0$ , значение  $a_n$  (коэффициент масштабирования) может быть выбрано произвольно, например,  $a_n = 1$ . В тоже время на данном участке выполняется условие

$$a_n \sin(k_n 2L) + b_n \cos(k_n 2L) = 0.$$

Кроме того, в момент приложения силы должны соблюдаться следующие два условия:

$$\sin(k_n L) = a_n \sin(k_n L) + b_n \cos(k_n L);$$

$$k_n(a_n - 1) \cos(k_n L) - k_n b_n \sin(k_n L) = \frac{\varepsilon}{T} \sin(k_n L), \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  – постоянная пружины.

Первое уравнение учитывает непрерывность провода в точке  $x = L$ . Второе уравнение – это условие скачка производной в точке приложения силы. Полученное модельное уравнение обладает свойством интегрирования. Для того чтобы получить уравнение для значений  $k_n$ , необходимо исключить коэффициенты  $a_n$  и  $b_n$  из формулы (2):

$$2 \cos(k_n L) + \frac{\varepsilon}{k_n T} \sin(k_n L) = 0.$$

Это уравнение легко решается численно. После этого наборы собственных частот могут быть найдены следующим образом:

$$\nu_n = \frac{ck_n}{2\pi}.$$

Увеличение числа струн подвески приводит к значительному усложнению уравнения для значений  $k_n$ . Однако его можно записать для любого заданного количества струн. Показатель степени уравнения равен числу струн, а аргумент уравнения находится по выражению

$$2\cos(k_n L) + \frac{\varepsilon}{k_n T} \sin(k_n L).$$

В результате задача нахождения значений  $k_n$  приводится к решению двух довольно простых числовых задач:

- поиску множества корней многочлена  $\{z_\alpha\}$ ;
- решению уравнения

$$2\cos(k_n L) + \frac{\varepsilon}{k_n T} \sin(k_n L) = z_\alpha.$$

Величина  $\varepsilon$  сильно влияет на значения собственных частот и на свойства контактной сети в целом. Её следует выбирать таким образом, чтобы средняя эластичность, рассчитанная с помощью предложенного метода, т. е.  $\bar{\eta} = \frac{1}{\rho S L} \sum_n \frac{1}{\lambda_n}$ , полностью соответствовала экспериментальному значению.

Полученные результаты подтверждены экспериментально для участка токопровода, состоящего из двух секций контактной подвески типа КС-200 со следующими характеристиками:

- длина участка – 130 м;
- натяжение контактного провода – 12 кН;
- фазовая скорость – 106 м/с;
- количество элементарных проводников – 27;
- средняя эластичность – 0,37 мм/Н.

Находилось множество корней  $\{z_\alpha\}$  полиномиального уравнения. Коэффициенты этого уравнения определяются только номерами струн. В рассматриваемом случае это уравнение имеет вид

$$z^{27} - 26z^{25} + 300z^{23} - 2024z^{21} + 8855z^{19} - 26334z^{17} + 54254z^{15} - 77520z^{13} + 75582z^{11} - 48620z^9 + 19448z^7 - 4368z^5 + 455z^3 - 14z = 0.$$

Алгоритмически для нахождения значения  $k_n$  с начальным значением параметра  $\varepsilon$  решается набор уравнений. Затем рассчитывается средняя эластичность. Данная процедура итерационно повторяется до достижения требуемого совпадения между расчётом и экспериментом. Найденное с использованием предложенного метода значение  $\varepsilon = 500$  Н/м, набор собственных частот контактной подвески:  $\nu_1 = 1,64$  Гц,  $\nu_2 = 1,78$  Гц,  $\nu_3 = 2,01$  Гц и т. д.

**Заключение.** В данной статье приведены выражения для волны, возникающей в контактной подвеске при взаимодействии её с пантографом, и для упругости как ряда собственных функций при решении краевой задачи для модельного самосопряжённого оператора. В рамках простой однопараметрической модели взаимодействия контактного провода и пантографа получено уравнение для собственных частот контактной подвески. Предложен метод его решения. На основе полученных результатов можно определить факторы, влияющие на качество токосъёма.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Антонов, Ю. А. К вопросу распространения механических волн по контактному проводу / Ю. А. Антонов, К. К. Ким // Электрификация и организация скоростных и тяжеловесных коридоров на железнодорожном транспорте: Eltrans'2007: материалы Четвёртого междунар. симпозиума, 23-26 октября 2007 г., Санкт-Петербург / Федер. агентство ж.-д. трансп., ПГУПС, ОАО «РЖД»; ред. А. Т. Бурков [и др.]. – СПб.: ПГУПС, 2009. – С. 26-31.
2. Kim K. K., Antonov Y. A. (2008). Models of interacting the contact wire with the pantograph / 16th International Symposium EURNEX-Zel 2008, 4-5th June 2008. Zilina, Slovak Republic. Lectures, NR1.
3. Ким, К. К. Системы электродвижения с использованием магнитного подвеса и сверхпроводимости / К. К. Ким. – М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2007. – 360 с.
4. Ким, К. К. Средства электрических измерений и их поверка / К. К. Ким, Г. Н. Анисимов, А. И. Чураков. – СПб.: Лань, 2021. – 316 с.
5. Метрология, стандартизация, сертификация и электроизмерительная техника / К. К. Ким, Г. Н. Анисимов, В. Ю. Барбарович, Б. Я. Литвинов. – СПб.: ПИТЕР, 2006. – 367 с.
6. Электромагнитные процессы в анизотропно электропроводной жидкости в бегущем магнитном поле / К. И. Ким, К. К. Ким, А. Ю. Панычев, Л. С. Блажко // Бюллетень результатов научных исследований. – 2021. – Вып. 2. – С. 7-14.
7. Ким, К. К. МГД-генераторы на поршневых потоках (MHD-generators on piston flows) / К. К. Ким, К. И. Ким. – М.: Маршрут, 2005. – 300 с.
8. Ким, К. И. Экспертное исследование влияния магнитного поля на неустойчивость Релея-Тейлора / К. И. Ким, К. К. Ким, С. Н. Иванов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № VII-1 (47). – С. 70-74.

Марущенко С. Г., Ненюк В. В.  
S. G. Marushchenko, V. V. Nenuyk

## ПРИМЕНЕНИЕ АВТОНОМНОГО ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ПИКОВОЙ НАГРУЗКИ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ СЕТЬ

### APPLICATION OF THE OFF-LINE POWER SUPPLY SOURCE FOR REDUCING ELECTRICAL NETWORK PEAK LOAD

**Марущенко Сергей Григорьевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная электроника» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: sir\_grig@mail.ru.

**Sergey G. Marushchenko** – PhD in Engineering, Associate Professor, Industrial Electronics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: sir\_grig@mail.ru.

**Ненюк Вероника Владиславовна** – магистр кафедры «Промышленная электроника» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: veronikasuper1@mail.ru.

**Veronica V. Nenuyk** – Master's Degree Student, Industrial Electronics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: veronikasuper1@mail.ru.

**Аннотация.** Данная работа посвящена разработке электронного устройства для снижения пиковой нагрузки на электрическую сеть. Описываются проблема неполного покрытия пиковых нагрузок и её последствия для потребителей электроэнергии. Приведены результаты экспериментального исследования качества электроэнергии в жилом доме для оценки масштаба данной проблемы. Предлагается метод снижения, распределения пиковой нагрузки на сеть и улучшения качества электроэнергии с помощью электронного устройства, включающего в себя химический накопитель электроэнергии. Описаны основные функции и возможности устройства, и представлена его структурная и функциональная схема. В процессе исследования была разработана принципиальная схема устройства и составлен перечень компонентов. Продемонстрирована математическая модель разрабатываемого устройства, сделанная в среде MATLAB Simulink. С помощью моделирования были исследованы основные режимы работы, получены энергетические характеристики, позволяющие оценить эффективность предлагаемого метода снижения пиковых нагрузок на электрическую сеть. Представлен обзор аналогов устройства. Также был проведён технико-экономический расчёт для оценки перспективности использования предлагаемого устройства.

**Summary.** This work is devoted to the development of an electronic device for reducing the peak load on the electrical network. The incomplete coverage of peak load problem and its consequences for electricity consumers are described. The results of the electric power quality experimental research in a residential building are presented to estimate the size of this problem. The method of the network peak-load reducing and redistribution, and enhancement of electric power quality using an electronic device that includes a chemical energy storage device is proposed. The main functions and capabilities of the device are described and its structural and functional schemes are presented. The device schematic diagram was developed and a list of components was compiled in the course of work. The mathematical model of required device created in the MATLAB Simulink environment is presented. The main operating modes were analyzed and the energy characteristics were obtained with modeling, which allow us to evaluate the effectiveness of the proposed method of reducing the electrical network peak load. An overview of the device's analogs is presented. A technical and economic calculation also was performed to estimate the prospects of the proposed device use.

**Ключевые слова:** пиковая нагрузка, качество электроэнергии, управление энергопотреблением на стороне потребителя, накопление электроэнергии, преобразование электроэнергии, математическое моделирование.

**Key words:** peak load, electric power quality, demand-side management, electric power accumulation, electric power conversion, mathematical modeling.

**Введение.** В настоящее время в России и мире в энергетике существует проблема покрытия пиковых нагрузок на электрическую сеть, возникающих в определённое время суток.

Одним из приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в РФ является повышение эффективности и надёжности энергосистемы, поэтому необходимо внедрять передовые методы и технологии для решения данной проблемы.

Нагрузка на электрическую сеть может сильно изменяться в зависимости от времени суток или же дня недели. В будние дни работают предприятия, в жилых домах потребители пользуются бытовыми электроприборами, вследствие чего возникают пиковые нагрузки на сеть. Ночью большинство предприятий не работает, люди спят и нагрузка снижается. Снижается она и в выходные дни.

На рис. 1 представлен график потребления и генерации в течение недели [17].

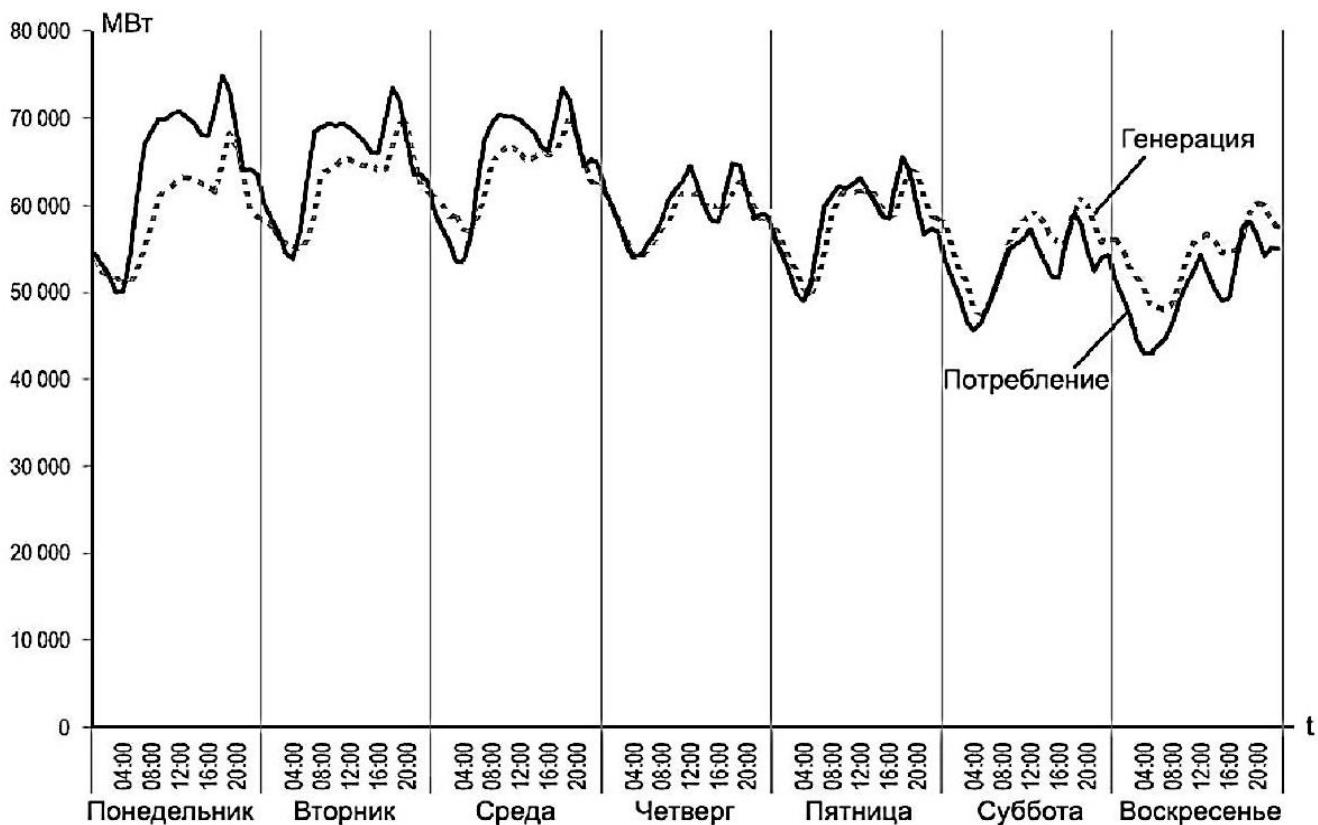


Рис. 1. График потребления и генерации

На графике можно выделить основные пики нагрузки – утренний и вечерний.

Утренний пик возникает из-за начала работы предприятий, которые включают оборудование и освещение, а также из-за включения электроприборов в жилом секторе, когда люди собираются на работу/учёбу. Вечерний возникает, когда люди массово возвращаются в свои дома и начинают готовить ужин, смотреть телевизор, стирать вещи и т. п.

Когда нагрузка превышает генерацию, напряжение в сети может заметно снижаться.

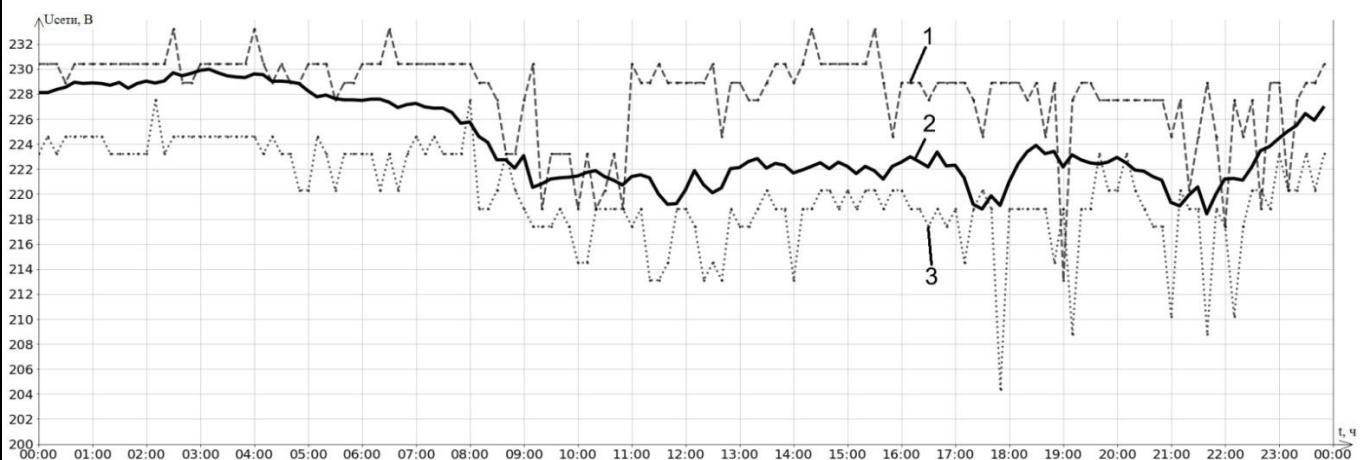
Снижение напряжения пагубно влияет на пусковые и номинальные характеристики электродвигателей и компрессоров [2], что приводит к их ускоренному износу.

Из-за снижения напряжения уменьшается интенсивность свечения ламп накаливания и выделения тепла от электронагревателей [5].

Смещение основных пиков нагрузки (утреннего и вечернего) на электрическую сеть с дневного времени на ночное позволяет сгладить суточные графики потребления [9] и разгрузить генераторы и подстанции. Снизить нагрузки также помогает распределённое производство и хранение энергии, использующее малые генераторы и накопители энергии [16].

**Исследование качества электроэнергии.** Для оценки того, насколько сильно некомпенсированная пиковая нагрузка влияет на качество электроэнергии, в течение месяца собирались данные о значениях сетевого напряжения в отдельно взятой квартире.

Измерения производились с помощью Smart UPS. Значения напряжения измерялись каждые 10 минут и передавались на ПК через COM-порт. Были выбраны суточные графики буднего и выходного дня, и рассчитан усреднённый график по всем данным за месяц (см. рис. 2).



1 – в выходной день; 2 – усреднённое значение; 3 – в будний день

Рис. 2. Суточные графики напряжения в сети

Горизонтальные пунктирные линии изображают номинальное сетевое напряжение 230 В и его допустимое падение на 10 %, заданные ГОСТ 29322-2014 [3] и ГОСТ 32144-2013 [4].

Суточный график выходного дня можно считать практически идеальным, т. к. напряжение большую часть суток близко к номинальному. В будний день напряжение значительно меньше, присутствуют недопустимые провалы напряжения.

Во всех случаях днём напряжение ниже, чем ночью.

Самые заметные провалы напряжения (с 8:00 до 11:00 и с 18:00 до 23:00) совпадают с утренним и вечерним пиками нагрузки.

Измерения сетевого напряжения производились в районе, находящемся близко к электростанции, но, тем не менее, присутствуют довольно сильные просадки напряжения.

В Российской Федерации из-за больших расстояний потребители часто могут находиться в сотнях километрах от электростанции, поэтому проблема пониженного напряжения из-за неполного покрытия пиков нагрузок стоит особенно остро. Из этих наблюдений следует вывод, что графики нагрузки необходимо сглаживать и смещать в непиковые часы.

**Предлагаемое решение.** Предлагаемое устройство объединяет два метода сглаживания нагрузок на электросеть: смещение графиков нагрузки и накопление электроэнергии.

Принцип работы следующий: ночью входное напряжение сети подходит к выходу системы через сетевой фильтр и питает потребителей. Одновременно через выпрямитель заряжается накопитель, из которого в дневное время будет браться электроэнергия.

Днём накопленная энергия расходуется на питание потребителей. Напряжение постоянного тока накопителя преобразуется инвертором в переменное. Потребление от сети прекращается до тех пор, пока не кончится энергия накопителя или установленное время.

Таким образом, основное потребление энергии происходит ночью, а днём достигает минимума, обеспечивая более равномерное распределение нагрузки на сеть в течение дня.

Структурная схема устройства представлена на рис. 3.

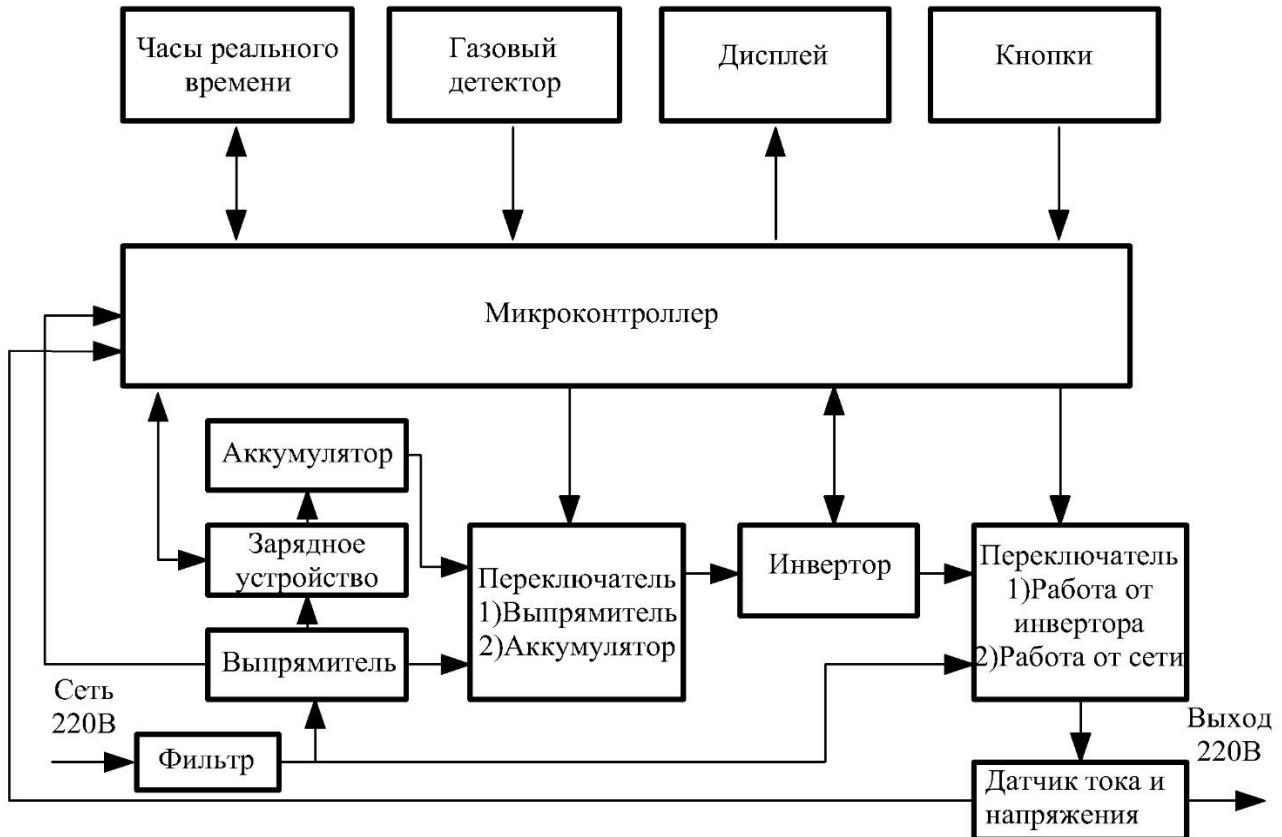


Рис. 3. Структурная схема устройства

В качестве накопителя выбран электрохимический накопитель энергии (аккумулятор).

Использование электрохимического накопителя позволит легко масштабировать устройство в зависимости от мощности потребителей или же получать электроэнергию не только из основной сети, но и с побочных электростанций, использующих возобновляемые источники энергии, получающих всё большее распространение [7].

С принятием Федерального закона № 471-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон “Об электроэнергетике” в части развития микрогенерации» [8] у физических лиц появилась возможность продавать другим потребителям излишки электричества. Это может дать ещё больший эффект снижения пиковых нагрузок и экономию электроэнергии.

В качестве накопителей использованы свинцово-кислотные аккумуляторы, т. к. у них наилучшее соотношение ёмкости, количества циклов заряда/разряда и цены [10].

В будущем их можно заменить литиевыми или графеновыми [1] с лучшими характеристиками, что позволит снизить габариты и срок окупаемости устройства.

На основе структурной схемы устройства была разработана функциональная (см. рис. 4).

Основные функциональные блоки устройства:

1. Аккумуляторы соединены последовательно для получения напряжения 48 В.
2. Контроллер заряда LT8491 реализует алгоритм заряда CC/CV, управляет и передаёт данные о состоянии батарей по интерфейсу I2C.

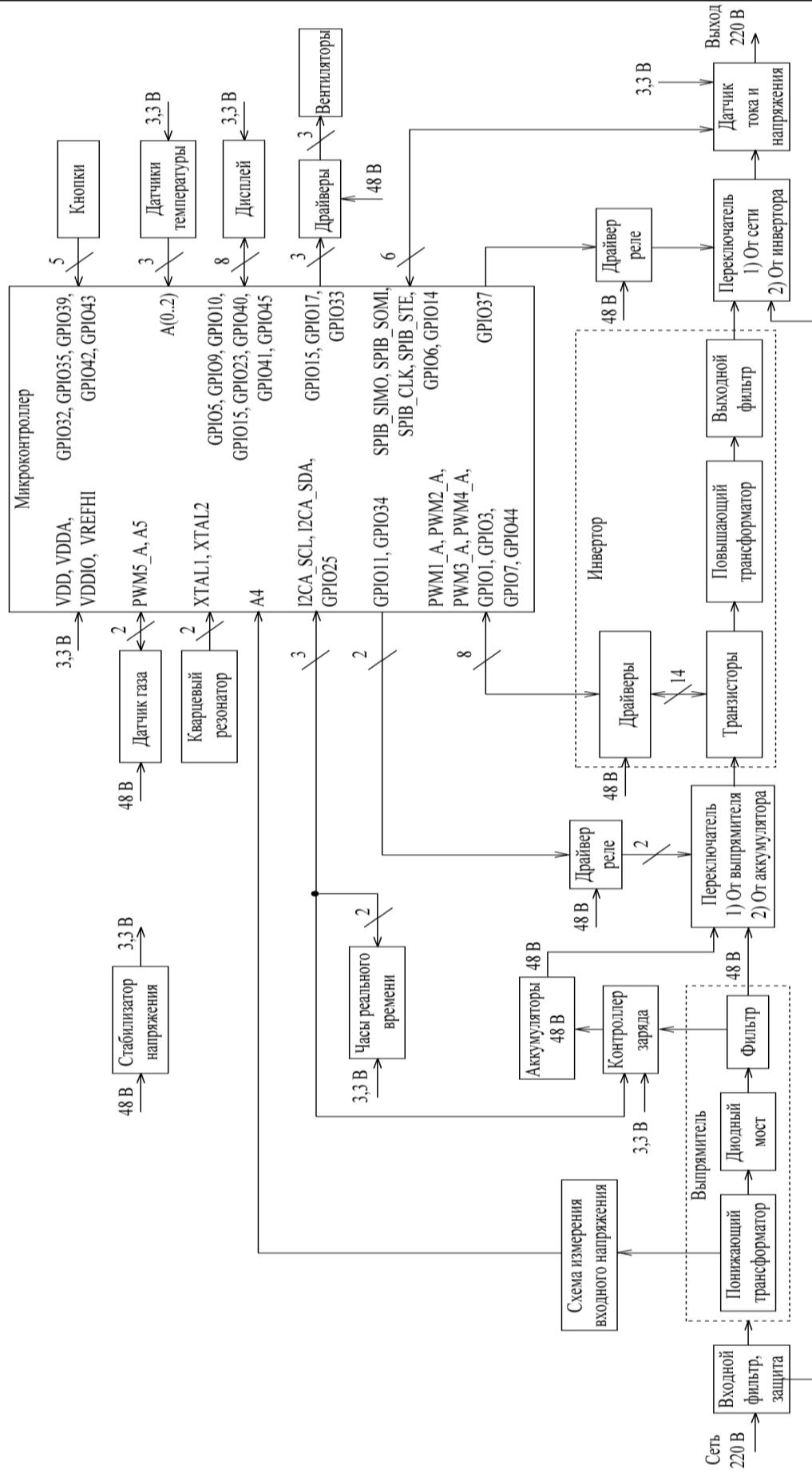


Рис. 4. Функциональная схема устройства

Полезной функцией является лёгкая программная настройка под зарядку свинцово-кислотных или литиевых аккумуляторов, что позволяет выбирать и покупать подходящие по ёмкости, габаритам и стоимости аккумуляторы. Также присутствует функция поиска точки максимальной мощности солнечной батареи, подключённой к зарядному устройству.

3. Мостовой выпрямитель с понижающим трансформатором необходим для получения постоянного напряжения для заряда аккумуляторов и работы инвертора в режиме двойного преобразования.

4. Датчик газа MQ-8 отслеживает уровень концентрации водорода, выделяемого аккумуляторами в процессе эксплуатации, для соблюдения правильного режима зарядки и предотвращения возможного возгорания [10]. Он имеет аналоговый выход, подключённый к АЦП микроконтроллера. Подаваемым на нагреватель датчика напряжением управляет микроконтроллер (МК).

5. Входной LC-фильтр подавляет коммутационные помехи, возникающие при работе выпрямителя, инвертора и зарядного устройства.

6. В качестве датчика тока и напряжения используется микросхема ADE7953. Она измеряет значения тока и напряжения и потребляемую энергию с помощью измерительных трансформаторов и передаёт данные по интерфейсу SPI. К МК подключается выход перехода через ноль, что позволяет синхронизировать инвертор с сетью.

7. Трёхуровневый инвертор напряжения преобразует напряжение аккумуляторов в переменное, которое увеличивается до 220 В повышающим трансформатором и сглаживается выходным LC-фильтром до синусоидального.

8. Реле переключают источники питания нагрузки (сеть или инвертор) и инвертора (выпрямитель или аккумулятор). Для управления ими используются драйверы реле.

9. Микроконтроллер управляет инвертором, контроллером заряда и переключающими устройствами, осуществляет сбор и мониторинг данных с датчиков. Выбран микроконтроллер TMS320F280021 с большим количеством линий ввода/вывода и периферии.

10. Часы реального времени необходимы для отсчёта времени переключения режимов работы устройства. Связь с МК производится по интерфейсу I2C.

11. LCD-экран используется для отображения текущих показателей и меню настроек.

12. Кнопки нужны для управления устройством и навигацией по меню настроек.

13. Датчиками температуры измеряется температура элементов устройства. В зависимости от неё и токов регулируется скорость вентиляторов.

14. Стабилизатор напряжения на 3,3 В нужен для питания МК, датчиков и т. д.

**Моделирование работы устройства.** Для оценки энергетических показателей и эффективности смещения графиков нагрузки создана модель устройства в среде MATLAB Simulink (см. рис. 5). Подсистемы показаны более укрупнённо на рис. 6.

Она состоит из электрической сети с внутренним сопротивлением, мостового выпрямителя, аккумулятора с зарядным устройством, трёхуровневого инвертора напряжения, динамической нагрузки, измерительных и переключающих устройств.

В динамической нагрузке был задан суточный график нагрузки (см. рис. 7) [6].

Для электросчётчика задан тариф, дифференцированный по двум зонам суток. В Хабаровском крае цена на дневной и ночной тариф составляет 5,44 и 1,49 р. соответственно [15]. Для расчёта потребления взяты данные о потреблении населением электроэнергии в Хабаровском крае, составившие  $E = 1739,5$  Гигаватт-часов [13]. Население края составляет  $q = 1\ 315\ 643$  чел. [12]. Тогда потребление электроэнергии на человека в день составит

$$E_{\text{чел}} = \frac{E}{q \cdot 365},$$

$$E_{\text{чел}} = \frac{1739,5 \cdot 10^9}{1\ 315\ 643 \cdot 365} = 3622 \text{ Вт} \cdot \text{ч}.$$

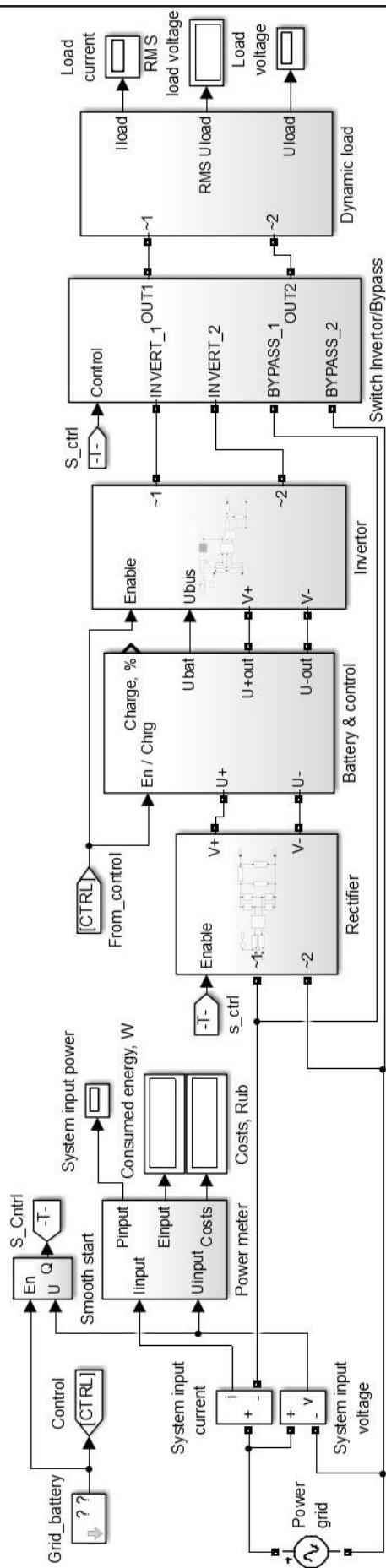


Рис. 5. Общий вид модели

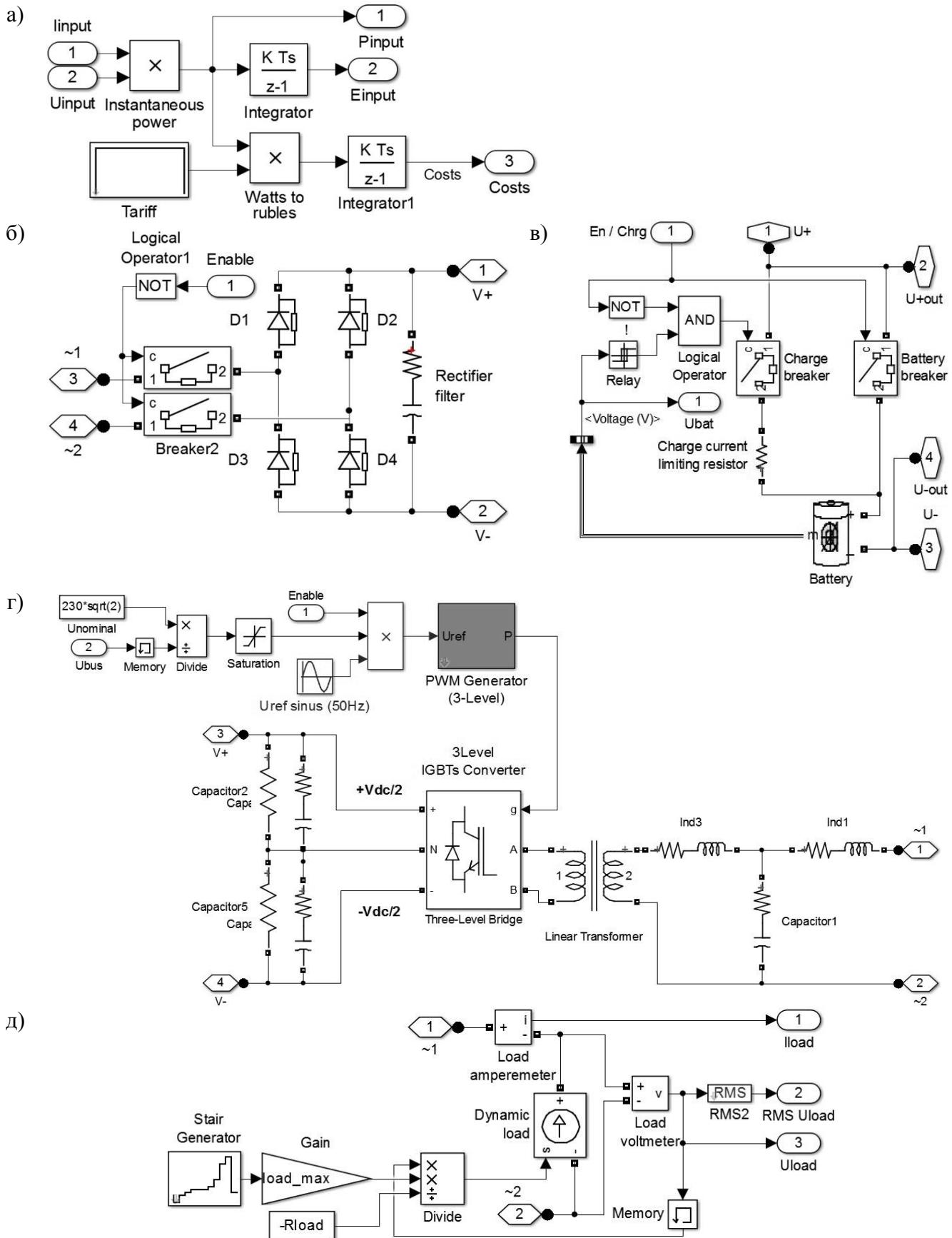


Рис. 6. Подсистемы модели: а – электросчётчик; б – мостовой выпрямитель;  
в – зарядное устройство; г – трёхуровневый инвертор напряжения; д – динамическая нагрузка

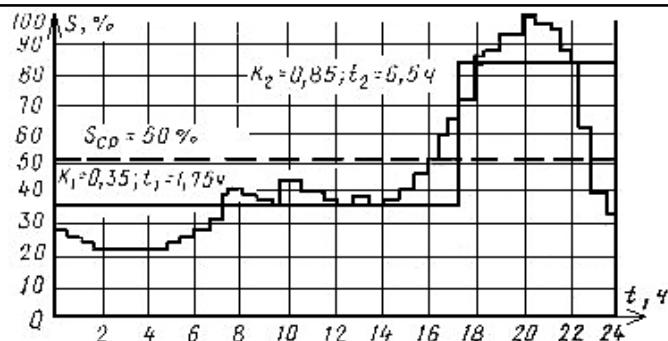


Рис. 7. Суточный график нагрузки трансформаторных подстанций, питающих жилые дома с газовыми плитами и общественные здания

Было проведено моделирование с различными нагрузками: для маломощных потребителей, тратящих около 3,6 кВт·ч в сутки, и для более мощных, тратящих 10 кВт·ч в сутки, с использованием и без использования устройства.

Результаты моделирования сведены в табл. 1, 2, суточные графики мощности, потребляемой устройством из сети, показаны на рис. 8.

Таблица 1

Результаты моделирования устройства для маломощного потребителя

Тип подключения	Общая энергия, Вт·ч	Средняя мощность, ВА	Затраты, р.
Без устройства	4449,7	8390	15,61
С устройством	1250,1	5450	1,89
Разница	3199,6	2940	13,72

Таблица 2

Результаты моделирования устройства для мощного потребителя

Тип подключения	Общая энергия, Вт·ч	Средняя мощность, ВА	Затраты, р.
Без устройства	10 164,86	1169	34,35
С устройством	2783,01	8220	4,16
Разница	7381,85	3470	30,19

Из результатов моделирования видно, что использование накопителя энергии позволяет практически полностью сместить потребление со дня в ночь, что способствует сглаживанию и уменьшению пиков нагрузки. При использовании достаточно энергоёмкого накопителя уменьшается общее и среднее потребление из сети.

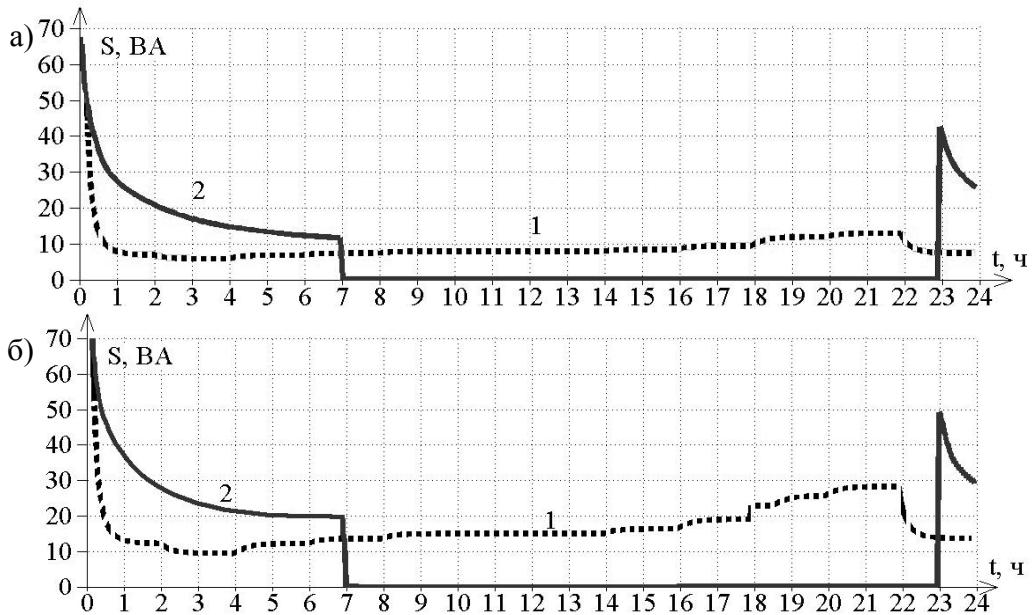
**Технико-экономический расчёт.** По результатам моделирования маломощный потребитель будет экономить 13,72 рубля в день и 5007,8 рублей в год. Из составленного списка комплектующих стоимость устройства составит 49 455 руб.

Мощный потребитель экономит 30,19 рублей в день и 11 019,35 рублей в год. Стоимость устройства с более мощными комплектующими составит 63 375 руб.

Из графика окупаемости (см. рис. 9) видно, что срок окупаемости для маломощного потребителя составит 10 лет, для мощного – 6 лет. Отсюда следует вывод, что большую пользу и выгоду от устройства получат потребители с более мощными нагрузками.

**Обзор аналогов.** Для оценки спроса на подобные системы снижения пиковых нагрузок и сравнения их характеристик был сделан обзор аналогов разрабатываемого устройства.

Большинство систем накопления энергии (СНЭ) предназначено для интеграции возобновляемых источников энергии с энергосистемой, сглаживания пиков потребления мощности и резервирования энергии.



1 – без использования устройства; 2 – с использованием устройства

Рис. 8. Суточные графики нагрузки: а – маломощного потребителя; б – мощного потребителя

В качестве примера рассмотрим системы накопления энергии на свинцово-кислотных аккумуляторах (СНЭ) и на литий-титанатных аккумуляторах – UniEnergy LTO [14; 19].

СНЭ на суперконденсаторах представлены менее широко из-за ограниченной области применения. Можно выделить накопители суперконденсаторные буферные НКСБ-9-360 [11].

В России СНЭ для частных домохозяйств часто собираются на заказ из отдельных компонентов. Системы «всё в одном» выпускаются в основном зарубежными фирмами.

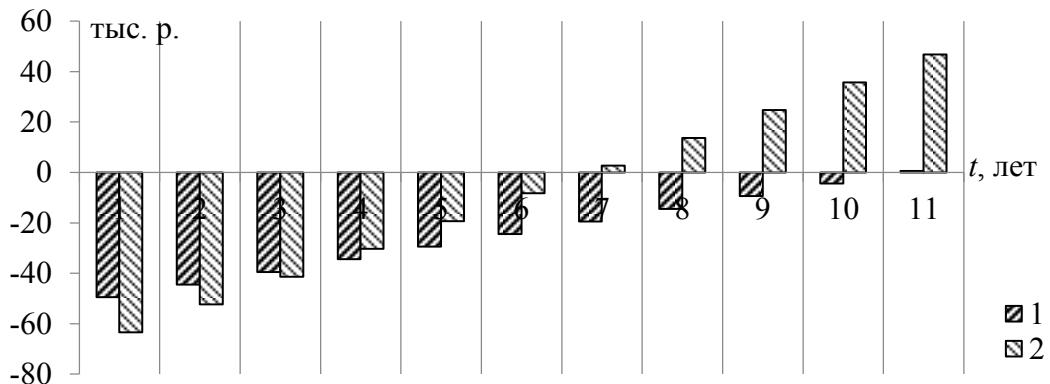


Рис. 9. График окупаемости проекта:

1 – для маломощного потребителя; 2 – для мощного потребителя

В качестве примера рассмотрим Tesla Powerwall 2.0 [18], в состав которого входят литиевые аккумуляторы, зарядный контроллер и инвертор напряжения.

Для удобства сравнения характеристики аналогов сведены в табл. 3.

Рынок систем накопления энергии имеет хорошие перспективы развития как в России, так и за рубежом. Отечественные системы нацелены в основном на добавление дополнительных мощностей и бесперебойное питание для крупных потребителей. За рубежом производятся системы, предназначенные для более равномерного распределения и снижения нагрузки от частных хозяйств за счёт накопления и генерации энергии.

Сравнение аналогов разрабатываемого устройства

Характеристика	СНЭ	UniEnergy	НКСБ	Powerwall	Разрабатываемое устройство
Напряжение, В	450-700	204-300	360	240	220
Энергоёмкость, кВт·ч	40-210	44,2	0,1	13,5	3,6-10
Мощность, кВт	100-400	288	100	5	3,5
Габариты, м	$6 \times 2,4 \times 2,6$	$0,7 \times 0,8 \times 1,7$	$0,6 \times 0,6 \times 0,9$	$0,8 \times 0,1 \times 1,1$	$1,1 \times 0,5 \times 0,6$
Доступность в РФ	Да	Да	Да	Нет	Да

**Заключение.** В данной статье была исследована проблема пиковых нагрузок на электрическую сеть и разработано электронное устройство для снижения пиковых нагрузок.

В процессе работы были выполнены:

- экспериментальные измерения значений и частоты сетевого напряжения в жилом секторе для оценки влияния на качество поставляемой электроэнергии нескомпенсированных пиковых нагрузок на электрическую сеть;

- структурная и функциональная схемы устройства;

- математическая модель устройства в среде MATLAB Simulink для проверки эффективности предлагаемого метода снижения пиковых нагрузок;

- принципиальная электрическая схема устройства и перечень элементов.

В результате было подтверждено, что пиковые нагрузки влияют на качество поставляемой электроэнергии, в первую очередь на амплитуду сетевого напряжения. Это проявлялось в снижении общего уровня напряжения в течение дня и в недопустимых провалах напряжения в пиковые часы.

Исследование математической модели подтвердило эффективность метода смещения и сглаживания пиковых нагрузок на сеть.

Для схемы устройства были выбраны современные комплектующие и схемотехнические решения.

При использовании предлагаемого устройства могут быть достигнуты следующие положительные эффекты:

- снижение максимальной пиковой нагрузки на сеть при массовом внедрении;
- повышение качества и стабильности поставляемой электроэнергии и, как следствие, увеличение сроков службы электроприёмников;
- экономия «на ночном тарифе» за счёт накопления электроэнергии в период её низкой стоимости (ночью) и выдачи в период высокой стоимости (днём);
- возможность использования в качестве источника бесперебойного питания;
- возможность накопления электроэнергии из возобновляемых источников (солнечных панелей, ветряков) или бензиновых и дизельных генераторов.

Устройство легко масштабируется под нужды потребителя: можно изменять ёмкость накопителя энергии, подключать различные источники электроэнергии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Восстановленный оксид графена в качестве защитного слоя токового коллектора катода литий-ионного аккумулятора / Д. Ю. Корнилов [и др.] // Электрохимия. – 2017. – Т. 53. – № 6. – С. 701-705.
2. Горицкий, В. В. Влияние качества электроэнергии на работу асинхронных электродвигателей / В. В. Горицкий, Т. В. Алферова // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления: материалы XVIII междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных, 26-67 апреля 2018 г. / Министерство образования Респ. Беларусь, Гомель. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2018. – С. 220-223.
3. ГОСТ 29322-2014. Напряжения стандартные = Standard voltages: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утверждён и введён в действие Приказом Федерального агентства по тех-

- ническому регулированию и метрологии от 25 ноября 2014 г. № 1745-ст: введён взамен ГОСТ 29322-92: дата введения 2015-01-10 / подготовлен Открытым акционерным обществом «Всероссийский научно-исследовательский институт сертификации» (ОАО «ВНИИС»). – М.: Стандартинформ, 2015. – 10 с.
4. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения = Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утверждён и введён в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 июля 2013 г. № 400-ст: введён впервые: дата введения 2014-07-01 / разработан ООО «ЛИНВИТ» и Техническим комитетом по стандартизации ТК 30 «Электромагнитная совместимость технических средств». – М.: Стандартинформ, 2014. – 20 с.
5. Ершов, С. В. Анализ влияния провалов напряжения на показатели работы систем электроснабжения / С. В. Ершов, Б. А. Жабин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2013. – № 12-2. – С. 62-72.
- 10 Кривецкий, А. Заряд кислотных аккумуляторов / А. Кривецкий // Компоненты и Технологии. – 2004. – № 39. – С. 62-64.
6. Лордкипанидзе, В. Д. Пособие по проектированию городских и поселковых электрических сетей (к ВСН 97-83) / В. Д. Лордкипанидзе, И. З. Рейн, В. М. Подольный. – М.: Стройиздат, 1987. – 208 с.
7. Громов, А. А. Системы электроснабжения на базе автономных установок / А. А. Громов, В. Л. Колякин, А. С. Толочкин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2019. – № III-1 (39). – С. 4-9.
8. О внесении изменений в Федеральный закон «Об электроэнергетике» в части развития микрогенерации: Федер. закон от 27 дек. 2019 г. № 471-ФЗ // Собрание законодательства РФ. – 2019. – № 49. – Ст. 6964.
9. Степанов, В. С. Управление электропотреблением путём деформации графиков нагрузки потребителей / В. С. Степанов, К. В. Суслов, Е. В. Козлова // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2012. – № 9. – С. 231-235.
10. Ягнятинский, В. М. Аккумуляторные батареи. Краткий справочник / В. М. Ягнятинский, Н. И. Курзуков. – М.: Книжное изд-во «За рулём», 2008. – 88 с.
11. Накопители суперконденсаторные буферные // TitanPS.ru: Titan Power Solution. – URL: <https://titanps.ru/catalog/titan/nskb> (дата обращения: 09.07.2021). – Текст: электронный.
12. Население. Численность и состав населения // HabStat.gsk.ru: Хабаровскстат. – URL: <https://habstat.gks.ru/folder/25028> (дата обращения: 11.07.2021). – Текст: электронный.
13. Потребление электроэнергии в Российской Федерации // FedStat.ru: ЕМИСС Государственная статистика. – URL: <https://www.fedstat.ru/indicator/43277> (дата обращения: 10.07.2021). – Текст: электронный.
14. Системы накопления энергии (СНЭ) // SystemCT.ru: ООО «Системы постоянного тока». – URL: [https://www.systemct.ru/product/product\\_id/19](https://www.systemct.ru/product/product_id/19) (дата обращения: 08.07.2021). – Текст: электронный.
15. Тарифы для населения: 2021 г. (Хабаровский край) // DVEC.ru: ДЭК Хабаровскэнергосбыт. – URL: [https://www.dvec.ru/khabsbyt/private\\_clients/tariffs/](https://www.dvec.ru/khabsbyt/private_clients/tariffs/) (дата обращения: 11.07.2021). – Текст: электронный.
16. I. Atzeni, L. G. Ordóñez, G. Scutari, D. P. Palomar, J. R. Fonollosa. Demand-Side Management via Distributed Energy Generation and Storage Optimization // IEEE Transactions on Smart Grid. 2012. Vol. 2. P. 866-876.
17. RTE Library // Services-RTE.com: Le réseau de transport d'électricité. – URL: <https://www.services-rte.com/en/the-library.html> (дата обращения: 12.07.2021). – Текст: электронный.
18. Tesla Powerwall // Tesla.com. – URL: <https://www.tesla.com/powerwall> (дата обращения: 09.04.2021). – Текст: электронный.
19. UniPower LTO // Unicont.com: Юниконт СПб. – URL: <https://unicont.com/energy/ob/unipower-lto> (дата обращения: 11.07.2021). – Текст: электронный.



Младова Т. А., Муллер Н. В.  
T. A. Mladova, N. V. Muller

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫМИ РИСКАМИ

### THEORETICAL FOUNDATIONS OF MATHEMATICAL MODELING AND PROFESSIONAL RISK MANAGEMENT

**Младова Татьяна Александровна** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Кадастры и техносферная безопасность» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: vip.mladova@mail.ru.

**Tatyana A. Mladova** – PhD in Engineering, Associate Professor, of Cadasters and Technosphere Security Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: vip.mladova@mail.ru.

**Муллер Нина Васильевна** – кандидат технических наук, доцент, и.о. заведующего кафедрой «Кадастры и техносферная безопасность» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: only\_nina@mail.ru.

**Nina V. Muller** – PhD in Engineering, Associate Professor, Head of Cadasters and Technosphere Security Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). Email: only\_nina@mail.ru.

**Аннотация.** В статье проведён анализ существующих моделей определения индивидуального профессионального риска, предложена методика оценки риска утраты здоровья для обоснования мер профилактической направленности. Определение риска является одной из основных задач в управлении охраной труда. В соответствии с изменениями в Трудовом кодексе РФ, на каждом предприятии будет создана структура по управлению индивидуальными профессиональными рисками. Единой методики по управлению рисками нет, но будут предложены способы определения риска на рабочих местах. Данные методы оценки риска утраты здоровья необходимы для обоснования мер профилактической направленности.

**Summary.** The article analyzes existing models for determining individual occupational risk, suggests a methodology for assessing the risk of loss of health to justify preventive measures. Risk determination is one of the main tasks in occupational health and safety management. In accordance with the changes in the Labor Code, a structure for managing individual occupational risks will be created at each enterprise. There is no single methodology for risk management, but methods for determining risk in the workplace will be proposed. These methods of assessing the risk of loss of health are necessary to justify preventive measures.

**Ключевые слова:** методы, риски, управление, оценка, опасности, ущерб, оценка чувствительности, уровень заболеваемости, коэффициент.

**Key words:** methods, risks, management, assessment, hazards, damage, sensitivity assessment, morbidity rate, coefficient.

УДК 331.452

По данным Министерства здравоохранения Российской Федерации, с каждым годом численность персонала, работающего в условиях, не соответствующих санитарно-гигиеническим нормам, увеличивается, как следствие, возникает рост числа профессиональных заболеваний. «Важными аспектами ... являются дееспособная система менеджмента качества и адекватная оценка её результативности» [1]. Однако, несмотря на то что опасные факторы обладают потенциалом причинения вреда, при наличии соответствующих мер контроля они не представляют опасности. Управление рисками состоит в том, чтобы обеспечить наличие соответствующих мер контроля, предотвращающих высвобождение опасных факторов. Кроме того, необходимо отметить, что вред может принимать различные формы: вред, причиняемый людям в виде травм, болезней,

смерти или психологической травмы; вред, причиняемый имуществу и оборудованию; вред окружающей среде; вред, причиняемый финансам и репутации посредством штрафов, судебного следствия либо тюремного заключения [7; 8; 9]. Применение методов определения риска является следующей ступенью после определения опасных факторов, обладающих потенциалом причинения вреда, определения источников опасности, способствующих высвобождению опасных факторов, приводящему к нежелательным последствиям [5; 6; 7]. Единой методики управления рисками нет, но стандартный процесс управления рисками включает три этапа:

1. определение опасных факторов в осуществляющейся деятельности;
2. оценку рисков, связанных с осуществляющейся деятельностью;
3. разработку мер контроля для устранения, смягчения последствий.

Первого марта 2022 года вступают в силу изменения в Трудовом кодексе РФ. Задача изменений в области организационных функций – идентификация рабочего места с учётом реализации оценки профессиональных рисков в соответствии со спецификой трудовой деятельности. Рекомендованы инструментальные методы исследования для определения параметров и способы сведения их до минимальных значений. Предложены методики оценки профессиональных рисков и мероприятия по управлению профессиональными рисками. Данный проект вступил в силу 01 марта 2022 года. В работе были систематизированы существующие модели, и работодатель может выбрать для проведения оценки один из 13 методов, методики разбиты на четыре группы (см. рис. 1).

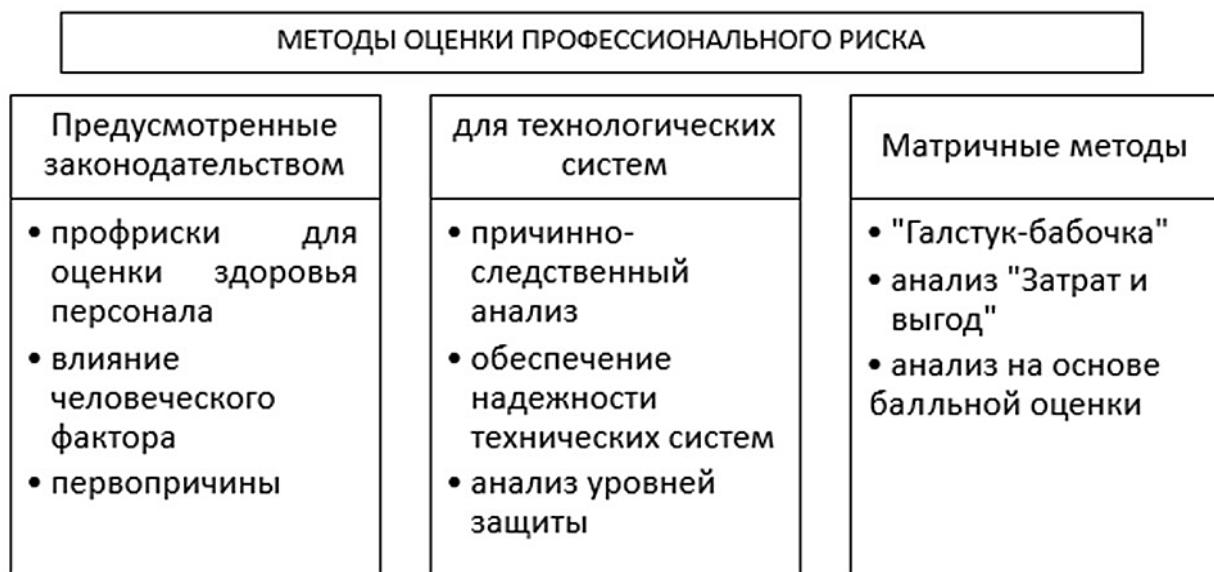


Рис. 1. Методы оценки индивидуального профессионального риска

Для определения риска с одним критерием необходим более точный анализ влияющего фактора [15; 16]. Уравнение риска с одним влияющим фактором можно представить в таком виде:

$$Risk_i = b_i \cdot \bar{F},$$

где  $Risk_i$  – риск причинения вреда здоровью  $i$ -го фактора;  $\bar{F}$  – критерий оценки фактора;  $b_i$  – корреляционный коэффициент, зависящий от фактора.

Необходимо определить причинно-следственную связь между риском и фактором. Прогнозную оценку риска  $b_i$  в зависимости от действующего фактора за  $T$  лет определим применения концепцию целевого программирования. Зависимость уровня заболеваемости персонала от действия вредных производственных факторов выразим следующим образом:

$$\min \sum_{t=1}^T (n_t + p_t).$$

Введём следующие допущения:

$$Risk = b_i * F_t + n_t - p_t$$

$$\text{при } n_t \geq 0, t = 1.$$

Таким образом, т. к. для специалистов охраны труда реализация оценки риска утраты здоровья на предприятии вызывает определённые трудности, то в данной работе был разработан программный продукт, реализующий данную оценку риска [10; 12; 14].

Для определения рабочего места необходимо идентифицировать предприятие и присвоить ему код. Введём показатель идентификации предприятия, скорректированный с учётом травматизма, назовём его IP, расчёт производится с помощью «Линейной модели регрессии».

Показатель IP может быть рассчитан при помощи различных характеристик:

- коэффициента индивидуального профессионального риска;
- количественной оценки нарушений трудовой дисциплины, величины производственного травматизма;
- количества работающих на предприятии;
- количества травм на предприятии.

В качестве примера произвели расчёт для персонала машиностроительного предприятия.

Отрасль выбираем «строительство», класс профессионального риска – 8, предприятие «ППП», рабочее место – инженер ОТ.

Данный код содержит в себе информацию, идентифицирующую именно данное рабочее место на исследуемом предприятии [2; 3; 4].

Индивидуальный профессиональный риск работника зависит от условий труда, возраста работника, трудового стажа работника во вредных и (или) опасных условиях труда, состояния травматизма на рабочем месте.

Значимость параметров мы принимаем исходя из информации, взятой из доклада ФСС, по данным предприятий города.

По обобщённым данным, вклад в возникновение риска, влияющего на здоровье человека, вносят: условия труда (54 %), состояние здоровья (38 %), стаж (4 %), возраст (3 %), пол (1 %).

Изучив характеристику отдела информатизации процессов управления, видим, что из-за присутствия в отделе большого количества вычислительной техники и довольно длительного нахождения сотрудников в отделе подразделение является одним из наиболее опасных для здоровья. В связи с этим мы провели оценку риска утраты здоровья для данного подразделения.

Нежелательное событие, к которому приводит высвобождение опасного фактора на рабочем месте, происходит нечасто, можно выразить их в виде ординарного потока случайных событий. Тогда оценка частоты события для  $i$ -го рабочего места определяется по формуле

$$\lambda_i = \frac{n_i}{t_i} * 1/T.$$

Оценку частоты неблагоприятных событий для персонала, находящегося под воздействием идентичных условий труда (смертельные случаи) определим по формуле

$$\lambda_i = \frac{n}{N_p * T'}$$

где  $T$  – средняя наработка на одного работающего за один год;  $n$  – суммарное число событий за суммарную наработку всех работающих ( $N_p$ ), рассчитывается по формуле

$$n = \sum_{i=1}^{N_p} n_i.$$

Оценку риска утраты здоровья отдела информатизации процессов управления проводили по данным, полученным за последние 5 лет. На рис. 2 представлены данные количества работников и влияние вредных и опасных факторов на рабочих местах.

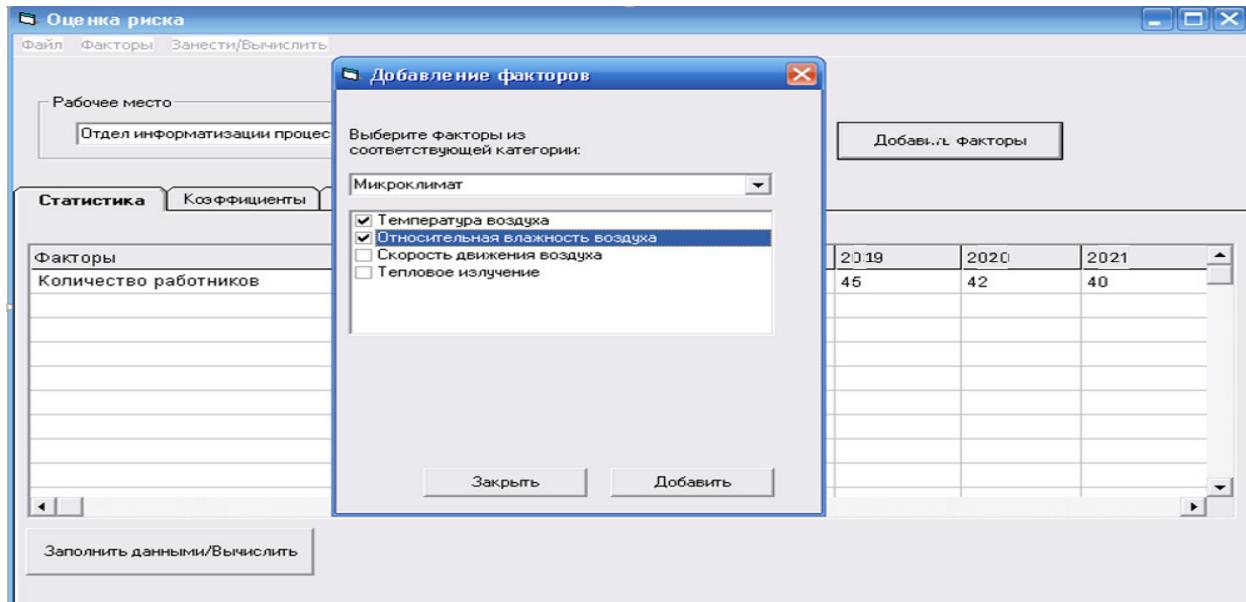


Рис. 2. Количество работников за 2017–2021 года

После чего вводим данные о количестве работников, заболевших от выбранных нами факторов в рассматриваемый период. Для выбранных факторов указываем фактический уровень концентрации, который был на данном рабочем месте (см. рис. 3).

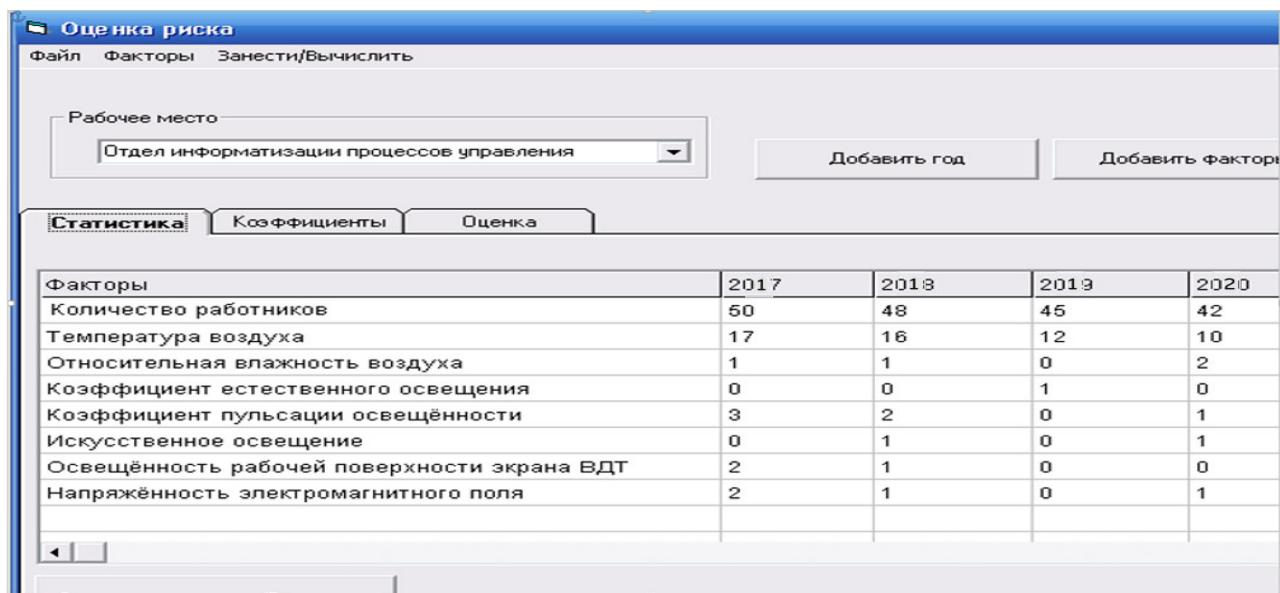


Рис. 3. Количество заболевших от выбранных факторов за 2017-2021 года

В разделе «Оценка» рассчитываем риск заболевания для каждого фактора, т. е. фактическую оценку. Проведённая оценка риска утраты здоровья показывает, что в будущем году около 26 % (фактическая оценка) человек будут подвержены риску заболевания от температуры воздуха в зимний период. Однако в случае если специалист по охране труда предпримет действия по улучше-

нию данного рабочего места, то риск заболевания снизится до 18 % (оптимистическая оценка). При этом если никаких действий по улучшению рабочего места не произойдёт, то риск заболевания увеличится примерно до 34 % (пессимистическая оценка).

Риск заболевания в будущем году от относительной влажности воздуха составил примерно 3 %. Также сотрудники отдела информатизации процессов управления будут подвержены в будущем году риску заболевания от высокого уровня коэффициента пульсации освещённости – 4 %.

Ещё одним фактором, влияющим на риск возникновения заболевания, является напряжённость электромагнитного поля. В будущем году от данного фактора могут заболеть 2,4 %. Опасные факторы рассматриваются с позиции травматизма, ранжирование по этому фактору берётся по статистическим данным (по данным Росстата). При расчёте риска необходимо учитывать обеспечение средствами индивидуальной защиты. При расчёте индивидуального риска предлагается модель управления рисками, разработанная на основе ГОСТ Р ИСО 45001-2020 «Системы менеджмента безопасности труда и охраны здоровья. Требования и руководство по применению». Процесс оценки риска может быть значительно упрощён при помощи матрицы риска. Матрица риска помогает оценить степень тяжести последствий (низкая, высокая, средняя) и вероятность инцидента (маловероятно, возможно, вероятно) (см. рис. 4).

		МАТРИЦА РИСКА					
ВЕРОЯТНОСТЬ ВОЗНИКНОВЕНИЯ	Весьма вероятно	5	5	10	15	20	25
	Вероятно	4	4	8	12	16	20
	Возможно	3	3	6	9	12	15
	Маловероятно	2	2	4	6	8	10
	Невероятно	1	1	2	3	4	5
	Уровень	1	2	3	4	5	
		Незначительный	Низкий	Средний	Высокий	Катастрофический	ТАЖЕСТЬ ПОСЛЕДСТВИЙ

Рис. 4. Матрица риска

Согласно матрице рисков на рабочем месте, если инцидент маловероятен, но всё же по каким-либо причинам он произойдёт, последствия будут незначительными, т. е. степень риска низкая. Данная модель позволит не только определить степень риска, но и конкретизировать фактор и рабочее место, на котором он возник, и мероприятия по устранению или уменьшению фактора.

Предлагаем иерархическую систему мер контроля. Основной идеей иерархии мер контроля является демонстрирование преимуществ одних мер контроля над другими с точки зрения сокращения риска посредством соответствующего управления опасными факторами и предотвращения их высвобождения.

Таким образом, специалист по охране труда, разрабатывая мероприятия по улучшению условий труда, в первую очередь будет стремиться устранить тот фактор, от которого риск получения заболевания наиболее высокий.

Также полученные результаты могут быть использованы для создания отчётности, информирования работников о риске утраты здоровья, оценивания эффективности мер по совершенствованию охраны труда, выяснения причинно-следственной связи состояния здоровья работников с условиями труда. Следовательно, оценка риска утраты здоровья, основанная на технике целевого программирования, является довольно эффективной. Поэтому разработка программного продукта для данного метода является целесообразной.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кравченко, Е. Г. Программа оценки результативности систем менеджмента качества предприятия / Е. Г. Кравченко, А. А. Китаева, Н. Ю. Коровина // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2017. – № II-1 (30). – С. 13-18.
2. О промышленной безопасности опасных производственных объектов: Федеральный закон РФ от 21 июля 1997 г. № 116-ФЗ (ред. от 07 марта 2017 г.) // Справочно-правовая система «Техэксперт». – URL: <http://docs.cntd.ru/document/9046058> (дата обращения: 12.10.2021). – Текст: электронный. – Режим доступа: по подписке.
3. Об охране окружающей среды: Федеральный закон РФ от 10 января 2002 г. № 7-ФЗ (ред. от 31 декабря 2017 г.) // Справочно-правовая система «Техэксперт». – URL: <http://docs.cntd.ru/document/901808297> (дата обращения: 12.10.2021). – Текст: электронный. – Режим доступа: по подписке.
4. Theophilus, Stephen C. Human factors analysis and classification system for the oil and gas industry (HFACS-OGI) [Text] / Stephen C. Theophilus, Victor N. Esenowo, Andrew O. Arewa, Augustine O. Ifelegebugu // Reliability Engineering and System Safety – Elsevier, 2017. – Vol. 62. – P. 168-176.
5. Sivaprakash, P. A Comparative Study on Safety and Security Management Systems in Industries / P. Sivaprakash, M. Sakthivel // American Journal of Environmental Sciences. – Vol. 62. – P. 548-552.
6. Об утверждении Рекомендаций по организации работы Службы охраны труда в организации: Постановление Минтруда России от 08 февраля 2000 г. № 14 (ред. от 12 февраля 2014 г.) // Справочно-правовая система «Техэксперт». – URL: <http://docs.cntd.ru/document/901758673> (дата обращения: 12.10.2021). – Текст: электронный. – Режим доступа: по подписке.
7. Трудовой кодекс Российской Федерации: Федеральный закон РФ от 30 декабря 2001 г. № 197-ФЗ (ред. от 05 февраля 2018 г.) // Справочно-правовая система «Техэксперт». – URL: <http://docs.cntd.ru/document/901807664> (дата обращения: 12.10.2021). – Текст: электронный. – Режим доступа: по подписке.
8. Носенко, А. М. Исследование и методология оценки профессиональных рисков в организациях нефтехимического комплекса / А. М. Носенко // Электронное периодическое издание «Аллея науки». – 2018. – № 5. – URL: [http://alleyscience.ru/domains\\_data/files/514MAY2018/ISSLEDOVANIE%20I%20METODOLOGIYa%20OCENKI%20PROFESSIONALNYH%20RISKOV%20V%20ORGANIZACIYaH%20NEFTEHIMICHESKOGO%20KOMPLEKSA.pdf](http://alleyscience.ru/domains_data/files/514MAY2018/ISSLEDOVANIE%20I%20METODOLOGIYa%20OCENKI%20PROFESSIONALNYH%20RISKOV%20V%20ORGANIZACIYaH%20NEFTEHIMICHESKOGO%20KOMPLEKSA.pdf) (дата обращения: 12.10.2021). – Текст: электронный.
9. ГОСТ Р 12.0.230-2007. Система стандартов безопасности труда. Система управления охраной труда. Общие требования = Occupational safety standards system. Occupational safety and health management systems. General requirements: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утверждён и введён в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 10 июля 2007 г. № 169-ст // Справочно-правовая система «Техэксперт». – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200052851> (дата обращения: 12.10.2021). – Текст: электронный. – Режим доступа: по подписке.
10. Об обязательном социальном страховании от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний: Федеральный закон РФ от 24 июля 1998 г. № 125-ФЗ (ред. от 07 марта 2018 г.) // Справочно-правовая система «Техэксперт». – URL: <http://docs.cntd.ru/document/901713539> (дата обращения: 12.10.2021). – Текст: электронный. – Режим доступа: по подписке.
11. Об организации и осуществлении производственного контроля за соблюдением требований промышленной безопасности на опасном производственном объекте: Постановление Правительства РФ от 10 марта 1999 г. № 263 (ред. от 28 февраля 2018 г.) // Справочно-правовая система «Техэксперт». – URL: <http://docs.cntd.ru/document/901728088> (дата обращения: 12.10.2021). – Текст: электронный. – Режим доступа: по подписке.
12. Денисов, Э. И. Управление профессиональными рисками: прогнозирование, каузация и биоинформационные технологии / Э. И. Денисов, Л. В. Прокопенко, И. В. Степанян // Вестник РАМН. – 2012. – № 6. – С. 51-56.
13. Соколова, Л. А. Оценка и управление профессиональным риском нарушения здоровья работников промышленного комплекса г. Архангельска / Л. А. Соколова, Л. В. Прокопенко // Медицина труда и промышленная экология. – 2009. – № 8. – С. 25-29.
14. О пожарной безопасности: Федеральный закон РФ от 21 декабря 1994 г. № 69-ФЗ (ред. от 29 июля 2017 г.) // Справочно-правовая система «Техэксперт». – URL: <http://docs.cntd.ru/document/9028718> (дата обращения: 12.10.2021). – Текст: электронный. – Режим доступа: по подписке.
15. Иванов, В. М. Интеллектуальные системы : учеб. пособие для вузов / В. М. Иванов; под науч. ред. А. Н. Сесекина. – М.: Юрайт, 2017. – 91 с.
16. Кудрявцев, К. Я. Методы оптимизации : учеб. пособие для вузов / К. Я. Кудрявцев, А. М. Прудников. – 2-е изд. – М. : Юрайт, 2019. – 140 с.



Поляков И. А., Сысоев О. Е., Сысоев Е. О.

I. A. Polyakov, O. E. Sysoev, E. O. Sysoev

## К ВОПРОСУ АВТОМАТИЗАЦИИ РАСЧЁТОВ ПРОГРЕВА МОНОЛИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА

### ON THE QUESTION OF CALCULATION AUTOMATION OF MONO-LITHIC STRUCTURES HEATING WHEN CONSTRUCTING BUILDINGS AND STRUCTURES IN THE CONDITIONS OF THE FAR EAST

**Поляков Илья Александрович** – магистр кафедры «Строительство и архитектура» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

**Плю А. Polyakov** – Master's Degree Student, Construction and Architecture Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

**Сысоев Олег Евгеньевич** – доктор технических наук, профессор кафедры «Строительство и архитектура» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

**Oleg E. Sysoev** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Construction and Architecture Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

**Сысоев Евгений Олегович** – кандидат экономических наук, доцент кафедры «Строительство и архитектура» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

**Evgeny O. Sysoev** – PhD in Economics, Associate Professor, Construction and Architecture Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

**Аннотация.** При строительстве в условиях Крайнего Севера выполняются большие объёмы строительно-монтажных работ из монолитного бетона при низких отрицательных температурах. Поэтому снижение затрат на зимнее бетонирование является актуальной проблемой. В данной статье рассматриваются вопросы автоматизации расчётов параметров существующих методов зимнего бетонирования с учётом температуры наружного воздуха, типа прогревочного провода и особенностей монолитной конструкции.

**Summary.** During the construction process in the conditions of the Far North, large volumes of construction and installation work are carried out from monolithic concrete at low negative temperatures. Therefore, reducing the cost of winter concreting is an urgent problem. This article discusses issues of automating the calculation of parameters of existing winter concreting methods, taking into account the outdoor temperature, the type of heating wire and the features of a monolithic structure.

**Ключевые слова:** бетонирование при низких температурах, автоматизация расчёта, монолитные конструкции.

**Key words:** concreting at low temperatures, calculation automation, monolithic structures.

УДК 579.6.502

В связи с возрастающими объёмами строительства в условиях Дальнего Востока и Крайнего Севера возникает необходимость поиска способов оптимизации методов прогрева бетона при зимнем бетонировании, отличающихся от большинства существующих [1–5]. Электропрогрев бетона с применением греющего провода является самым практичным, безопасным и эффективным из таких методов и заключается в размещении провода внутри монолитной конструкции без последующего извлечения. Сам провод представляет собой стальной сердечник с повышенным электросопротивлением в диэлектрической оболочке. При прохождении электрического тока по проводу происходит выделение большого количества тепловой энергии, которая передаётся телу монолитной конструкции изнутри с минимальными потерями и позволяет вывести бетон из стадии

замерзания до технологически оптимальных температур, что невозможно выполнить другими методами прогрева. Геометрические параметры монолитной конструкции не накладывают никаких ограничений на применение греющих проводов. Для использования греющих проводов требуется выполнение расчёта с целью определения оптимальных параметров прогрева конструкции и подбора греющего кабеля. В условиях строительной площадки производители работ испытывают затруднения при определении оптимальных параметров длины греющих проводов, способа подключения, оптимальной температуры конструкции, времени прогрева и т. д. Поэтому требуются простые и надёжные инструменты расчёта технологических параметров прогрева бетона.

Существующие методики определения искомых значений при использовании данного способа прогрева имеют следующие недостатки:

- сложность и продолжительность расчёта параметров греющего провода;
- возможная некорректность искомых значений в связи с человеческим фактором;
- отсутствие возможности объединения расчёта греющего кабеля и расчёта продолжительности прогрева;
- значительные затраты на электроэнергию, а также материалы прогрева в связи с невозможностью повторного использования.

Устранить вышеперечисленные недостатки возможно при создании расчётной программы для ПЭВМ, где будут учтены следующие исходные данные:

- размеры бетонируемой конструкции (длина, ширина, высота);
- материал опалубки;
- температура наружного воздуха;
- температура бетонной смеси перед укладкой в опалубку;
- диаметр жилы имеющегося в наличии кабеля;
- линейное напряжение переменного тока на трансформаторе (по паспортным данным);
- температура прогрева (+50...+80 °C);
- требуемая прочность конструкции по окончании прогрева;
- проектный класс бетона.

Первым этапом при выполнении расчёта в программе является ввод известных данных о бетонируемой конструкции, погодных условиях и параметрах прогрева.

Затем производится подбор понижающего трансформатора на основе расчёта требуемой мощности на всех этапах прогрева бетона по следующим формулам [6; 7] на период подъёма температуры:

$$P_{\text{п}} = (P_1 + P_2 + P_3) * V,$$

где  $P_{\text{п}}$  – требуемая мощность для нагрева бетона, кВт/м<sup>3</sup>;  $P_1$  – мощность, необходимая для разогрева бетона, кВт/м<sup>3</sup>;  $P_2$  – мощность, необходимая для разогрева опалубки, кВт/м<sup>3</sup>;  $P_3$  – мощность, необходимая для восполнения теплопотерь в окружающую среду в процессе разогрева бетона, кВт/м<sup>3</sup>;  $V$  – объём бетонируемой конструкции, м<sup>3</sup>.

Тогда

$$P_{\text{п}} = \left( \frac{C_6 * \gamma_6 * V_{\text{под}}}{3600} + \frac{\sum (C_{\text{оп}i} * \gamma_{\text{оп}i} * \delta_{\text{оп}i}) * M_{\text{оп}} * V_{\text{под}}}{3600 * 2} + \frac{\alpha_{\text{прив}} * M_{\text{п}} * (t_{\text{б.н.}} + t_{\text{из}} - 2 * t_{\text{н.в.}})}{1000 * 2} \right) * V,$$

где  $C_6$  – удельная теплоёмкость бетона, принимаемая равной 1,05 кДж/(кг·°C);  $\gamma_6$  – плотность бетона, кг/м<sup>3</sup>;  $V_{\text{под}}$  – скорость подъёма температуры бетона, °C;  $C_{\text{оп}i}$  – удельная теплоёмкость материала опалубки, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $\gamma_{\text{оп}i}$  – плотность материала опалубки, кг/м<sup>3</sup>;  $\delta_{\text{оп}i}$  – толщина материала опалубки, м;  $M_{\text{оп}}$  – модуль опалубленной поверхности;  $\alpha_{\text{прив}}$  – коэффициент теплопередачи опалубки.

На период изотермического прогрева

$$P_{\text{из}} = \frac{k * \alpha_{\text{прив}} * M_{\text{п}} * (t_{\text{из}} - t_{\text{н.в.}})}{1000} - 0,8,$$

где  $P_{из}$  – требуемая мощность для изотермического прогрева бетона, кВт/м<sup>3</sup>;  $M_n$  – модуль поверхности конструкции;  $t_{б.н.}$  – температура бетонной смеси, °С;  $t_{из}$  – температура прогрева бетона, °С;  $t_{н.в.}$  – температура наружного воздуха, °С; 0,8 – мощность, эквивалентная теплу, выделяющемуся за время прогрева вследствие экзотермии цемента, кВт/м<sup>3</sup>.

В качестве нагревательных проводов рекомендуется использовать кабель со стальной изолированной токонесущей жилой диаметром 1...3 мм марки ПНСВ. Пользователю предлагается на выбор две принципиальные схемы соединения проводов (см. рис. 1 и 2).

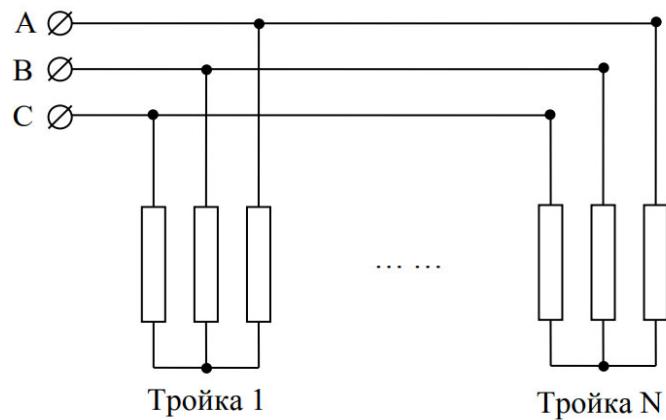


Рис. 1. Схема соединения проводов звездой

После выбора схемы осуществляется расчёт напряжения на проводе с условием, что сила тока меньше либо равна 15 А. Затем определяется необходимая длина провода и шаг его укладки. В случае если напряжение на проводе больше 15 А, необходимо уменьшить диаметр греющего провода. Исходя из нагрузки на монтажный отвод (холодный конец) осуществляется подбор его сечения и материала. Сечение монтажного отвода должно быть не менее 2,5 мм<sup>2</sup>. В зависимости от типа соединения и общей длины провода для прогрева определяется необходимое количество соединений проводов. Оно должно быть не более максимального значения.

Подбор сечения и материала магистральной линии, подключённой к трансформатору, является последним этапом при расчёте греющего провода. Данное значение определяется исходя из количества соединений и расчётной токовой нагрузки на провод прогрева.

Параллельно с расчётом кабеля в зависимости от температур прогрева и бетонной смеси на момент укладки рассчитывается продолжительность нагрева бетона до заданной температуры.

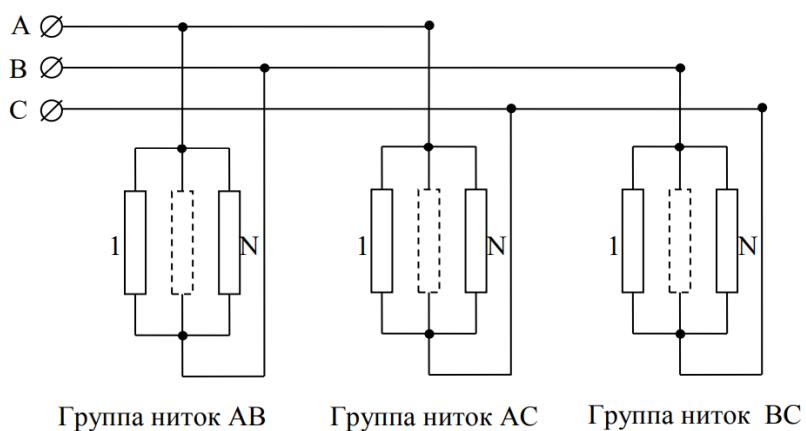


Рис. 2. Схема соединения проводов треугольником

Расчёт продолжительности остывания выполняется исходя из коэффициента теплопередачи опалубки, модуля поверхности монолитной конструкции и температуры наружного воздуха.

Продолжительность изотермического прогрева рассчитывается на основании данных о прочности бетона, набранной за периоды нагрева и остывания, а также необходимом проценте прочности по окончании прогрева.

Показатели прочности на этапах прогрева определяются на основании графика набора прочности бетона (см. рис. 3).

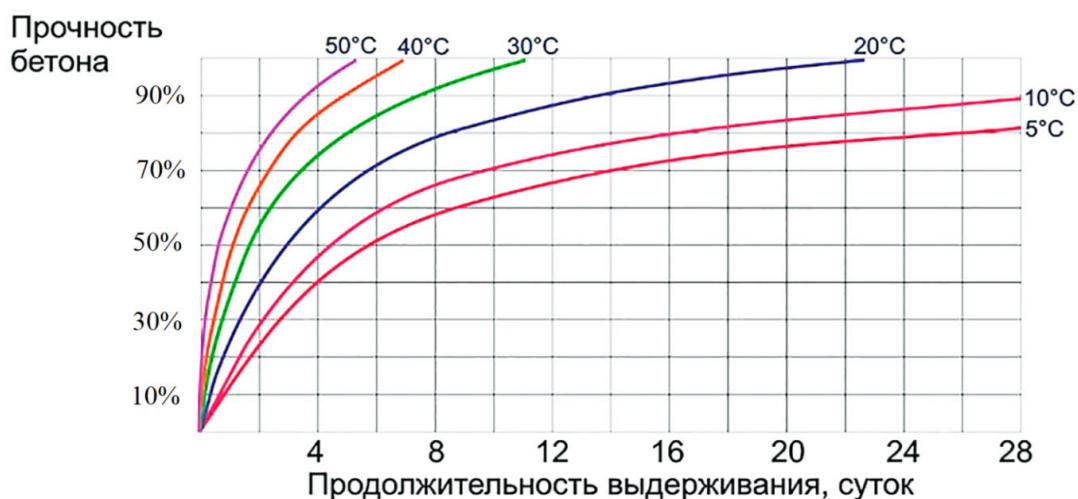


Рис. 3. График набора прочности бетона в зависимости от температуры выдерживания

В завершение производится расчёт энергопотребления по следующей формуле:

$$W = P_{\text{п}} * \tau_{\text{п}} + P_{\text{из}} * \tau_{\text{из}},$$

где  $W$  – расход электроэнергии, кВт·ч;  $\tau_{\text{п}}$  – продолжительность изотермического прогрева, ч;  $\tau_{\text{из}}$  – продолжительность подъёма температуры, ч.

Алгоритм выполнения расчёта кабеля и продолжительности этапов прогрева представлен блок-схемой на рис. 4.

Пользователю, помимо необходимых данных о прогреве (см. табл. 1), будет предоставлено визуальное представление устройства кабеля в бетонируемой конструкции с учётом исходных и рассчитанных данных.

Таблица 1  
Выходные данные при выполнении расчёта

Наименование	Единицы измерения
1. Значение электрического напряжения на проводе	В
2. Принятое сечение монтажного отвода	мм <sup>2</sup>
3. Расчётная длина нагревательного провода	м
4. Общее количество троек (ниток), которые можно подключить к трансформатору	шт.
5. Шаг расстановки нагревательных проводов	А
6. Расчётная токовая нагрузка на монтажный отвод	м
7. Продолжительность нагрева	ч
8. Продолжительность изотермического прогрева	ч
9. Продолжительность остывания	ч
10. Потребление электроэнергии	кВт·ч

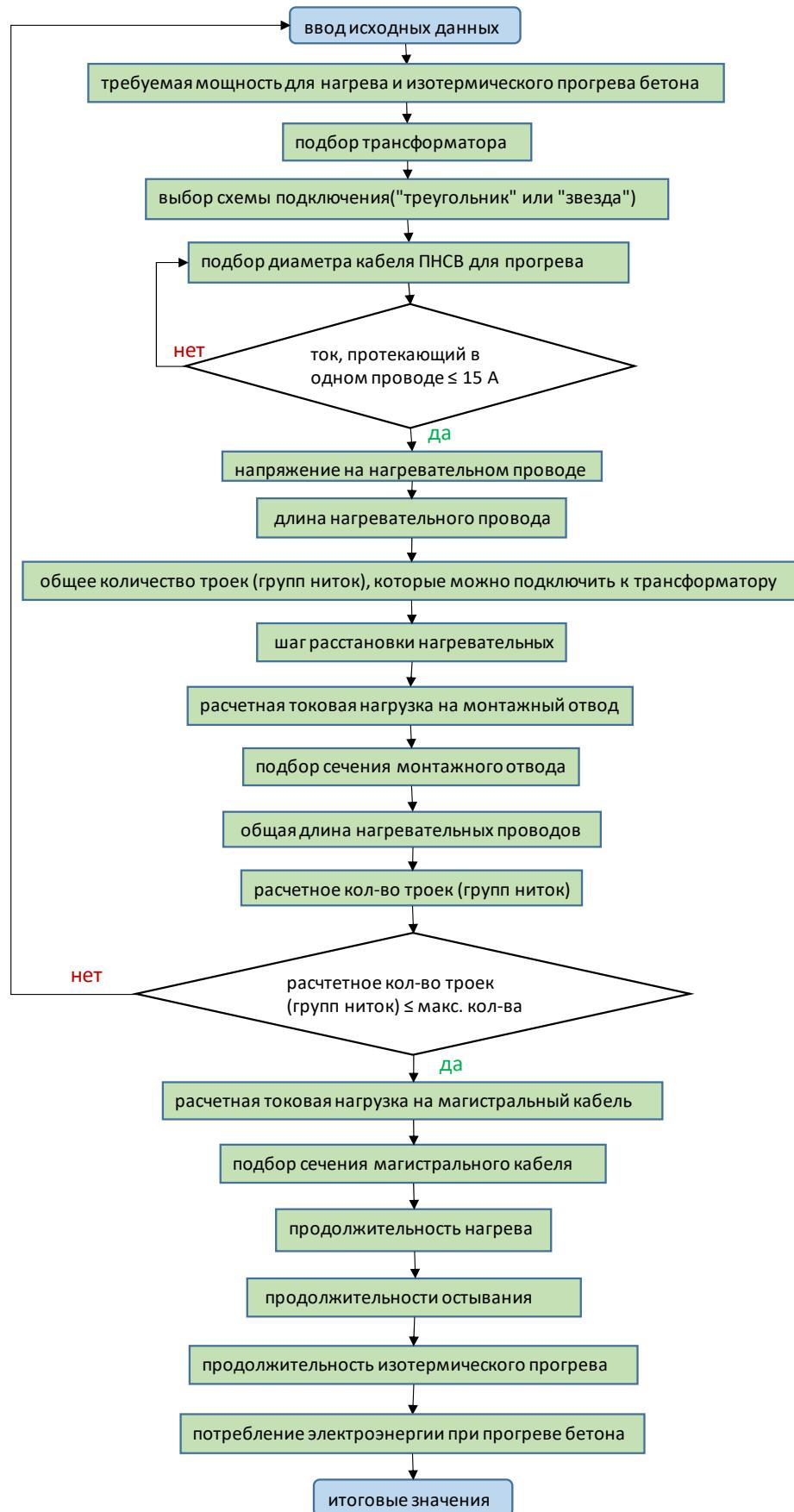


Рис. 4. Алгоритм расчёта параметров прогрева

Данная программа направлена на упрощение расчёта греющего кабеля и сроков выполнения работ по монолитному бетонированию строительных конструкций в зимний период, а также на оптимизацию производства работ при прогреве бетона и, следовательно, уменьшение затрат на электроэнергию и материалы прогрева.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Алгоритм CFD-моделирования процесса тепломассопереноса в совмешённом электротехническом устройстве / К. К. Ким, С. Н. Иванов, О. В. Приходченко, А. А. Просолович // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № III-1 (43). – С. 65-72.
2. Иванов, С. Н. Модификация свойств материалов воздействием низкотемпературной плазмы / С. Н. Иванов, К. К. Ким, Г. Л. Спичкин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2017. – № II-2 (30). – С. 75-81.
3. Иванов, С. Н. Электромеханическая система отопления пассажирского вагона / С. Н. Иванов, К. К. Ким, М. И. Хисматулин // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2020. – Т. 17. – Вып. 4. – С. 566-574.
4. Постановка задачи исследования устойчивости теплоотвода в элементах герметичных электромеханических преобразователей / К. К. Ким, М. В. Мартынов, С. Н. Иванов, А. А. Просолович // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2015. – № III-1 (23). – С. 26-31.
5. Ким, К. И. Исследование токов, индуцированных в жидкости с тензорной проводимостью бегущим магнитным полем / К. И. Ким, К. К. Ким, С. Н. Иванов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № VII-1 (55). – С. 4-10.
6. Зимнее бетонирование с применением нагревательных проводов. МДС 12-48.2009 / ЗАО «ЦНИИОМТП». – М.: ОАО «ЦПП», 2009. – 18 с.
7. Руководство по производству бетонных работ в зимних условиях, районах Дальнего Востока, Сибири и Крайнего Севера / ЦНИИИМТП Госстроя СССР. – М.: Стройиздат, 1982. – 213 с.



Стельмащук С. В., Демин С. Д.  
S. V. Stelmashchuk, S. D. Demin

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА НАСОСА ДЛЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СЕТИ С УЧЁТОМ ИНЕРЦИОННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ДАВЛЕНИЯ

## DEVELOPMENT OF A PUMP ELECTRIC DRIVE CONTROL SYSTEM FOR A HYDRAULIC NETWORK WITH AN INERTIAL PRESSURE COMPONENT

**Стельмащук Сергей Валерьевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: rukdpsv@rambler.ru.

**Sergey V. Stelmashchuk** – PhD in Engineering, Associate Professor, Electric Drive and Automation of Industrial Plants Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: rukdpsv@rambler.ru.

**Демин Сергей Денисович** – бакалавр Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: sergei.demin.00@mail.ru.

**Sergey D. Demin** – Bachelor's Degree Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: sergei.demin.00@mail.ru.

**Аннотация.** В статье рассмотрено применение метода логарифмических амплитудных характеристик (метода ЛАХ) для синтеза регулятора давления в гидравлической сети системы водоснабжения. Результатом применения метода ЛАХ является формула, по которой выполняется настройка регулятора давления. При этом предполагается, что насосная установка имеет контур скорости вращения вала электродвигателя, настроенного на модульный оптимум. В результате удалось получить интегральный регулятор давления с достаточно простой настройкой коэффициента пропорциональности, значение которого не зависит от изменяющегося потребления воды в системе водоснабжения. Для применения метода ЛАХ в рамках статьи выполнена линеаризация разложением в степенной ряд нелинейной системы дифференциальных уравнений, описывающих гидравлические процессы в сети водоснабжения, где учитывалась инерционная составляющая давления в трубопроводе сети. Результаты моделирования системы «насос-двигатель» показали высокую адекватность переходных процессов подачи, расхода и скорости электродвигателя в малых отклонениях относительно базовой точки на Q-H характеристики системы «насос-двигатель». В статье приведён пример настройки электропривода насоса. Результаты настройки показали приемлемое качество статических и динамических характеристик изменения давления в сети водоснабжения.

**Summary.** The paper considers the application of the method of logarithmic amplitude characteristics (LACH method) for the synthesis of a controller of pressure in the hydraulic network of the water system. The result of applying the LACH method is the formula by which the pressure controller is set up. In this case, it is assumed that the pumping unit has a control loop of the electric motor speed tuned to the modular optimum. As a result, it was possible to obtain an integral pressure controller with a simple setting of the proportionality coefficient, the value of which does not depend on the changing water consumption in the water system. For the application of the LACH method, the linearization of a nonlinear system of differential equations describing hydraulic processes in the water network, taking into account the inertial pressure component in the network pipeline, was performed in the paper. The simulation results of the pump-motor system showed high adequacy of the transient processes of supply, flow and speed of the electric motor in small deviations relative to the base point on the Q-H characteristic of the pump-motor system. The paper provides an example of setting up an electric pump drive. The setting results showed acceptable quality of static and dynamic characteristics of pressure changes in the water network.

**Ключевые слова:** линеаризация, метод ЛАХ, Q-H характеристика, Simulink.

**Key words:** linearization, LACH method, Q-H characteristic, Simulink.

## Введение

Работа системы водоснабжения городской инфраструктуры характерна частыми изменениями параметров гидравлической сети, связанными с постоянными включениями или выключениями вентилей при потреблении воды. Это приводит к необходимости рассмотрения динамики не только электропривода насоса, но и гидравлической сети, где работает насос. Данной проблеме посвящено множество работ, в которых предлагаются различные способы управления электроприводом насоса с точки зрения оптимизации энергопотребления [1], адаптивное управление [2] и др.

В рамках статьи исследована гидромеханическая система насосной установки, работающей с трубопроводом до 100 м, где жидкость принята несжимаемой. Математическое описание гидравлической сети содержит инерционную составляющую давления [3]. Это позволяет адекватно оценивать динамические свойства насосного электропривода и разрабатывать систему управления электропривода насоса с хорошим качеством регулирования при изменении параметров гидравлической сети.

В статье рассмотрены следующие вопросы: линеаризация математического описания гидромеханической системы «насос-сеть» относительно базовой точки на Q-H характеристики системы; настройка на модульный оптимум частотного электропривода со скалярным управлением по контуру скорости; применение метода логарифмических характеристик для вывода формул по определению параметров регулятора давления.

## Линеаризация математического описания системы «насос-сеть»

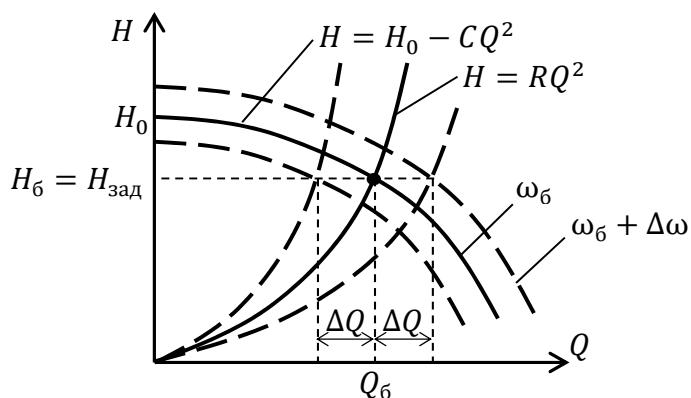
Базовой точкой, где осуществляется линеаризация, является рабочая точка на Q-H характеристики, для которой рассчитывался электродвигатель насоса (см. рис. 1). При линеаризации рассматривается характеристика насоса [3]

$$H = H_0 - CQ^2$$

и характеристика гидравлической сети без противодавления

$$H = RQ^2,$$

где  $H$ ,  $Q$  – соответственно напор,  $\text{Н}/\text{м}^2$ , и подача,  $\text{м}^3/\text{с}$ , в системе «насос-сеть»;  $H_0 = A\omega^2$  – фиктивный напор,  $\text{Н}/\text{м}^2$ ;  $A$ ,  $C$  – параметры насоса;  $R$  – параметр гидравлической сети (гидравлическое сопротивление трубопровода);  $\omega$  – угловая скорость электродвигателя насоса,  $\text{с}^{-1}$ .



$H_6$ ,  $Q_6$ ,  $\omega_6$  – базовые значения напора, подачи и скорости;  
 $\Delta H$ ,  $\Delta Q$ ,  $\Delta \omega$  – отклонения значений напора, подачи и скорости

Рис. 1. Базовая точка на Q-H характеристике

Параметры насоса и сети определяются по базовым значениям базовой точки:

$$R = \frac{H_6}{Q_6^2}; \quad A = k \frac{H_6}{\omega_6^2}; \quad C = (k-1) \frac{H_6}{Q_6^2},$$

где  $k = \frac{H_0}{H_6} \approx 1,2 \dots 2$  [4].

Базовые значения напора, подачи и скорости должны быть связаны с параметрами электродвигателя насоса:

$$\frac{P_H}{\omega_H} = \frac{Q_6 H_6}{\omega_6},$$

где  $P_n$ ,  $\omega_n$  – соответственно номинальные мощность и скорость электродвигателя насоса.

Система нелинейных дифференциальных уравнений (СНДУ) системы «насос-сеть» [3]:

$$\begin{cases} C_m \frac{dQ}{dt} = H - RQ^2, \\ H = A\omega^2 - CQ^2 \end{cases}$$

где  $C_m = \frac{\rho l}{S}$  – инерционная составляющая давления, здесь  $\rho$  – плотность воды,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $l, S$  – длина, м, и площадь сечения,  $\text{м}^2$ , трубопровода соответственно.

Структурная схема нелинейной системы «насос-сеть» представлена на рис. 2, а.

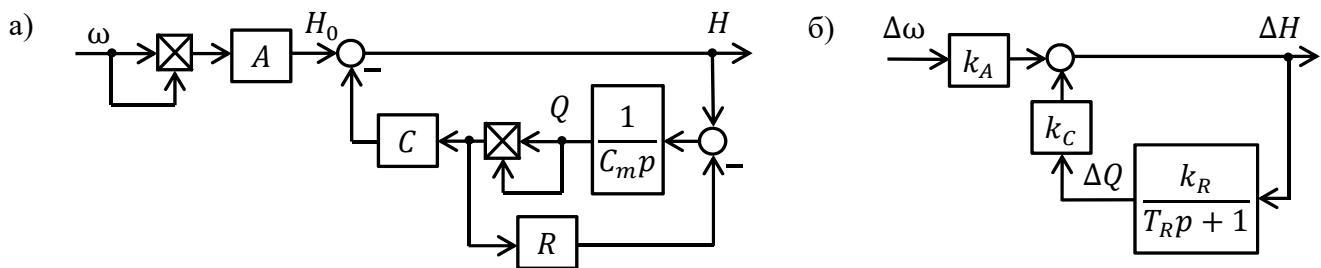


Рис. 2. Структурная схема системы «насос-сеть» в нелинейном (а) и линеаризованном (б) виде

Для линеаризации разложим уравнения СНДУ в степенной ряд по отклонениям относительно базовых значений. В результате получим линеаризованные уравнения динамики:

$$\begin{cases} C_m \Delta \dot{Q} = \Delta H - 2RQ_6 \Delta Q \\ \Delta H = 2A\omega_6 \Delta \omega - 2CQ_6 \Delta Q \end{cases}.$$

На основании этих уравнений можно построить структурную схему линеаризованной системы «насос-сеть» (см. рис. 2, б), параметры которой равны

$$k_A = 2A\omega_6 = 2k\frac{H_6}{\omega_6}; \quad k_C = -2CQ_6 = 2(1-k)\frac{H_6}{Q_6}; \quad k_R = \frac{1}{2RQ_6} = \frac{Q_6}{2H_6}; \quad T_R = \frac{1}{2RQ_6} = \frac{C_m Q_6}{2H_6}.$$

## Общая передаточная функция системы «насос-сеть»

$$W_H(p) = \frac{\Delta H(p)}{\Delta \omega(p)} = k_H \frac{T_R p + 1}{T_R' p + 1},$$

где

$$k_H = \frac{k_A}{1 - k_C k_R} = 2 \frac{H_6}{\omega_6}; \quad T_R' = \frac{T_R}{1 - k_C k_R} = \frac{C_m Q_6}{2 k H_6}.$$

### Синтез системы управления электроприводом насоса

Система управления имеет два контура: контур скорости электродвигателя и контур давления насоса. Контур скорости настраивается на модульный оптимум. Используя параметры частотного асинхронного электропривода со скалярным управлением, получим П-регулятор скорости с коэффициентом пропорциональности [5]:

$$k_{\text{PC}} = \frac{J_{\Sigma}}{\sqrt{2}T_{\mu}k_{\text{dc}}K_{\Pi}\beta},$$

где  $J_{\Sigma}$  – суммарный момент инерции электропривода насоса;  $T_{\mu} = T_{\Pi} + T_{\vartheta}$  – малая некомпенсированная постоянная времени электропривода насоса;  $K_{\Pi}$ ,  $T_{\Pi}$  – соответственно коэффициент усиления и постоянная времени частотного преобразователя;  $\beta$ ,  $T_{\vartheta}$  – соответственно жёсткость линеаризованной механической характеристики и электромагнитная постоянная времени асинхронного электродвигателя насоса;  $k_{\text{dc}}$  – коэффициент усиления датчика скорости.

Для исключения ошибки по положению контура давления необходима астатическая система регулирования давления насоса. Тогда желаемая передаточная функция контура давления в разомкнутом состоянии

$$W_{\text{ж}}(p) = \frac{K_{\text{раз}}(T_R p + 1)}{p(2T_{\mu}^2 p^2 + 2T_{\mu} p + 1)(T_R' p + 1)},$$

где  $K_{\text{раз}} = \frac{k_{\text{РН}}k_{\text{Н}}k_{\text{дн}}}{k_{\text{dc}}}$  – коэффициент усиления разомкнутой системы контура давления;  $k_{\text{дн}}$  – коэффициент усиления датчика давления (напора);  $k_{\text{РН}}$  – коэффициент пропорциональности И-регулятора давления (напора).

Коэффициент регулятора давления определяется исходя из равенства желаемой ЛАХ разомкнутой системы при частоте сопряжения  $1/\sqrt{2}T_{\mu}$  запасу устойчивости по модулю  $\Delta L = 22$ , которая соответствует минимально возможному перерегулирования по номограмме Солодовникова [6] (см. рис. 3).

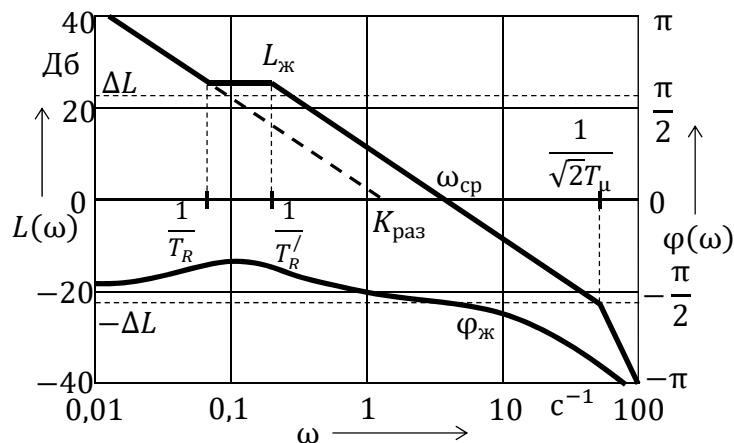


Рис. 3. Желаемая ЛАХ и фаза разомкнутой системы регулирования давления насоса

По асимптотическому графику желаемой ЛАХ определяется формула для вычисления коэффициента усиления разомкнутой системы, следовательно, коэффициент пропорциональности регулятора давления

$$k_{\text{РН}} = \frac{k_{\text{dc}}}{\sqrt{2}T_{\mu}k_Ak_{\text{дн}}\Delta A},$$

где  $\Delta A = 10^{20} \approx 12,6$ .

Для оценки быстродействия используется значение частоты среза желаемой ЛАХ, которая по номограмме Солодовникова определится как [6]

$$\frac{2,7\pi}{\omega_{cp}} \geq t_{pp}.$$

По асимптотическому графику желаемой ЛАХ (см. рис. 3) частота среза равна

$$\omega_{cp} = \frac{1}{\sqrt{2}T_\mu \Delta A},$$

тогда

$$t_{pp} \leq 2,7\pi\sqrt{2}T_\mu \Delta A \approx 12T_\mu \Delta A.$$

### Моделирование системы регулирования давления насоса

Для проверки методики расчёта регулятора давления насоса рассмотрим насосную установку, предназначенную для создания давления в сети горячего водоснабжения микрорайона с 70 тыс. жителей, где здания не выше 10 этажей. В соответствии со СНиП 2.04.01-85 требуемый напор должен составлять примерно 0,5 МПа, а расчётный расход воды  $480 \text{ м}^3/\text{ч}$ . С учётом этих требований мощность асинхронного двигателя должна составлять не менее 7 кВт. Отношение фиктивного напора к требуемому зададим  $H_0 = 2H_{tp}$ , что характерно для осевых насосов [4]. Тогда с учётом диаметра и длины трубопровода расчётные параметры системы регулирования давления в базовой точке Q-H характеристики составят

$$H_0 = 4,7 \times 10^4 \frac{\text{H}}{\text{M}^2}; Q_0 = 0,134 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}; \omega_0 = 70 \text{ с}^{-1}; A = 19; C = R = 2,6 \times 10^6; C_m = 9 \times 10^6; k_A = 2,7 \times 10^3; k_C = -7 \times 10^5; k_R = 1,4 \times 10^{-6}; T_R = 12,8 \text{ с.}$$

Блок-схема электропривода насоса в линеаризованном виде (сверху) и нелинейном виде (снизу) представлена на рис. 4. Здесь контур скорости электропривода представлен звеном, соответствующим настройке на модульный оптимум. Моделирование осуществлялось с помощью пакета Simulink в среде MatLab.

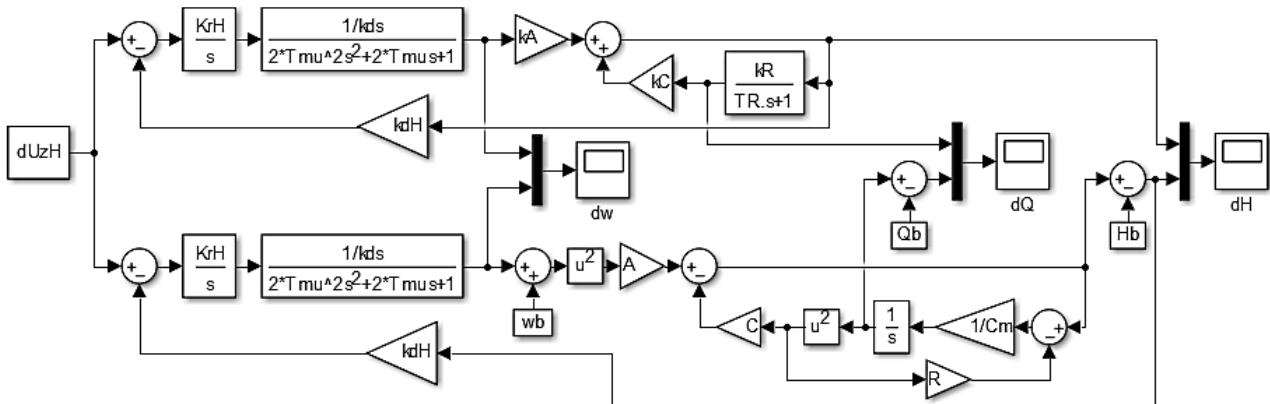


Рис. 4. Блок-схема системы «насос-сеть» в Simulink

Датчики скорости и давления примем соответственно:  $k_{dc} = 0,095$ ,  $k_{dh} = 5 \times 10^{-5}$ . Некомпенсированная постоянная времени электропривода составляет  $T_\mu = 0,012 \text{ с}$ . Тогда коэффициент пропорциональности И-регулятора давления  $k_{ph} = 3,5$ . Расчётное время регулирования 1,8 с. На

рис. 5 представлены переходные процессы отклонений скорости электродвигателя, подачи и напора воды. Отклонения соответствуют единичному приращению скорости.

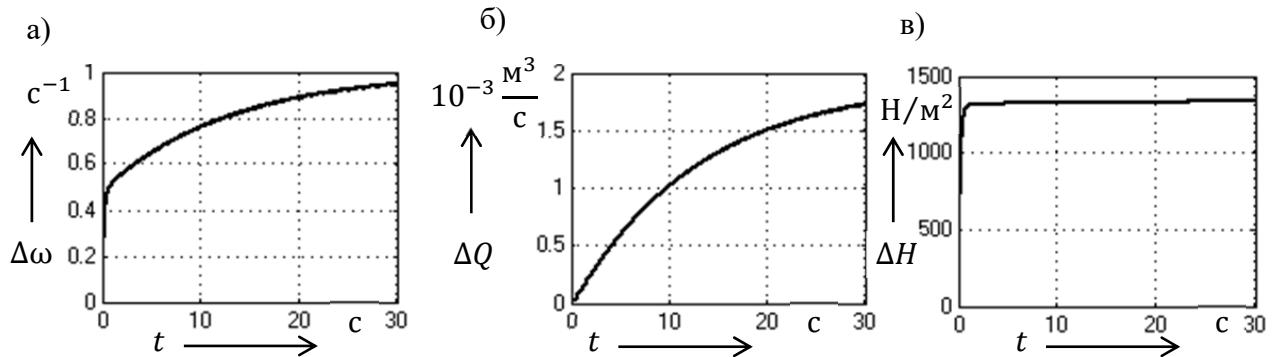


Рис. 5. Переходные процессы отклонений скорости электродвигателя (а),  
подачи (б) и напора воды (в) системы «насос-сеть» в Simulink

Видно, что графики переходных процессов, соответствующих как нелинейному, так и линеаризованному математическому описанию, совпали, что свидетельствует об адекватной линеаризации системы «насос-сеть». Анализируя график напора воды (см. рис. 5, в), видим, что переходный процесс содержит две составляющие: быструю, определяющую фронт графика (время составляет примерно 0,7 с, меньше расчётного в два раза), и затяжную, продолжающуюся примерно 30 с, но в пределах 5%-й зоны установившегося процесса. Затяжная составляющая обусловлена интегродифференцирующей составляющей передаточной функции разомкнутой системы, образованной постоянными времени  $T_R$  и  $T'_R$ , которые определяют инерционность давления в гидравлической сети системы водоснабжения.

### Выводы

1. Линеаризация разложением в степенной ряд системы дифференциальных уравнений, описывающих процессы в гидравлической сети, является с высокой точностью адекватной при отклонениях в окрестности базовой точки на Q-Н характеристике.

2. Применение метода ЛАХ позволило определить коэффициент пропорциональности И-регулятора давления, значение которого не зависит от параметра гидравлического сопротивления трубопровода  $R$ . Это означает, что при изменении потребления в системе горячего водоснабжения статические свойства контура давления не изменяются. Однако моделирование системы «насос-двигатель» при изменении параметра  $R$  показало неудовлетворительные динамические свойства контура давления, выражющиеся в низком быстродействии. Данный недостаток можно устранить компенсированием отклонений параметра сети  $R$  как возмущающего воздействия [7] либо использованием комбинированного управления по возмущению параметра сети  $R$ .

Электропривод насоса с регулированием давления применим не только в системе обслуживания сетей водоснабжения. Также рассматриваются аналогичные электроприводы насосов в системах дозирования жидких сред [8], систем питания котлоагрегатов [9; 10], в других областях промышленности [11], сельского хозяйства и в сфере ЖКХ [12].

### ЛИТЕРАТУРА

1. Жидов, А. Ю. Электропривод консольного насоса / А. Ю. Жидов, В. В. Романченко, В. А. Соловьев // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы II Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 08-12 апреля 2019 г. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2019. – С. 305-308.
2. Тимохин, А. А. Адаптивное управление системы электропривода насоса / А. А. Тимохин, Д. В. Чернышев // Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: материалы 47-й научно-технической кон-



- ференции студентов и аспирантов, Комсомольск-на-Амуре, 10-21 апреля 2017 г. / отв. ред. Э. А. Дмитриев. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2017. – С. 1074-1076.
3. Автоматизированный электропривод промышленных установок / Г. Б. Онищенко [и др.]. – М.: РАСХН, 2001. – 520 с.
  4. Фациленко, В. Н. Регулируемый электропривод насосных и вентиляторных установок горных предприятий: учеб. пособие / В. Н. Фациленко. – М.: Изд-во «Горная книга», 2011. – 260 с.
  5. Чернышев, А. Ю. Электропривод переменного тока: учеб. пособие / А. Ю. Чернышев, Ю. Н. Дементьев, И. А. Чернышев; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 213 с.
  6. Бесекерский, В. А. Теория систем автоматического управления / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Изд-во «Профессия», 2003. – 752 с.
  7. Кузнецова, Т. А. Применение эталонной модели для компенсации влияния возмущающих воздействий в системе электропривода / Т. А. Кузнецова, С. А. Васильченко // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы III Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 06-10 апреля 2020 года. В 3 ч. Ч. 1. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2020. – С. 283-285.
  8. Заглада, А. О. Дозатор технических жидкостей / А. О. Заглада, Р. В. Шибеко // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы IV Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 12-16 апреля 2021 г. В 4 ч. Ч. 2. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2021. – С. 293-295.
  9. Кучеренко, Д. И. Разработка и исследование системы управления питательными насосами котлоагрегатов / Д. И. Кучеренко, В. А. Соловьев // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы III Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 06-10 апреля 2020 г. В 3 ч. Ч. 1. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2020. – С. 290-293.
  10. Кучеренко, Д. И. Разработка и исследование системы стабилизации напора питательного насоса при изменяемой подаче с использованием регулируемого электропривода / Д. И. Кучеренко, В. А. Соловьев // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы III Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 06-10 апреля 2020 г. В 3 ч. Ч. 1. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2020. – С. 294-296.
  11. Разработка и моделирование автоматического привода запорной арматуры локализации центробежного насоса / С. Н. Иванов, М. Ю. Сарилов, А. А. Просолович, У. Е. Решетник // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2019. – № II-1 (38). – С. 69-75.
  12. Хаустов, И. В. Преимущества насосов с частотным управлением и перспективы его применения / И. В. Хаустов, М. В. Головко, С. А. Васильченко // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы II Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 08-12 апреля 2019 года. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2019. – С. 282-285.

Сысоев Е. О., Добрышкин А. Ю., Сысоев О. Е.  
E. O. Sysoev, A. Y. Dobryshkin, O. E. Sysoev

## ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ КОМПОЗИТНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РАЗОМКНУТЫХ ОБОЛОЧЕК

### NUMERICAL INVESTIGATIONS OF VIBRATIONS OF COMPOSITE THIN-WALL CYLINDRICAL OPEN SHELLS

Сысоев Евгений Олегович – кандидат экономических наук, доцент кафедры «Строительство и архитектура» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Evgeny O. Sysoev – PhD in Economics, Associate Professor, Construction and Architecture Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Добрышкин Артём Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительство и архитектура» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Artem Y. Dobryshkin – PhD in Engineering, Associate Professor, Construction and Architecture Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Сысоев Олег Евгеньевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Строительство и архитектура» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Oleg E. Sysoev – Doctor of Technical Sciences, Professor, Construction and Architecture Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

**Аннотация.** Тонкостенные цилиндрические оболочки замкнутой или разомкнутой формы широко применяются в строительстве, где на их основе создают эффективные архитектурные решения зданий и сооружений. Использование тонкостенных оболочек в качестве покрытий имеет ряд экономических преимуществ, т. к. оболочка может перекрыть большие пространства без дополнительных опор. В статье показана необходимость уточнения расчётной модели оболочечных конструкций при воздействии на них вынужденных колебаний. Здесь же представлена новая модель расчёта круговой частоты колебаний тонкостенной цилиндрической железобетонной разомкнутой оболочки при шарнирном опирании. Проведено сравнение результатов, и определена погрешность между полученной расчётной моделью и апробированным компьютерным расчётом, выполненным в программе «Лира – САПР», на основании проведённого численного эксперимента. Определено влияние количества продольных полуволн на круговую частоту колебаний железобетонной разомкнутой оболочки.

**Summary.** Thin-walled cylindrical shells of closed or open shape are widely used in construction, where they are used to create effective architectural solutions for buildings and structures. The use of thin-walled shells as coatings has a number of economic advantages, since the shell can cover large spaces without additional supports. The article shows the need to refine the calculation model of shell structures when exposed to forced vibrations. It also presents a new model for calculating the circular frequency of oscillations of a thin-walled cylindrical reinforced concrete open shell with hinged support. The results are compared and the error between the obtained calculation model and the approved computer calculation performed in the Lira-CAD program is determined on the basis of the numerical experiment. The influence of the number of longitudinal half-waves on the circular frequency of oscillations of a reinforced concrete open shell is determined.

**Ключевые слова:** вынужденные колебания, тонкостенная разомкнутая оболочка, усреднённый модуль упругости.

**Key words:** forced vibrations, thin-walled open shell, average modulus of elasticity.

УДК 624.074.434

**Введение.** Тонкостенные разомкнутые оболочки широко используются при проектировании и строительстве зданий и сооружений, в которых требуются большие пролёты без промежуточных опор (стадионы, концертные залы и т. п.). Сооружения с тонкостенными разомкнутыми

оболочками имеют оптимальное соотношение внутреннего объёма к площади ограждающей поверхности зданий. Вместе тем у использования таких оболочек имеются недостатки – тонкостенные разомкнутые оболочки очень чувствительны к вынужденным колебаниям, возникающим от воздействия внешних сил (ветровые и снеговые нагрузки, работа оборудования и т. п.). Также численные характеристики частоты колебаний тонкостенных оболочек могут меняться из-за различных дополнительных включений на оболочках, таких как отверстие, ребро жёсткости, присоединённая пластина и др. Экспериментальные данные показывают, что эти изменения носят не-пропорциональный характер, что не соответствует общеизвестным результатам теоретических исследований [1], поэтому для расчёта конструкций на динамические колебания требуется создать уточнённые математические модели.

Подход к построению математической модели, основанный на том, что начальные неправильности формы тонкостенной цилиндрической оболочки запускают внутреннее взаимодействие низкочастотных изгибных колебаний с высокочастотными радиальными, предложил Г. С. Лейзерович [2; 3].

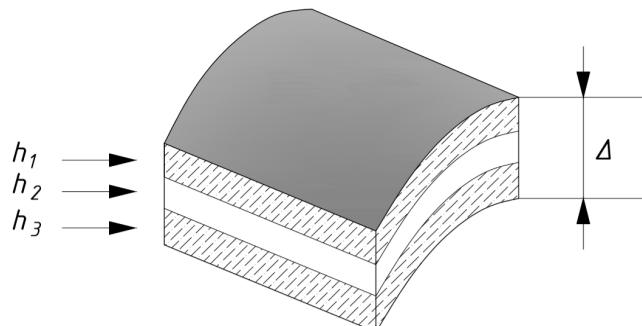
Авторы предлагают новый подход к построению конечномерной модели – формы решения задач колебаний оболочки, несущей малую присоединённую массу [4]. Уточнение математической модели привело к количественно и качественно лучшим результатам, чем известные аналитические решения. В своих более ранних работах авторы аналитически и численно показали, что эффект снижения частоты зависит не только от величины присоединённой массы, как это принято считать в настоящее время, но и от геометрических и волновых параметров оболочки. Предложенный подход обобщён для случая колебаний оболочек уже конечной длины [5–7].

Современные тонкостенные цилиндрические оболочки выполняются из изотропных и ортотропных материалов. В качестве композиционного материала часто используется железобетон, который можно рассматривать как многослойную конструкцию [8–9].

Исследуя численные характеристики колебаний тонкостенных цилиндрических разомкнутых оболочек, воспользуемся теорией пологих оболочек. Необходимо опираться на ведущие теоретические исследования [10–12] для определения частоты колебаний тонкостенных разомкнутых цилиндрических оболочек.

Исследования численных колебаний тонкостенных цилиндрических оболочек редко учитывают тонкостенную цилиндрическую оболочку как многослойную конструкцию, где можно выявить значимость усреднённого модуля упругости на процесс колебания оболочки и определить характер колебаний продольных полуволн, принимаемых в расчёт, и характер круговой частоты колебаний оболочки.

**Теоретические исследования колебаний композиционных тонкостенных цилиндрических разомкнутых оболочек.** Рассмотрим элементарный объём, вырезанный из тонкостенной разомкнутой железобетонной оболочки (см. рис. 1). Принимаем за начальную точку систему координат  $(x, y, z)$  и среднюю поверхность оболочки, а также ведём дугу круга по поперечному сечению  $(x, s)$ . Разрез по толщине оболочки состоит из бетона, в срединной поверхности расположена арматурная сетка, тем самым создаётся трёхслойная композиция.



$h_1, h_3$  – толщина бетонного слоя;  $h_2$  – толщина связующей конструкции (арматура)

Рис. 1. Фрагмент разомкнутой оболочки

Для учёта усреднённого модуля упругости используем

$$E = \frac{1 - \nu^2}{\Delta} \sum_{k=1}^3 \frac{E_k h_k}{1 - \nu_k^2}.$$

Исследование проведено вариационным методом, получены деформационные и колебательные уравнения, а также использованы гипотеза Кирхгофа – Лява и основные закономерности теории упругости.

Если отсутствует воздействие внешних факторов, то уравнения поперечных колебаний тонкостенных цилиндрических разомкнутых оболочек примут следующий вид:

$$\nabla^2 \nabla^2 F = \frac{E \delta}{R} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left( 1 - \frac{h^2}{\beta} \nabla^2 \right) \chi, \quad (1)$$

$$D \left( 1 - \frac{\Theta \delta^2}{\beta} \nabla^2 \right) \nabla^2 \nabla^2 \chi + \frac{1}{R} \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} - \rho h \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left( 1 - \frac{\delta^2}{\beta} \nabla^2 \right) \chi = 0. \quad (2)$$

В уравнении (2) третье слагаемое представляет собой приходящую нагрузку на поверхность. Третье слагаемое  $\rho h$  подразумевается суммированием:

$$\rho h = \sum_{k=1}^3 \rho_k \delta_k.$$

Оператор Лапласа  $\nabla^2 = \frac{\delta^2}{\partial x^2} + \frac{\delta^2}{\partial s^2}$ , а также связь между  $\chi$  и  $\omega$  осуществляются по следующей формуле:

$$\omega = \left( 1 - \frac{\delta^2}{\beta} \nabla^2 \right) \chi.$$

Коэффициент  $\beta$  учитывает модуль поперечного сдвига материала,  $D$  – жёсткость оболочки, состоит из суммы всех слоёв оболочки и коэффициента  $\Theta$ , определяется по следующим уравнениям:

$$D = \frac{E \delta^3}{12(1 - \nu^2)} \Theta, \quad \Theta = \frac{\Theta_1 \Theta_3 - \Theta_2^2}{\Theta_1 \Theta},$$

Коэффициент Пуассона для многослойной конструкции определяется по следующему уравнению:

$$\nu = \sum_{i=3}^3 \frac{E_k h_k \nu_k}{1 - \nu_k^2} \left( \sum_{i=3}^3 \frac{E_k h_k}{1 - \nu_k^2} \right)^{-1},$$

а также

$$\begin{aligned} \Theta_1 &= t_3^2 [1 + 2(\gamma_1 + \gamma_2) - 3(\gamma_1 + \gamma_2)^2], \\ \Theta_2 &= 3t_3 \gamma_3 (\gamma_1 t_1 + \gamma_2 t_2) + 6\gamma_1 \gamma_2 t_3 (t_1 + t_2), \\ \Theta_3 &= 4(\gamma_1 t_1^2 + \gamma_2 t_2^2 - 3(\gamma_1 + \gamma_2)^2), \\ \Theta &= t_3^2 + 4\gamma_1 (t_3^2 + 3t_1 t_3 + 2t_1^2). \end{aligned}$$

При шарнирном опирании цилиндрической оболочки граничные условия примут следующий вид:

$$F = \nabla^2 F = \chi = \nabla^2 \chi = \nabla^2 \nabla^2 \chi = 0 \quad \text{при } x = 0 \text{ и } x = l. \quad (3)$$

Систему уравнений (1), (2) решим с помощью разрешающей функции  $\chi_1$ , которую можно свести к одному уравнению [12–14]:

$$\chi = \nabla^2 \nabla^2 \chi_1, \quad F = \frac{Eh}{R} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left( 1 - \frac{\delta^2}{\beta} \nabla^2 \right) \chi_1.$$

$$D \left( 1 - \frac{\theta \delta^2}{\beta} \nabla^2 \right) \nabla^2 \nabla^2 \nabla^2 \nabla^2 \chi_1 + \frac{Eh}{R^2} \frac{\partial^4}{\partial x^4} \left( 1 - \frac{\delta^2}{\beta} \nabla^2 \right) \chi_1 = \rho h \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left( 1 - \frac{\delta^2}{\beta} \nabla^2 \right) \nabla^2 \nabla^2 \chi_1. \quad (4)$$

Далее граничные условия уравнения (3) относительно функции  $\chi_1$  приобретают следующий вид:

$$\chi_1 = \nabla^2 \chi_1 = \nabla^2 \nabla^2 \chi_1 = \nabla^2 \nabla^2 \nabla^2 \chi_1 = \nabla^2 \nabla^2 \nabla^2 \nabla^2 \chi_1 = 0 \quad \text{при } x = 0 \text{ и } x = l.$$

Решение уравнения (4) может меняться в случае изменения опоры на свободно опёртую и тогда определяется по формуле

$$\chi_1 = \chi_0 e^{i\omega t} \sin \frac{m\pi x}{l} \cos \frac{ns}{R}, \quad (5)$$

где  $m$  – число волн по образующей в продольном направлении тонкостенной цилиндрической оболочки;  $n$  – число волн по поперечному направлению;  $\omega$  – круговая частота поперечных колебаний;  $\chi_0 = \text{const}$ .

Подставляя уравнения (5) в (4), получим уравнение для определения круговой частоты колебания тонкостенных цилиндрических разомкнутых оболочек:

$$\omega^2 = \left[ DB \left( 1 - \frac{\theta h^2}{\beta} B \right) + \frac{Eh}{R^2} \left( \frac{m\pi}{l} \right)^4 \left( 1 - \frac{h^2}{\beta} B \right) \right] \cdot \left[ \rho h \left( 1 - \frac{h^2}{\beta} B \right) \right]^{-1},$$

$$\text{где } B = - \left( \left( \frac{m\pi}{l} \right)^2 + \left( \frac{n}{R} \right)^2 \right).$$

**Результаты.** Для сравнения результатов и определения погрешности между полученной расчётной моделью и апробированным компьютерным расчётом, выполненным в программе «Лира – САПР», была рассмотрена тонкостенная железобетонная разомкнутая оболочка из бетона класса В20 с модулем упругости (Юнга)  $E = 2,75 \cdot 10^4$  МПа, плотностью  $\rho = 2100$  кг/м<sup>3</sup>, коэффициентом Пуассона  $\nu = 0,2$ , длиной  $l = 4$  м, радиусом  $R = 2$  м, толщиной  $\delta = 12$  см. Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Зависимость круговой частоты колебаний железобетонной разомкнутой оболочки от полуволн

Эскиз	Количество волн, $n$	Частота колебаний $\omega$ , Гц	Частота колебаний, полученная при расчёте в ПО «Лира – САПР», Гц	Относительная погрешность, %
	2	68,22	62,48	8,4
	3	204,54	197,41	3,48
	4	380,33	374,2	1,6

При определении частот колебаний методом конечных элементов (МКЭ) в ПО семейства «Лира – САПР» исследуемая оболочка была разбита на 50 конечных элементов по длине и 25 по ширине. Результаты расчётов приведены в табл. 1, и по результатам выявлена погрешность от 8,44 до 1,6 % (см. рис. 2).



Рис. 2. Зависимость частоты колебания от количества полуволн оболочки из бетона класса B20

### Заключение

В процессе численного эксперимента определено влияние количества продольных полуволн на круговую частоту колебаний тонкостенной железобетонной разомкнутой оболочки. С увеличением полуволн частота колебаний оболочки увеличивается, а начальные расхождения в 8,4 % между полученной расчётной моделью и апробированным компьютерным расчётом, выполненным в программе «Лира – САПР», стремятся к нулю. Для определения, какая модель расчёта отвечает реальной работе конструкции, необходимо провести натурный эксперимент.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Власов, В. З. Общая теория оболочек и её приложение в технике / В. З. Власов. – М.-Л.: Гостехиздат, 1949. – 784 с.
2. Leizerovich G. S., Taranukha N. A., Nonobvious features of dynamics of circular cylindrical shells, Mechanics of Solids, 43:2 (2008), 246–253.
3. Кубенко, В. Д. Нелинейное взаимодействие форм изгибных колебаний цилиндрических оболочек / В. Д. Кубенко, П. С. Ковальчук, Т. С. Краснопольская. – Киев: Наукова думка, 1984. – 220 с.
4. Серёгин, С. В. О расщеплении изгибного частотного спектра геометрически несовершенных оболочек / С. В. Серёгин // Пром-Инжиниринг: труды V Всероссийской научно-технической конференции. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2019. – С. 48-51.
5. Серёгин, С. В. Влияние асимметричных начальных несовершенств формы на свободные колебания тонких оболочек / С. В. Серёгин // Пром-Инжиниринг: труды V Всероссийской научно-технической конференции. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2019. – С. 69-71.
6. Тарануха, Н. А. Экспериментальное исследование колебаний стальной балки с целью определения коэффициентов демпфирования материала на основе идеи предельного перехода с помощью лазерного виброметра / Н. А. Тарануха, Мин Ко Ко // Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – Т. 2. – № 2 (52). – С. 117-122.
7. Серёгин, С. В. Радиальные колебания кольцевых элементов машин / С. В. Серёгин // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов. – 2019. – № 1. – С. 78-83.
8. Мин, Ко Ко. Методология исследований колебаний конструкций с помощью лазерного виброметра / Мин Ко Ко, Н. А. Тарануха // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы III Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, 06-10 апреля 2020 г. В 3 ч. Ч. 3 / редкол.: Э. А. Дмитриев (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2020. – С. 421-424.



9. Y. Xing, B. Liu, and T. Xu. Exact solutions for free vibration of circular cylindrical shells with classical boundary conditions // International Journal of Mechanical Sciences, 2013, vol. 75, pp. 178-188.
10. Васильев, А. С. Численное моделирование в задачах нелинейной механики строительных конструкций из композитных материалов: моногр. / А. С. Васильев, Н. А. Тарануха. – Биробиджан: ПГУ им. Шолом-Алейхема, 2019. – 156 с.
11. M. Chen, K. Xie, W. Jia, and K. Xu. Free and forced vibration of ring-stiffened conical – cylindrical shells with arbitrary boundary conditions // Ocean Engineering, 2015, vol. 108, pp. 241-256.
12. Hautsch N., Okhrin O., Ristig A. Efficient iterative maximum likelihood estimation of highparameterized time series models, Berlin, Humboldt University, 2014, 34 p.

МАШИНОСТРОЕНИЕ  
MECHANICAL ENGINEERING

**Кравченко Е. Г., Афанасьева С. А., Кравченко А. К., Пачурина С. Б.**  
**E. G. Kravchenko, S. A. Afanaseva, A. K. Kravchenko, S. B. Pachurina**

**РАСШИРЕНИЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПОРТАТИВНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ  
ТВЁРДОСТИ ПРИ КОНТРОЛЕ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ**

**EXTENSION OF APPLICATION FIELD OF PORTABLE HARDNESS METERS IN MACHINE  
BUILDING PRODUCTS CONTROL**

**Кравченко Елена Геннадьевна** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ek74@list.ru.

**Elena G. Kravchenko** – PhD in Engineering, Assistant Professor, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ek74@list.ru.

**Афанасьева Светлана Алексеевна** – инженер по метрологии филиала ФБУ «Государственный региональный центр стандартизации, метрологии и испытаний в г. Комсомольске-на-Амуре Хабаровского края» (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

**Svetlana A. Afanaseva** – Metrology Engineer, State Regional Center for Standardization, Metrology and Testing in Komsomolsk-on-Amur, Khabarovsk Territory (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

**Кравченко Андрей Константинович** – студент Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

**Andrey K. Kravchenko** – Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

**Пачурина Светлана Борисовна** – студент Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

**Svetlana B. Pachurina** – Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

**Аннотация.** Одним из важнейших критериев качества промышленных изделий является соблюдение соответствия физико-механических свойств нормативным требованиям. Одной из наиболее значимых физико-механических характеристик материалов является твёрдость, значения которой контролируются на всех этапах создания и эксплуатации техники. Проблема их определения непосредственно на изделиях неразрушающим способом имеет огромную актуальность и экономическую значимость. Любое отклонение свойств от заданных величин может привести к аварийной или катастрофической ситуации на этапе эксплуатации техники. Большинство портативных твердомеров, применяемых на машиностроительных производствах для измерения твёрдости образцов, имеют ряд ограничений. Ограниченные конструктивные характеристики (размер, масса, форма) и ограниченное инструкцией по эксплуатации количество марок материалов существенно сужают область применения подобных приборов. В этой связи была разработана методика измерения портативным твердомером TH130, отличительной особенностью которой является расширение области его применения, а именно возможность измерения твёрдости малогабаритных и лёгких образцов при различных способах крепления к основанию. Предложенная методика устанавливает требования к применению метода измерения твёрдости HL Либа, позволяющего достоверно определять твёрдость материалов и покрытий (как правило, толстослойных), применяемых при изготовлении изделий на машиностроительных и metallurgicalических предприятиях.

**Summary.** One of the most important criteria for the quality of industrial products is compliance of physical and mechanical properties with regulatory requirements. One of the most significant physical and mechanical characteristics of materials is hardness, the values of which are controlled at all stages of the creation and operation of equipment. The problem of defining them directly on products in a non-destructive way is of great relevance and economic importance. Any deviation of properties from the specified values can lead to an emergency or catastrophic situation at the stage of operation of the equipment. Most portable hardeners used in machine-building plants for measuring the hardness of samples have a number of limitations. The limited design characteristics (size, weight, shape) and the limited number of material grades by the operating manual significantly narrow the scope of such devices. In this connection, a measurement technique for a portable TH130 solid meter has been developed, a



feature of which is the expansion of its field of application, namely, the ability to measure the hardness of small and light samples in various methods of attachment to the base. The proposed technique establishes requirements for the application of the HL Lib hardness measurement method, which allows to reliably determine the hardness of materials and coatings (as a rule, thick-layer) used in the manufacture of products at machine-building and metallurgical enterprises.

**Ключевые слова:** твёрдость, метод измерения твёрдости, шкала твёрдости, область применения, портативный твердомер, методика измерения.

**Key words:** hardness, hardness measurement method, hardness scale, field of application, portable hardness meter, measurement method.

УДК 620.178

## Введение

Твёрдость – одна из важнейших механических характеристик материалов. Её измерения широко распространены в промышленности при контроле технологических процессов, определении эксплуатационных характеристик изделий, выборе режимов механической обработки и типа режущего инструмента. Однако проблема количественного измерения твёрдости окончательно не решена до сих пор. Объясняется это тем, что твёрдость не является однозначной функцией основных (первичных) физических величин, а зависит от их сочетания, а также методики измерения.

В условиях современного машиностроительного производства остро стоит проблема возможности измерения твёрдости образцов вне лабораторных условий ввиду их габаритов. Поэтому объектом исследования был выбран портативный твердомер TH130, применяемый на большинстве машиностроительных предприятий для измерения твёрдости материалов и покрытий деталей, а также сборочных единиц методом измерения твёрдости HL Либа. На основе анализов практического опыта эксплуатации прибора были выявлены следующие проблемы:

- минимальная масса исследуемого образца составляет 5 кг, а толщина 5 мм;
- при измерении небольших образцов с привязкой к основанию возникают несистематические погрешности измерения;
- наблюдается существенный разброс показаний прибора: при различных способах крепления малогабаритного и лёгкого образца к основанию; при регулировании усилия воздействия твердомера на образец; при оказании одинакового времени воздействия прибора на материал образца; при удержании прибора в статическом состоянии во время испытания.

Анализ национальной нормативной базы в данной области неразрушающего контроля в Российской Федерации подобных методик измерения твёрдости не выявил. В связи с этим разработка методики по использованию портативного твердомера для измерения твёрдости малогабаритных и лёгких образцов с расширенной областью применения в практической деятельности предприятий и организаций является актуальной.

## Метод измерения твёрдости по Либу

Суть метода заключается в том, что движущийся ударник при вертикальном падении сталкивается с поверхностью образца и отскакивает. При этом скорость ударника измеряется до и после удара. Количество энергии, поглощённое или рассеиваемое испытуемым образцом, определяет динамическую твёрдость по Либу.

Твёрдость по Либу (HL) рассчитывается в соответствии с уравнением

$$HL = \frac{V_R}{V_A} * 1000,$$

где  $V_R$  – скорость отскока;  $V_A$  – скорость удара.

Сравнительный анализ методов измерения твёрдости показал, что:

1. В условиях проведения испытания для методов Бринелля, Роквелла и Шора шероховатость образцов должна быть не более 2,5 мкм, для метода Виккерса она должна быть 0,16 мкм.

Однако для метода Либа [1; 2] шероховатость может варьироваться от 7 до 0,4 мкм [6; 7] в зависимости от типа преобразования.

2. Для методов Бринелля, Роквелла, Виккерса необходимо подготавливать образцы твёрдости материалов для измерения твёрдости. Методами Шора и Либа можно измерять сами детали. Однако имеются ограничения по массе. Для метода Шора минимальная масса составляет 5 кг. Для метода Либа она варьируется от 15 до 1,5 кг в зависимости от типа преобразования.

3. С помощью метода Либа можно измерить большее количество марок материалов, в отличие от других методов измерения твёрдости, которые ограничены твёрдостью.

### Портативный твердомер TH130

Портативный твердомер TH130 (см. рис. 1) – современный интегральный тестер твёрдости, компактный, с высокой точностью измерений, широким диапазоном измерений, удобный в эксплуатации. Предназначен для измерения твёрдости металлов и имеет широкое применение во многих отраслях промышленности во всём мире.

Он объединяет в себе одно целое универсальное ударное устройство типа *D* и процессор. Прибор автоматически вычисляет значения твёрдости по Виккерсу (Vickers), Бринеллю (Brinell), Роквеллу (Rockwell) и Шору (Shore).

Метод измерения TIME TH130 основан на определении отношения скорости отскока к скорости соударения.

### Технические характеристики

Абсолютная погрешность измерений: единиц HLD  $\pm 6$ .

Диапазон измерений и шкалы представлены в табл. 1.



1 – интегральный элемент соударения;  
2 – вход для зарядного устройства;  
3 – вход для подключения принтера;  
4 – жидкокристаллический дисплей;  
5 – выключатель мощности;  
6 – кнопка пуска ударного элемента;  
7 – катушка; 8 – опорное кольцо;  
9 – нагружающее захватное  
устройство

Рис. 1. Портативный твердомер TH130

Таблица 1  
Диапазоны измерений, материалы и шкалы измерений портативного твердомера TH130

Материал	Твёрдость						
	HLD	HB	HRC	HRB	HRA	HV	HSD
Сталь и литая сталь	200-900	93-674	17,9-68,5	59,6-99,2	59,1-85,8	83-976	32,2-99,5
Сплавы и инструментальная сталь			20,4-67,1			80-898	
Нержавеющая сталь		85-655	19,6-62,4	46,5-99,9		85-862	
Серый чугун		93-334					
Зернистый литой чугун		131-387					
Литые алюминиевые сплавы		27-159					
Медно-цинковые сплавы (латунь)		40-173		13,5-95,9			
Медные сплавы олова (бронза)		60-290					
Деформируемые медные сплавы		45-315					



Сравнительный анализ портативных твердомеров показал, что портативный твердомер TH130 удобен в использовании для измерения крупногабаритных деталей, малогабаритных деталей и деталей сложной формы. Он имеет широкий диапазон измерений в числах HLD и может их преобразовывать в числах твёрдости HB, HRC, HRB, HRA, HV, HSD. Имеет возможность измерения в любом пространственном положении. Имеет диапазон измерений по большинству марок металлов.

### Перечень использованного оборудования

1. Оптико-эмиссионный спектроанализатор Bruker Elemental Q4 Tasman применялся для определения концентрации элементов в металлических образцах. Был проанализирован химический состав металлов и сплавов (образцов), элементный анализ различных металлов и сплавов на железной, алюминиевой, медной, титановой и никелевой основах.

2. Твердомер TH600. Прибор для определения твёрдости TH600 использует принципы проведения испытаний по методу Бринелля. Твердомер подходит для проведения исследований незакалённой стали, чугуна, цветных металлов, мягких подшипниковых сплавов и других материалов. Твёрдость измеряется по шкале HB.

3. Портативный твердомер TH130 предназначен для измерения твёрдости металлов. Он автоматически вычисляет значения твёрдости по Виккерсу (Vickers), Бринеллю (Brinell), Роквеллу (Rockwell) и Шору (Shore). Метод измерения основан на определении отношения скорости отскока к скорости соударения.

### Исследуемые материалы и их состав

Для проведения испытаний было взято три образца материала: алюминиевые сплавы марок D16 и AMg5, а также титановый сплав марки BT22, т. к. эти материалы отсутствуют в паспорте прибора.

Образцы были выбраны для расширения количества марок материала в инструкции по эксплуатации, а также области применения портативного твердомера TH130. Данные марки материалов широко применяются в разных отраслях промышленности ввиду их высоких эксплуатационных характеристик [4].

### Экспериментальная часть и обработка результатов измерений

Для портативного твердомера TH130 важен вес образца, т. к. от этого зависит способ крепления. Если образец металла или деталь массой меньше 5 кг, то нужно закрепить его с помощью дополнительного оборудования (например, основания весом 5 кг) и после этого проводить испытания на твёрдость.

Экспериментальным путём было выявлено, что способ крепления образца весом менее 2 кг не оказывает значимого влияния на результат измерения (пределы абсолютной погрешности находились в допускаемом диапазоне).

По результатам многократных измерений была проведена оценка случайной погрешности и определён интервал, где с заданной вероятностью лежит истинное значение твёрдости. То есть на рабочей или опорной поверхности выполнялось 10 измерений, равномерно распределённых по всей поверхности. Значения, как правило, отличаются друг от друга, но если данные измерения проводились в одинаковых условиях и с одинаковой тщательностью, то заслуживают одинакового доверия.

Была проведена обработка результатов измерений в соответствии с методикой обработки результатов многократных равноточных измерений [5]. Расчёт основных параметров проводился по шести этапам:

1. Размах

$$R_n = X_{\max} - X_{\min}.$$

2. Среднее арифметическое значение

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}.$$

3. Средняя квадратическая погрешность

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}.$$

4. Среднее арифметическое отклонение (СКО)

$$S_{\bar{x}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n(n-1)}}.$$

5. Границы доверительного интервала для случайной погрешности

$$\Delta = \pm t_p * S_{\bar{x}}.$$

6. Окончательный результат

$$\bar{x} = x \pm \Delta.$$

Обработка результатов измерений исследуемых материалов представлена в табл. 2.

Таблица 2  
Результаты измерений твёрдости алюминия Д16, алюминия АМг5 и титана ВТ22

Материал	Обозначение	Результат	
		Твердомер TH600	Твердомер TH130
Алюминий марки Д16	$R_n$	4	5
	$\bar{X}$	148	147
	$S_x$	1,5	1,9
	$S_{\bar{x}}$	0,5	0,6
	$\Delta$	1,13	1,36
	$\bar{x}$	$148 \pm 1,13$	$147 \pm 1,36$
Алюминий марки АМг5	$R_n$	1,2	15
	$\bar{X}$	77,3	80
	$S_x$	0,4	5,14
	$S_{\bar{x}}$	0,1	1,6
	$\Delta$	0,226	3,62
	$\bar{x}$	$77,3 \pm 0,23$	$80 \pm 3,62$
Титан марки ВТ22	$R_n$	5	19
	$\bar{X}$	373	566
	$S_x$	1,9	6,6
	$S_{\bar{x}}$	0,6	2,1
	$\Delta$	1,36	4,75
	$\bar{x}$	$373 \pm 1,36$	$565 \pm 4,75$

**Методика измерения твёрдости методом Либа с учётом расширенной области применения прибора**

За основу разработки методики измерения с учётом расширенной области применения были взят ГОСТ 8.010-2013 [3] и инструкция по эксплуатации портативного твердомера TH130. В основе предложенной методики лежит разработанная процедура для точного преобразования твёрдости по Бринеллю в шкалу твёрдости по Либу.



Перевод заданной величины твёрдости по шкале Либа к значениям, полученным с помощью других методов измерения, переход от одного значения твёрдости к другому или от значения твёрдости к значению предела прочности может быть осуществлён при помощи достоверной базы данных, полученной на основе сравнительных исследований.

Поправочный коэффициент вводится для металлов, которые не предусмотрены инструкцией по эксплуатации портативного твердомера TH130. Рассчитывается поправочный коэффициент по формуле [8; 9]

$$\frac{P_i}{p_j} = K_i, \quad (1)$$

где  $P_i$  – показания стационарного твердомера TH600;  $p_j$  – показания портативного твердомера TH130.

**Пример:**

$$\frac{P_1}{p_1} = K_1; \quad \frac{P_1}{p_2} = K_1; \quad \frac{P_1}{p_n} = K_1; \quad \frac{P_1}{p_{10}} = K_1.$$

Таким образом, получают 10 значений коэффициента  $K_1$ . Таким же образом высчитываются остальные 9 коэффициентов. После того как по формуле (1) рассчитаны коэффициенты, вычисляется среднее арифметическое значение, которое будет поправочным коэффициентом данного металла:

$$\frac{\sum K_k}{n} = K.$$

Поправочный коэффициент умножается на полученные значения твёрдости по Либу. В табл. 3 и 4 приведены расчёты поправочного коэффициента для алюминиевых сплавов марок Д16 и АМг5. Значения чисел твёрдости по Бринеллю приведены для шарика  $D = 10$  при нагрузке для алюминия 9807 Н.

Таблица 3  
Поправочный коэффициент для алюминиевого сплава марки Д16

Номер измерения	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Показания TH600	150	146	149	148	146	147	149	150	148	147
Показания TH130	149	144	145	149	146	148	147	145	149	146
Коэффициент 1	1,007	1,042	1,034	1,007	1,027	1,014	1,020	1,034	1,007	1,027
Коэффициент 2	0,980	1,014	1,007	0,980	1,000	0,986	0,993	1,007	0,980	1,000
Коэффициент 3	1,000	1,035	1,028	1,000	1,021	1,007	1,014	1,028	1,000	1,021
Коэффициент 4	0,993	1,028	1,021	0,993	1,014	1,000	1,007	1,021	0,993	1,014
Коэффициент 5	0,980	1,014	1,007	0,988	1,000	0,986	0,993	1,007	0,980	1,000
Коэффициент 6	0,987	1,021	1,014	0,987	1,007	0,993	1,000	1,014	0,987	1,007
Коэффициент 7	1,000	1,035	1,028	1,000	1,021	1,007	1,014	1,028	1,000	1,021
Коэффициент 8	1,007	1,042	1,034	1,007	1,027	1,014	1,020	1,034	1,007	1,027
Коэффициент 9	0,993	1,028	1,021	0,993	1,014	1,000	1,007	1,021	0,993	1,014
Коэффициент 10	0,987	1,021	1,014	0,987	1,007	0,993	1,000	1,014	0,987	1,007

Таблица 4  
Поправочный коэффициент для алюминиевого сплава марки АМг5

Номер измерения	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Показания TH600	76,7	77,9	77,1	77,5	76,8	77,4	77,2	77,6	76,9	77,8
Показания TH130	76	87	74	89	75	80	85	79	81	78
Коэффициент 1	1,009	0,882	1,036	0,862	1,023	0,959	0,902	0,971	0,947	0,983
Коэффициент 2	1,025	0,895	1,053	0,875	1,039	0,974	0,916	0,986	0,962	0,999

Продолжение табл. 4

Номер измерения	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Коэффициент 3	1,014	0,886	1,042	0,866	1,028	0,964	0,907	0,976	0,952	0,988
Коэффициент 4	1,020	0,891	1,047	0,871	1,033	0,969	0,912	0,981	0,957	0,994
Коэффициент 5	1,011	0,883	1,038	0,863	1,024	0,960	0,904	0,972	0,948	0,985
Коэффициент 6	1,018	0,890	1,046	0,870	1,032	0,968	0,911	0,980	0,956	0,992
Коэффициент 7	1,016	0,887	1,043	0,867	1,029	0,965	0,908	0,977	0,953	0,990
Коэффициент 8	1,021	0,892	1,049	0,872	1,035	0,970	0,913	0,982	0,958	0,995
Коэффициент 9	1,012	0,884	1,039	0,864	1,025	0,961	0,905	0,973	0,949	0,986
Коэффициент 10	1,024	0,894	1,051	0,874	1,037	0,973	0,915	0,985	0,960	0,997

Значения чисел твёрдости по Бринеллю приведены для шарика  $D = 10$  при нагрузке для титана 29 420 Н. В табл. 5 приведены поправочные коэффициенты для титанового сплава ВТ22.

Таблица 5  
Поправочный коэффициент для титанового сплава марки ВТ22

Номер измерения	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Показания TH600	373	375	370	374	372	371	370	373	375	374
Показания TH130	569	556	574	555	572	567	570	568	560	565
Коэффициент 1	0,656	0,671	0,650	0,672	0,652	0,658	0,654	0,657	0,666	0,660
Коэффициент 2	0,659	0,674	0,653	0,676	0,656	0,661	0,658	0,660	0,670	0,664
Коэффициент 3	0,650	0,665	0,645	0,667	0,647	0,653	0,649	0,651	0,661	0,655
Коэффициент 4	0,657	0,673	0,652	0,674	0,654	0,660	0,656	0,658	0,668	0,662
Коэффициент 5	0,654	0,669	0,648	0,670	0,650	0,656	0,653	0,655	0,664	0,658
Коэффициент 6	0,652	0,667	0,646	0,668	0,649	0,654	0,651	0,653	0,663	0,657
Коэффициент 7	0,650	0,665	0,645	0,667	0,647	0,653	0,649	0,651	0,661	0,655
Коэффициент 8	0,656	0,671	0,650	0,672	0,652	0,658	0,654	0,657	0,666	0,660
Коэффициент 9	0,659	0,674	0,653	0,676	0,656	0,661	0,658	0,660	0,670	0,664
Коэффициент 10	0,657	0,673	0,652	0,674	0,654	0,660	0,656	0,658	0,668	0,662

В табл. 6 приведены поправочные коэффициенты для алюминиевых сплавов Д16 и АМг5, а также титанового сплава марки ВТ22.

Таблица 6  
Поправочные коэффициенты для алюминиевых сплавов Д16 и АМг5  
и титанового сплава марки ВТ22

Материал	HLD	HB	Поправочный коэффициент
Деформируемые алюминиевые сплавы	485-502	74-89	0,965
	520-537	144-149	1,008
Деформируемый титановый сплав	752-763	574-555	0,659

### Заключение

Предложенная последовательность действий, реализованная в виде методики измерения, представляет собой технологию расширения области применения портативного твердомера, что обеспечивает измерения малогабаритных изделий, что ранее отсутствовало.

Результат исследования ускоряет процесс измерения твёрдости вне лаборатории на различных группах образцов и материалов. Разработанная методика рекомендуется к применению на машиностроительных предприятиях при измерении твёрдости малогабаритных, лёгких по массе и сложных по форме образцов вне лаборатории.

## ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 23273-78. Металлы и сплавы. Измерение твёрдости методом упругого отскока бойка (по Шору) = Metals and alloys. Measurement of Shore hardness (method of striker recoil): Государственный стандарт Союза ССР: издание официальное: утверждён и введён в действие постановлением Государственного комитета ССР по стандартам от 13 сентября 1978 г. № 2494: дата введения 1980-01-01. – М.: Издательство стандартов, 1985. – 3 с.
2. ИСО 16859-2:2015. Металлические материалы. Определение твёрдости по Либу. Часть 2. Проверка и калибровка испытательных приборов = Metallic materials. Leeb hardness test. Part 2: Verification and calibration of the testing devices: дата введения 2016-02-01. – 18 с.
3. ГОСТ 8.010-2013 Государственная система обеспечения единства измерений. Методики выполнения измерений. Основные положения = State system for ensuring the uniformity of measurements. Procedures of measurements. Main principles: межгосударственный стандарт: издание официальное: утверждён и введён в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 ноября 2013 г. № 2122-ст: введён впервые: дата введения 2015-05-01 / разработан Федеральным государственным унитарным предприятием «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы» (ФГУП «ВНИИМС»). – М.: Стандартформ, 2014. – 11 с.
4. Материаловедение: учеб. для студентов вузов / В. С. Кушнер, А. С. Верещака, А. Г. Схиртлаздзе, Д. А. Негров, О. Ю. Бургонова; под ред. В. С. Кушнера. – Омск: ОмГТУ, 2008. – 232 с.
5. Сергеев, А. Г. Метрология, стандартизация и сертификация: учеб. / А. Г. Сергеев, В. В. Терегеря. – М.: Юрайт, 2011. – 820 с.
6. Саблин, П. А. Обеспечение качества обработанной поверхности при изготовлении деталей судового назначения / П. А. Саблин, Т. А. Отряскина, В. С. Щетинин // Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – № 2-2 (52). – С. 54-59.
7. Саблин, П. А. Обеспечение качества поверхности при обработке упрочнённых закалённых сталей, титановых сплавов и полимерных композиционных материалов / П. А. Саблин, В. С. Щетинин // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2021. – Т. 17. – № 6 (198). – С. 263-268.
8. Саблин, П. А. Обеспечение качества поверхности при обработке упрочнённых закалённых сталей, титановых сплавов и полимерных композиционных материалов / П. А. Саблин, В. С. Щетинин // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2021. – Т. 17. – № 8 (200). – С. 368-370.
9. Афанасьева, С. А. Определение поправочного коэффициента на портативном твердомере TH 130 / С. А. Афанасьева, Е. Г. Кравченко // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 2019 г. В 2 ч. Ч. 1 / редкол.: Э. А. Дмитриев (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2019. – С. 21-24.

**Максимов И. С., Галанский С. А., Мустафин А. Г.**

**I. S. Maksimov, S. A. Galansky, A. G. Mustafin**

## **ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ РЕЛЬСОВ В ПУТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПОЗИЦИОННЫХ АБРАЗИВНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ**

### **OBJECT-ORIENTED DESIGN OF THE RAIL GRINDING PROCESS USING COMPOSITE ABRASIVE TOOLS**

**Максимов Илья Сергеевич** – старший преподаватель Самарского государственного университета путей сообщения (Россия, Самара); 443066, Россия, г. Самара, ул. Свободы, 2В; тел. +7(927)694-36-53.

**Пуя S. Maksimov** – Senior Lecturer, Samara State Transport University (Russia, Samara); 2 V Svoboda str., Samara, 443066, Russia; tel. +7(927)694-36-53.

**Галанский Сергей Анатольевич** – кандидат технических наук, доцент Самарского государственного университета путей сообщения (Россия, Самара); 443066, Россия, г. Самара, ул. Свободы, 2В; тел. +7(917)111-72-82.

**Sergey A. Galansky** – PhD in Engineering, Assistant Professor, Samara State Transport University (Russia, Samara); 2 V Svoboda str., Samara, 443066, Russia; tel. +7(917)111-72-82.

**Мустафин Артур Галимзянович** – заведующий лабораторией Самарского государственного университета путей сообщения (Россия, Самара); 443066, Россия, г. Самара, ул. Свободы, 2В; тел. +7(987)917-15-06.

**Artyr G. Mustafin** – Head of the Laboratory, Samara State Transport University (Russia, Samara); 2 V Svoboda str., Samara, 443066, Russia; tel. +7(987)917-15-06.

**Аннотация.** Приводятся данные о шлифовании рельсов рельсошлифовальными поездами на железных дорогах России и за рубежом. Описаны недостатки шлифования рельсов традиционными абразивными кругами. Показаны новые конструкции композиционных кругов для шлифования рельсов.

**Summary.** The data on the grinding of rails by rail grinding trains on the railways of Russia and abroad are presented. The disadvantages of grinding rails with traditional abrasive wheels are described. New designs of composite wheels for rail grinding are shown.

**Ключевые слова:** железнодорожный путь, шлифование рельсов, абразивный круг, композиционный шлифовальный круг для торцевого шлифования.

**Key words:** railway track, rail grinding, abrasive wheel, composite grinding wheel for face grinding.

УДК 625.144

Большое влияние на процесс шлифования рельсов оказывают физико-механические характеристики абразивного инструмента. При шлифовании термообработанных рельсов с высокой твёрдостью применяют абразивные круги на бакелитовой или керамической связке из электрокорунда нормального или белого (ГОСТ Р 52781-2007). Обычно круги имеют зернистость 125, 100, 80.

Процесс обработки рельсов сопровождается изнашиванием металла и разрушением самого абразива. Последнее представляет собой выкрашивание, раздавливание, образование сколов. Этот процесс связан с непрерывным обновлением изнашивающей способности поверхности твёрдого абразива по отношению к металлу [5].

В механизме внешнесилового воздействия твёрдой абразивной частицы на поверхности изнашивания при скольжении можно выделить два этапа.

Первый этап характеризуется воздействием абразивной частицы на поверхность изнашивания и завершается её внедрением в металл поверхностного слоя. При этом твёрдость и проч-

ность абразивной частицы должны быть существенно выше твёрдости металла изнашиваемой поверхности.

На втором этапе абразивные частицы, внедрившись в металл на определённую глубину, совершают поступательное перемещение по поверхности изнашивания, осуществляя при этом сложный процесс разрушения путём пластического деформирования, микрорезания, упругого оттеснения, дробления и т. д.

Интенсивность удаления металла определяется соотношением: прочностных характеристик абразива и металла; твёрдости абразива и обрабатываемого изделия, что определяет способность внедряться в металл и разрушать его при движении путём резания и деформации.

При высоких нагрузках монолитного абразива на обрабатываемый металл может произойти качественное изменение механизма изнашивания; это будет в случае перерастания абразивного изнашивания в тепловое. В условиях высокого разогрева качественно меняются условия взаимодействия абразива и обрабатываемой поверхности, в том числе возможно изменение физико-механических характеристик металла головки рельса – так называемые прижоги металла.

Качество связки и технология термообработки абразивного инструмента (при его изготовлении) при прочих равных условиях взаимодействия абразива и обрабатываемого изделия определяют уровень получаемой шероховатости последнего.

Бакелитовая связка шлифовальных кругов представляет собой бакелитовую смолу в виде порошка и бакелитового лака. Это наиболее распространённая из органических связок. Круги на бакелитовой связке обладают высокой прочностью и эластичностью, устойчивы при переменных нагрузках, но пористость их ниже, чем у кругов на керамической связке. Круги на бакелитовой связке работают при скоростях 35...70 м/с и более. Недостатком данных кругов является то, что если температура круга достигает более 3000 °C, связка быстро выгорает, а зёरна легко выкрашиваются. Под действием щелочных жидкостей бакелитовая связка частично разрушается, а потому применение охлаждающих жидкостей с содержанием соды (для очистки рабочей поверхности круга от стружки) более 1,5 % не рекомендуется.

При изготовлении абразивных кругов на керамической связке между отдельными частицами абразива и связкой образуются пустоты – поры. Порами называют маленькие пустоты в круге, в которых размещается стружка, образующаяся при шлифовании. Если стружка задержится в порах, то при соприкосновении с обрабатываемой поверхностью она нагреется, расплавится и плотно закроет все поры, в результате режущая способность круга снизится. Шлифовальные круги, изготовленные на керамической связке, прочны, обладают хорошей термохимической стойкостью и хорошо сохраняют профиль. Недостаток – высокая хрупкость.

Для повышения эффективности обработки рельсов предложен новый композиционный чашечный шлифовальный круг, который выполнен в виде тела с рабочей абразивной поверхностью, ограниченной внутренней и внешней окружностями, образованный чередующимися режущими элементами двух типов с одинаковой твёрдостью и зернистостью, которые на боковой поверхности круга выполнены в форме трапеций, большие основания которых расположены противоположно друг другу. Причём первый тип режущих элементов представляет собой основу, выполненную из абразивных зёрен на керамической связке, а второй тип – из абразивных зёрен на бакелитовой связке, в то же время указанные элементы выполнены в виде сегментов, равномерно чередующихся по всей плоскости одной из торцевых поверхностей круга, а боковые поверхности каждого из сегментов выполнены в виде спирали, простирающейся от внутренней до внешней окружности тела круга [3].

Ширина каждой спирали режущих элементов на бакелитовой связке, образованной на торцевой поверхности круга от его внутренней до внешней окружности, постоянна, при этом ширина всех спиралей между собой одинакова (см. рис. 1 и 2).

Ширина каждого из сегментов, образованных режущими элементами на керамической связке, больше, чем ширина сегментов, образованных режущими элементами на бакелитовой связке.

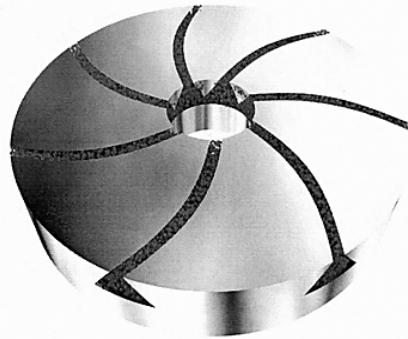


Рис. 1. Чашечный цилиндрический композиционный шлифовальный круг

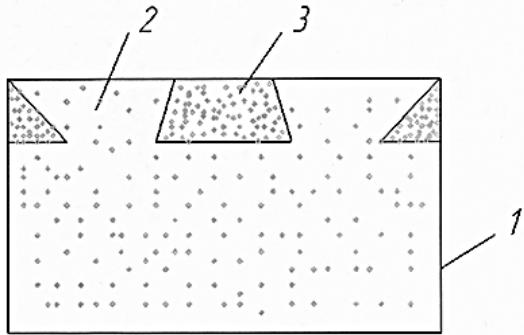


Рис. 2. Вид спереди на часть боковой поверхности круга

Предпочтительно, чтобы трапеции, образованные чередующимися режущими элементами двух типов на боковой поверхности круга, были выполнены равнобокими.

Чашечный цилиндрический композиционный шлифовальный круг (см. рис. 1) выполнен в виде тела с рабочей абразивной поверхностью, ограниченной внутренней (посадочное отверстие) и внешней окружностями.

Поверхность тела круга образована чередующимися режущими элементами двух типов, которые на боковой поверхности круга выполнены в форме равнобоких трапеций, большие основания которых расположены противоположно друг другу. При этом основания трапеций этих элементов, как это видно из рис. 2, ограничены с одной стороны торцевой поверхностью круга, а с другой – пунктирной линией, которая показывает толщину, на которую заделаны режущие элементы на бакелитовой связке. Это толщина составляет  $1/3\dots1/2$  толщины круга, предпочтительно  $1/3$ .

Режущие элементы первого типа 2, площадь которых составляет  $70\dots85\%$  от всей площади шлифовального круга, выполнены из абразивных зёрен на керамической связке, а элементы второго типа 3, площадь которых составляет  $15\dots30\%$  от всей площади шлифовального круга, – из абразивных зёрен на бакелитовой связке.

Как видно из рис. 1, указанные элементы 2, 3 выполнены в виде сегментов, равномерно чередующихся по всей плоскости одной из торцевых поверхностей круга. Боковые поверхности каждого из сегментов выполнены в виде спирали, простирающейся от внутренней до внешней окружности тела круга. При этом под боковыми поверхностями понимаются вертикальные плоскости, образованные в местах соприкосновения друг с другом чередующихся сегментов, т. е. у каждого сегмента две боковые вертикальные поверхности. Под сегментом в данном случае понимается часть торцевой поверхности круга, ограниченная частью внутренней и внешней окружностей тела круга, а также двумя боковыми поверхностями каждого из режущих элементов 2, 3.

Вначале корпус шлифовального круга 1 (см. рис. 2) штампуется и спекается с режущими элементами 2 на керамической связке. Режущие элементы 2 в осевом направлении (на боковой поверхности) имеют форму равнобоких трапеций. При этом в поверхности круга образовываются впадины, выполненные в виде спирали на одной из его торцевых сторон, которые заполняют абразивной массой на бакелитовой связке той же зернистости, которую имеет абразивная масса на керамической связке, с последующей штамповкой.

Следует отметить, что впадины выполняют таким образом, чтобы ширина (т.е. расстояние между двумя боковыми поверхностями) каждой спирали режущих элементов 3 на бакелитовой связке, образованной на торцевой поверхности круга от его внутренней до внешней окружности, была постоянна, а ширина всех спиралей из элементов 3 между собой также была одинакова. При этом ширина каждого сегмента, образованного режущими элементами на керамической связке 2, больше, чем ширина сегментов, образованных режущими элементами 3 на бакелитовой связке.

Данное обстоятельство продиктовано последующей равномерной обработкой изделий, а также уменьшением радиального и торцевого износа круга.

После этого композиционный шлифовальный круг спекают по технологии производства абразивных кругов на бакелитовой связке. В итоге получается композиционный абразивный круг с чередующимися режущими элементами 2 и 3 с одинаковой твёрдостью и зернистостью, но с разными связками.

Для частей абразивного инструмента на бакелитовой связке (структуре абразивного изделия двухсоставная, поры отсутствуют) применяют:

- электрокорунд нормальный марки 16А, 15А, 14А, 13А, 12А (микротвёрдость 20...22 ГПа, механическая прочность 80 %, абразивная способность 82 %, прочность единичного зерна 20 Н);
- карбид кремния чёрный (микротвёрдость 25...27 ГПа, механическая прочность 85 %, абразивная способность 90 %, прочность единичного зерна 25 Н).

Для частей абразивного инструмента на керамической связке (структуре абразивного изделия трёхсоставная, при этом средние размеры пор в структуре абразивного изделия 150 мкм – 25...30 % в объёме) применяют:

- легированный электрокорунд хромистый, легированный хромом, марки 34А, 33А, 32А (микротвёрдость 30...32 ГПа, механическая прочность 90 %, абразивная способность 162 %, прочность единичного зерна 30 Н);
- кубический нитрид бора (микротвёрдость 33...36 ГПа, механическая прочность 95 %, абразивная способность 189 %, прочность единичного зерна 35 Н).

В частном примере круги изготовлены из зерна изометрической формы Кф-(1,15-1,46) зернистостью 16...80.

Зернистость абразивного материала на бакелитовой связке F180, а на керамической – F150, согласно ГОСТ Р 52381-2005. Зерновой состав также соответствует требованиям ГОСТ Р 52381-2005.

Композиционный шлифовальный круг на операции торцевого шлифования работает следующим образом.

Режущие элементы 2 на керамической связке шлифовального круга 1 в процессе обработки обладают высокой огнеупорностью, водостойкостью, химической стойкостью и хорошо сохраняют профиль круга. Режущие элементы 3 на бакелитовой связке шлифовального круга 1 обеспечивают безприжовое шлифование.

Форма режущих элементов 2 и 3 (см. рис. 2) в осевом направлении в виде равнобоких трапеций, большее основание которых расположены противоположно друг другу, обеспечивает их надёжное сцепление. Боковые границы режущих элементов 2 и 3, расположенные по спирали по всей плоскости торца круга, позволяют без ударов внедряться абразивным зёренам в обрабатываемый металл. Наличие режущих элементов 2 и 3 на торце круга без впадин повышает производительность обработки и, соответственно, увеличивает эффективность процесса шлифования [1].

Проведённые эксплуатационные испытания данного шлифовального круга с новыми конструктивными особенностями показали высокие характеристики как самого круга, так и результатов обработки металлических изделий по сравнению с предшествующими аналогами.

Ниже приведена таблица сравнения результатов испытаний применяемых кругов и новых композиционных кругов, составленная по результатам испытаний (см. табл. 1).

Таблица 1  
Сравнение результатов испытаний применяемых кругов и новых композиционных кругов

Эксплуатационные характеристики (для зерна 13А)	Применяемые шлифо- вальные круги	Новые композиционные круги
Уменьшение шероховатости обрабатываемой поверхности	В 1,25...1,4 раза	В 1,55...1,7 раза
Снижение тангенсального износа круга	В 1,6...2,2 раза	В 2,5...2,8 раза
Повышение режущей способности	В 1,2...1,4 раза	До 1,9 раза
Уменьшение линейного износа	В 1,4...1,6 раза	В 1,8...2,2 раза

Для выбора режимов обработки и условий технологических воздействий предлагаемого шлифовального круга на рельс рассматривается профиль нового рельса типа Р65 (см. рис. 3).

С математической точки зрения задача сводится к решению системы нелинейных алгебраических уравнений вида

$$(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2 = (x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2, \quad (1)$$

где  $i$  – порядковый номер дорожки шлифования,  $i = 1 \dots n$ ;  $x_i, y_i$  – переменные функции  $y = f(x)$ , характеризующие поперечный профиль рельса.

Для решения системы взяты граничные условия  $x_0 = x^*, x_n = x^{**}$  – известные величины. Форма профиля рельса задана как кусочно-гладкая кривая, состоящая из трёх дуг окружностей и линейного участка:

$$\begin{cases} \sqrt{500^2 - x^2} - 500 & \text{при } 0 \leq x \leq 10,0, \\ f(x) = \sqrt{80^2 - (x - a_1)^2} - b_1 & \text{при } 10,0 \leq x \leq 24,55, \\ \sqrt{15^2 - (x - a_1)^2} - b_2 & \text{при } 24,55 \leq x \leq 36,5, \\ a_3 \cdot x + b_3 & \text{при } 36,5 \leq x \leq 38,0. \end{cases} \quad (2)$$

Коэффициенты  $a_1, b_1, a_2, b_2, a_3, b_3$  рассчитаны при условии совпадения кривых в контрольных точках. Если расположить начало координат в центре поверхности катания рельса, то  $x_1 = 10,0, y_1 = -0,1001, x_2 = 24,55, y_2 = -1,7, x_3 = 36,5, y_3 = -15,7, x_4 = 38,0, y_4 = -35,6$ .

Используя координаты контрольных точек, составим три системы алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} (10,0 - a_1)^2 + (-0,1001 + b_1)^2 = 80^2, \\ (24,55 - a_1)^2 + (-1,7 + b_1)^2 = 80^2; \end{cases}$$

$$\begin{cases} (24,55 - a_1)^2 + (-1,7 + b_1)^2 = 15^2, \\ (36,5 - a_1)^2 + (-15,7 + b_1)^2 = 15^2; \end{cases}$$

$$\begin{cases} -15,7 = a_3 \cdot 36,5 + b_3 \\ -36,5 = a_3 \cdot 38,0 + b_3. \end{cases}$$

В результате решения получили следующие значения:

$$\begin{aligned} a_1 &= 8,567\,670\,519, & b_1 &= -80,087\,276\,77, \\ a_2 &= 21,515\,875\,25, & b_2 &= -16,389\,931\,48, \\ a_3 &= 13,266\,666\,67, & b_3 &= -468,533\,333\,3. \end{aligned}$$

Таким образом, функция, описывающая поперечный профиль рельса, определена.

Решение системы уравнений (2) аналитически весьма затруднительно, поэтому было использовано приближённое вычисление, основанное на методе усреднения. На первом этапе профиль рельса разбивали точками на отрезки таким образом, чтобы абсциссы располагались равномерно. На втором – последовательно рассматривали пары соседних отрезков, для которых строилась оптимизационная функция следующего вида:

$$F(x) = (x_{i-1} - x)^2 + (f(x_{i+1}) - f(x))^2 - (x - x_{j-1})^2 + (f(x) - f(x_{j-1}))^2,$$

где  $x_{i+1}$  и  $x_{i-1}$  – граничные точки пары отрезков, имеющих общую точку  $X$ .

Очевидно, что если длины отрезков одинаковы, то точка  $X$  является корнем уравнения  $F(x) = 0$ , которое решается численным методом дихотомии. При реализации этого метода необходимо, чтобы функция имела различные знаки на интервале поиска корня.

После того как координаты точек, обеспечивающие равномерное разбиение поперечного профиля, найдены, необходимые углы позиционирования шлифовальных кругов вычисляются через тангенсы угла наклона касательной по формуле

$$\alpha_i = \operatorname{arctg} \left( \frac{f(x_i) - f(x_{i-1})}{x_i - x_{i-1}} \right) \cdot \frac{180}{\pi}, \quad i = 1 \dots n.$$

Во время процесса шлифования из-за нелинейности поперечного профиля  $t$  рельса разные шлифовальные круги должны снимать различное количество металла. Следовательно, на эти круги должна подаваться различная мощность от электродвигателя. В данной работе считается, что количество металла, снятого с рельса, пропорционально скорости зёрен шлифовального диска в точке контакта и давлению диска на рельс, т. е.

$$m = \lambda \cdot v \cdot N,$$

где  $\lambda$  – коэффициент пропорциональности;  $v$  – скорость зёрен шлифовального диска относительно рельса;  $N$  – сила давления диска на рельс.

С другой стороны, количество снимаемого металла можно вычислить как разность между истинным и аппроксимированным значениями ширины дорожек шлифования профиля рельса, помноженную на единицу длины.

В данной работе каждый участок профиля рельса, соответствующий какой-либо дорожке шлифования, дополнительно разбивался на 50 линейных отрезков. С использованием этих координат граничных точек отрезков вычислялся интеграл, соответствующий площади криволинейной трапеции, ограниченной истинным контуром рельса на данном участке, прямой  $y = 0$  и вертикальными линиями, проходящими через граничные точки отрезка, равного ширине дорожки шлифования [2].

Количество снимаемого металла вычисляется как площадь, равная разности площадей трапеций, соответствующих истинному и шлифованному профилям рельса, помноженных на единицу длины (см. рис. 4).

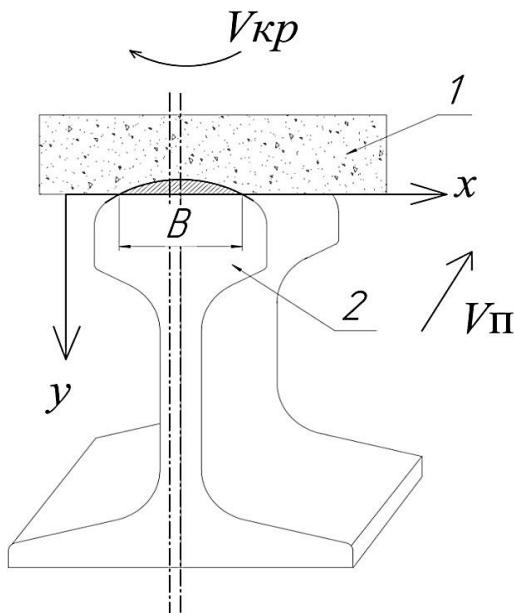
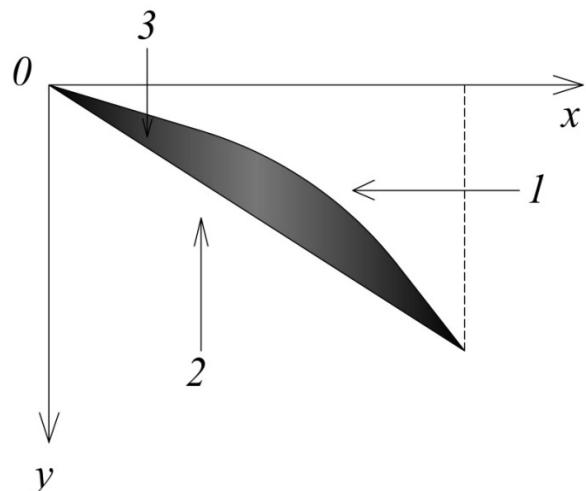


Рис. 3. Схема удаления металла с головки рельса по предполагаемой технологии: 1 – шлифовальный круг; 2 – обрабатываемый рельс; В – полоса шлифования металла



1 – истинный профиль рельса; 2 – профиль дорожки шлифования, 3 – количество снимаемого металла (разность площадей, ограниченных профилями 1 и 2, помноженных на единицу длины)

Рис. 4. К определению количества снимаемого металла

Таким образом, в результате расчётов для каждой дорожки шлифования получается целая область допустимых значений давления и относительной скорости зёрен круга, удовлетворяющих соотношению (1). Поскольку скорость зёрен напрямую связана с угловой скоростью вращения шлифовального круга соотношением

$$v_3 = \omega_d \cdot r_3,$$

то в дальнейшем при выборе оптимальных режимов работы можно использовать именно скорость вращения круга.

Для практической реализации алгоритма, описанного в данной работе, использовался язык программирования Delphi. Была составлена программа, позволяющая пользователю в качестве входных данных задавать количество дорожек шлифования и точность вычислений. После окончания расчётов программой предусмотрен вывод на экран графиков начального разбиения профиля рельса, конечного разбиения, соответствующего дорожкам шлифования снимаемого металла (см. табл. 2). В качестве множителя отношения была выбрана площадь снимаемого металла на первой дорожке шлифования. Кроме того, у пользователя имеется возможность сохранять координаты точек равномерного разбиения, углы наклона шлифовальных кругов и распределение количества снимаемого металла в текстовые файлы для дальнейшего анализа [4].

Таблица 2

Связь названий файлов с хранимыми данными

Название файла	pofile coord.txt	angle set.txt	power.txt
Хранимые данные	Координаты граничных точек дорожек шлифования на профиле рельса	Углы наклона дорожек шлифования	Распределение количества снимаемого металла по дорожке шлифования

По вышеописанному методу были сделаны расчёты для двух типов рельсошлифовальных поездов: Speno (112 шлифовальных кругов) и РШП-48 (48 шлифовальных кругов). На рис. 5 и 6 показаны разбиения рабочей поверхности рельса для Speno и РШП-48. Данные о координатах центров дорожек и углах наклона шлифовальных кругов для поездов Speno и РШП-48 приведены в табл. 3 и 4.

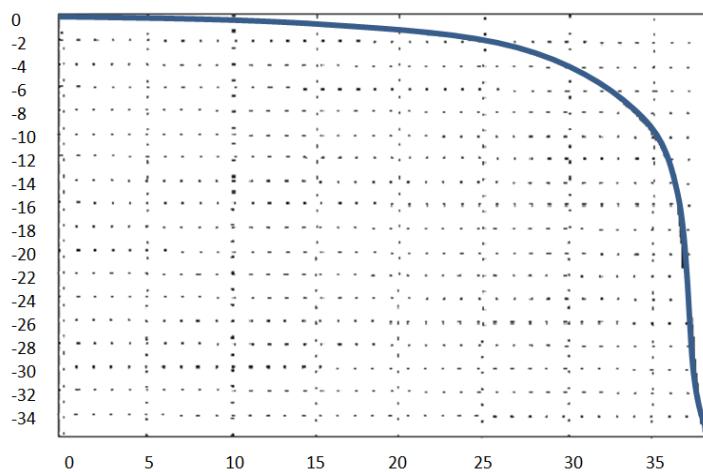


Рис. 5. Схема разбики контура поверхности рельса на дорожки одинаковой длины для поезда Speno

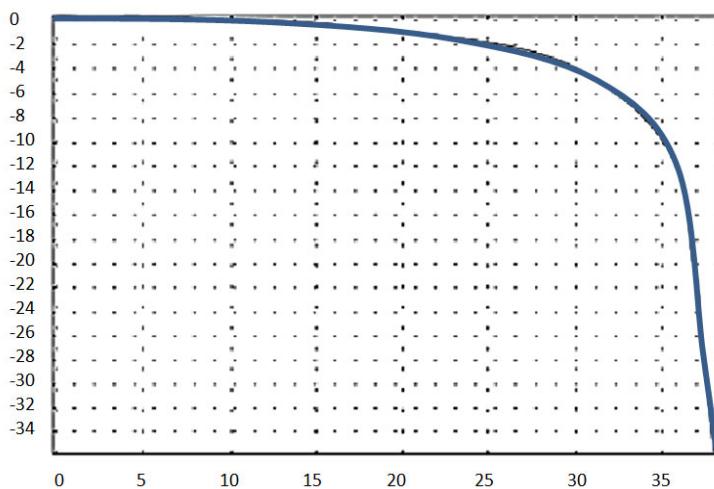


Рис. 6. Схема разбивки контура поверхности рельса на дорожки одинаковой длины для поезда РШП-48

Таблица 3

Координаты центров дорожек шлифования и соответствующие углы наклона для поезда Speno

№	Координата $X$ центра дорожки	Координата $Y$ центра дорожки	Угол наклона дорожки	№	Координата $X$ центра дорожки	Координата $Y$ центра дорожки	Угол наклона дорожки
1	0.574 977 94	-0.000 66	-0.065 887 677	29	31.680 467 61	-5.374 03	-42.698 338 57
2	1.724 935 414	-0.003 31	-0.197 663 561	30	32.494 883 3	-6.1855	-47.094 094 86
3	2.874 888 09	-0.0086	-0.329 439 941	31	33.244 724 58	-7.057 02	-51.489 952 77
4	4.024 828 755	-0.016 53	-0.461 216 688	32	33.925 575 13	-7.983 48	-55.885 913 14
5	5.174 758 943	-0.027 11	-0.592 994 673	33	34.533 425 13	-8.959 43	-60.281 982 75
6	6.324 671 381	-0.040 33	-0.724 773 762	34	35.064 690 52	-9.197 91	-64.678 144 28
7	7.474 558 76	-0.0562	-0.856 553 813	35	35.516 240 31	-11.0365	-69.074 399 37
8	8.624 422 499	-0.074 72	-0.988 335 686	36	35.885 414 03	-12.1255	-73.470 773 2
9	9.774 255 197	-0.095 88	-1.120 034 582	37	36.170 031 95	-13.2396	-77.867 249 28
10	10.923 935 38	-0.124 05	-1.687 838 102	38	36.368 411 91	-14.3722	-82.263 803 42
11	12.073 192 54	-0.166 19	-2.511 514 276	39	36.487 634 07	-15.5162	-85.836 922 16
12	13.221 747 61	-0.224 84	-3.335 206 508	40	36.572 652 68	-16.6639	-85.689 374 18
13	14.369 357 06	-0.3	-4.158 910 396	41	36.659 150 54	-17.8114	-85.689 374 18
14	15.515 786 63	-0.391 65	-4.982 628 085	42	36.745 649 94	-18.959	-85.689 374 18
15	16.660 802 75	-0.499 77	-5.806 362 046	43	36.832 150 76	-20.1065	-85.689 374 18
16	17.804 163 91	-0.624 35	-6.630 108 853	44	36.918 652 9	-21.2541	-85.689 374 18
17	18.945 638 26	-0.765 36	-7.453 871 81	45	37.005 156 27	-22.4017	-85.689 374 18
18	20.084 995 01	-0.922 76	-8.277 654 73	46	37.091 660 77	-23.5494	-85.689 374 18
19	21.221 995 84	-1.096 54	-9.101 455 699	47	37.178 166 3	-24.697	-85.689 374 18
20	22.356 403 74	-1.286 64	-9.925 273 421	48	37.264 672 76	-25.8447	-85.689 374 18
21	23.487 983 26	-1.493 04	-10.749 107 33	49	37.351 180 04	-26.9923	-85.689 374 18
22	24.615 179 24	-1.721 99	-12.213 373 15	50	37.437 688 04	-28.14	-85.689 374 18
23	25.729 303 85	-2.005 35	-16.325 984 91	51	37.524 196 65	-29.2877	-85.689 374 18
24	26.819 269 65	-2.370 55	-20.721 133 3	52	37.610 705 76	-30.4354	-85.689 374 18
25	27.878 068 96	-2.818 21	-25.116 389 31	53	37.697 215 26	-31.8351	-85.689 374 18
26	28.899 467 53	-3.345 71	-29.511 731 8	54	37.783 725 04	-32.7308	-85.689 374 18
27	29.877 455 59	-3.949 95	-33.907 173 79	55	37.870 234 99	-33.8785	-85.689 374 18
28	30.806 276 96	-4.627 38	-38.302 702 82	56	37.956 745	-35.0262	-85.689 374 18

Таблица 4

Координаты центров дорожек шлифования и соответствующие углы наклона для поезда РШП-48

№	Координата X центра дорожки	Координата Y центра дорожки	Угол наклона дорожки	№	Координата X центра дорожки	Координата Y центра дорожки	Угол наклона дорожки
1	1.341 511	-0.0036	-0.153 73	13	32.1983	-5.945 54	-45.6455
2	4.024 503	-0.018	-0.461 18	14	33.888 46	-8.016 25	-55.9101
3	6.707 395	-0.046 79	-0.768 64	15	35.182 61	-10.355	-66.175
4	9.390 106	-0.090 67	-1.105 27	16	36.039 28	-12.8871	-76.44
5	12.071 69	-0.175 31	-2.510 72	17	36.470 87	-15.5284	-84.9998
6	14.749 55	-0.337 77	-4.432 49	18	36.6887	-18.2034	-85.6894
7	17.420 51	-0.589 94	-8.276 13	19	36.890 43	-20.8797	-85.6894
8	20.081 57	-0.093 154	-8.276 13	20	37.092 17	-23.5561	-85.6894
9	22.729 74	-1.362 21	-10.198	21	37.293 91	-26.2325	-85.6894
10	25.346 38	-1.946 49	-14.9763	22	37.495 65	-28.9089	-85.6894
11	27.8574	-2.862 75	-25.1171	23	37.697 39	-31.5853	-85.6894
12	30.166 26	-4.209 19	-35.3812	24	37.899 13	-34.2618	-85.6894

Зависимость объёма снимаемого металла от номера дорожки шлифования приведена на рис. 7 и 8.

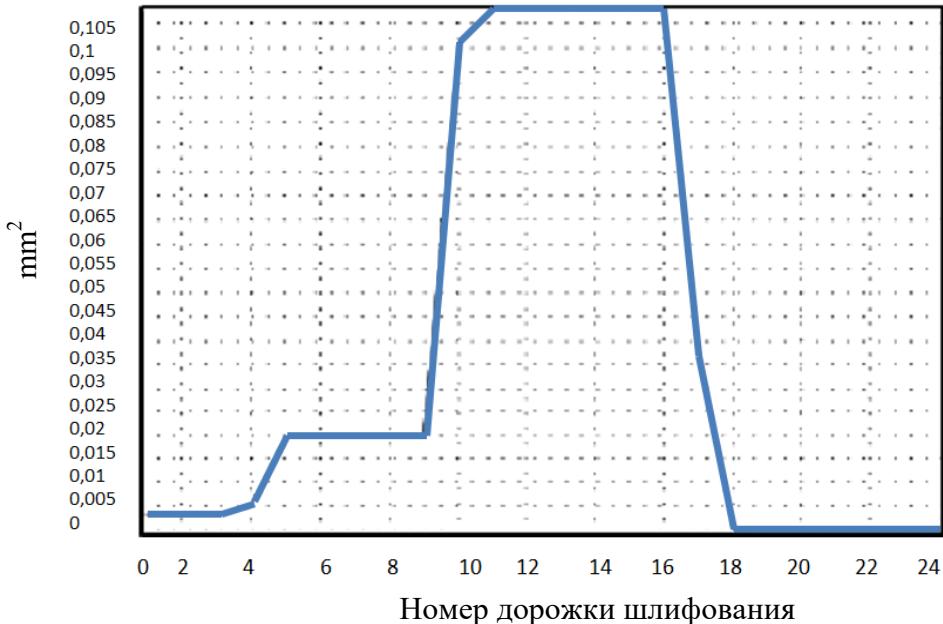


Рис. 7. График к определению площади снимаемого металла по номерам дорожек шлифования поезда Speno

Видно, что из-за большего количества дорожек для поезда Speno объём снимаемого металла меньше, чем для поезда РШП-48. Иными словами, поезд Speno точнее воспроизводит профиль рельса. Значения площади снимаемого металла для обоих типов поездов приведены в табл. 5. Кроме того, в данной работе была вычислена относительная площадь снимаемого металла в поперечном сечении рельса, распределение которой по дорожке шлифования показано на рис. 7 и 8. Видно, что относительные значения площади близки по значению, т. к. уменьшение дорожек шлифования для поезда Speno происходит равномерно [6].

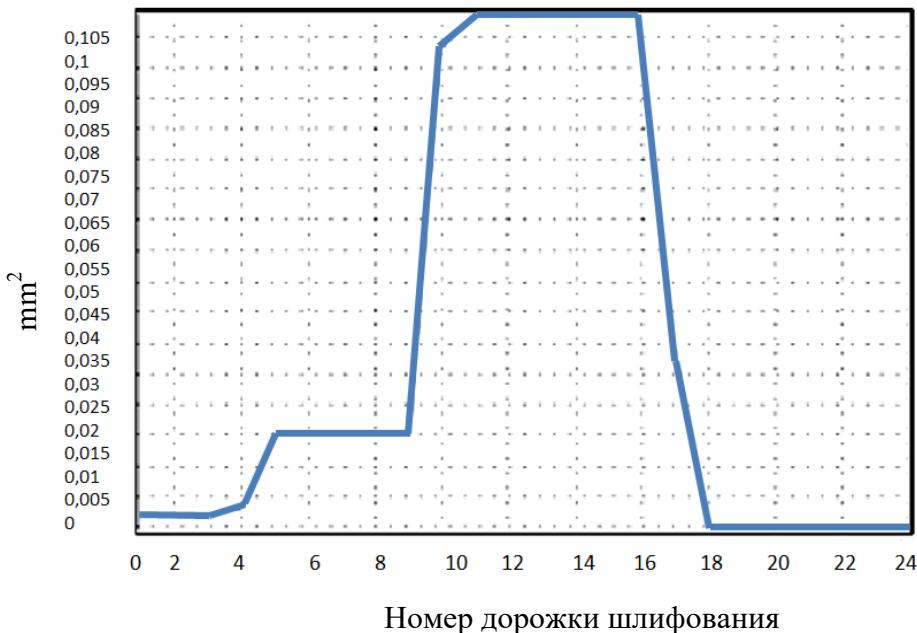


Рис. 8. График к определению площади снимаемого металла по номерам дорожек шлифования поезда РШП-48

Таблица 5  
Объём снимаемого металла для рельсошлифовальных поездов Speno и РШП-48

Для поезда Speno				Для поезда РШП-48	
№ дорожки	Объём снимаемого металла	№ дорожки	Объём снимаемого металла	№ дорожки	Объём снимаемого металла
1	0.000 253	29	0.008 461	1	0.003 218
2	0.000 253	30	0.008 462	2	0.003 218
3	0.000 253	31	0.008 462	3	0.003 218
4	0.000 253	32	0.008 463	4	0.004 86
5	0.000 253	33	0.008 463	5	0.020 115
6	0.000 253	34	0.008 464	6	0.020 116
7	0.000 253	35	0.008 464	7	0.020 117
8	0.000 253	36	0.008 465	8	0.020 119
9	0.000 274	37	0.008 465	9	0.020 12
10	0.000 158 4	38	0.008 466	10	0.100 708
11	0.000 158 4	39	0.008 466	11	0.107 574
12	0.000 158 4	40	$1.45 \cdot 10^{-16}$	12	0.107 582
13	0.000 158 4	41	$8.78 \cdot 10^{-16}$	13	0.107 589
14	0.000 158 4	42	$-4.00 \cdot 10^{-16}$	14	0.107 597
15	0.000 158 4	43	$-3.66 \cdot 10^{-16}$	15	0.107 603
16	0.000 158 4	44	$-8.54 \cdot 10^{-17}$	16	0.107 604
17	0.000 158 4	45	$5.10 \cdot 10^{-16}$	17	0.038 212
18	0.000 158 5	46	$3.07 \cdot 10^{-16}$	18	$-4.46 \cdot 10^{-16}$
19	0.000 158 5	47	$-1.76 \cdot 10^{-16}$	19	$4.64 \cdot 10^{-16}$
20	0.000 158 5	48	$3.13 \cdot 10^{-16}$	20	$-8.40 \cdot 10^{-16}$
21	0.000 158 5	49	$-1.1 \cdot 10^{-16}$	21	$-3.17 \cdot 10^{-17}$
22	0.006 045	50	$-1.01 \cdot 10^{-16}$	22	$-2.72 \cdot 10^{-15}$

## Продолжение табл. 5

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
23	0.008 457	51	$4.66 \cdot 10^{-16}$	23	$-4.24 \cdot 10^{-16}$
24	0.008 458	52	$1.38 \cdot 10^{-16}$	24	$3.83 \cdot 10^{-16}$
25	0.008 459	53	$7.01 \cdot 10^{-16}$		
26	0.008 459	54	$7.38 \cdot 10^{-16}$		
27	0.008 46	55	$6.98 \cdot 10^{-16}$		
28	0.008 46	56	$-2.27 \cdot 10^{-16}$		

**Выводы**

1. Применение новых композиционных шлифовальных инструментов для механической обработки профиля железнодорожных рельсов позволяет повысить режущую способность абразивного инструмента и уменьшить линейный износ шлифовального круга.
2. На основе проведённых исследований установлены зависимости для предлагаемого способа шлифования торцом круга, позволяющие рассчитывать значения удаляемого металла с головки рельса.
3. По результатам моделирования процесса шлифования удалось определить объём удаляемого металла со сложнопрофильной головки рельса при различных углах наклона шлифовального круга.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Теоретические особенности формирования поверхности катания головок рельсов при шлифовании / В. Г. Рахчеев, И. С. Максимов, С. А. Галанский, А. Г. Мустафин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № V-1 (53). – С. 65-70.
2. Повышение эффективности приводного механизма стрелочного перевода / С. Н. Иванов, К. К. Ким, М. Ю. Сарилов, М. В. Семибрата // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2019. – № IV-1 (40). – С. 46-51.
3. Патент № 2697542 Российской Федерации, МПК B24D 7/00 (2006.01). Композиционный шлифовальный круг для торцевого шлифования: № 2019104680: заявлено 19.02.2019: опубликовано 15.08.2019 / Рахчеев В. Г., Максимов И. С., Галанский С. А., Мустафин А. Г., Денисов В. В., Прусов М. В.; заявитель и патентообладатель Прусов М. В. – 9 с.
4. Попович, М. В. Путевые машины: моногр. / М. В. Попович, В. М. Бугаенко, Б. Г. Волковойнов. – М.: Транспортная книга, 2009. – 820 с.
5. Галанский, С. А. К методике разработки абразивного инструмента для шлифования рельсов в пути / С. А. Галанский, И. С. Максимов, В. Г. Рахчеев // Наука и образование транспорту. – 2020. – № 2. – С. 105-107.
6. Шумячев, В. М. Повышение надёжности и эффективности рельсошлифовальных инструментов на бакелитовой связке. Теория шлифования. Физико-химические основы / В. М. Шумячев, С. А. Крюков, И. Ю. Орлов. – Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2021. – 160 с.



Стельмаков В. А., Давыдов В. М., Никитенко А. В., Ли А. А.  
V. A. Stelmakov, V. M. Davydov, A. V. Nikitenko, A. A. Li

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ТОЧНОСТЬ ФОРМЫ ПОВЕРХНОСТЕЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ЧИСТОВОЙ ФРЕЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ

### INVESTIGATION OF FACTORS THAT AFFECT THE ACCURACY OF THE SHAPE OF SURFACES OBTAINED BY FINISHING MILLING

**Стельмаков Вадим Александрович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологическая информатика и информационные системы» Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск). E-mail: stelmakov\_92@mail.ru.

**Vadim A. Stelmakov** – PhD in Engineering, Associate Professor, Technological Informatics and Information Systems Department, Pacific National University (Russia, Khabarovsk). E-mail: stelmakov\_92@mail.ru.

**Давыдов Владимир Михайлович** – доктор технических наук, профессор, и.о. заведующего кафедрой «Технологическая информатика и информационные системы» Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск). E-mail: davellut@mail.ru.

**Vladimir M. Davydov** – Doctor of Engineering, Professor; Acting Head of the Department of Technological Informatics and Information Systems, Pacific National University (Russia, Khabarovsk). E-mail: davellut@mail.ru.

**Никитенко Александр Васильевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологическая информатика и информационные системы» Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск). E-mail: 005392@pnu.edu.ru.

**Alexander V. Nikitenko** – PhD in Engineering, Associate Professor, Technological Informatics and Information Systems Department, Pacific National University (Russia, Khabarovsk). E-mail: 005392@pnu.edu.ru.

**Ли Андрей Александрович** – аспирант, ассистент кафедры «Технологическая информатика и информационные системы» Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск). E-mail: 011864@pnu.edu.ru.

**Andrey A. Li** – Post-graduate Student, Assistant Lecturer, Technological Informatics and Information Systems Department, Pacific National University (Russia, Khabarovsk). E-mail: 011864@pnu.edu.ru.

**Аннотация.** В работе рассмотрены технологические процессы механической обработки на фрезерном станке с ЧПУ, влияющие на точность формы поверхностей, используемых для точного позиционирования пуансона и матрицы пресс-формы, полученные путём чистовой фрезерной обработки. Литературный обзор позволил выявить ряд актуальных проблем, возникающих при чистовой фрезерной обработке на станках с ЧПУ с большим вылетом режущего инструмента. В ходе работы был проведён ряд экспериментальных исследований, в которых были выявлены зависимости отклонений от цилиндричности, величины рабочей подачи и частоты вращения режущего инструмента. Выявлено, что модель упругой деформации режущего инструмента при чистовой фрезерной обработке может быть использована в расчёте отклонения формы поверхности при обработке концевым твёрдосплавным инструментом.

**Summary.** The paper deals with the technological processes of machining at the CNC machining center, affecting the accuracy of the shape of the surfaces used for the precise positioning of the punch and the mold matrix obtained by finishing milling. The literature review revealed a number of topical problems that arise during finishing milling on CNC machines with a large outreach of the cutting tool. In the course of the work, a number of experimental studies were carried out, in which the dependence of deviations from cylindricity and the value of the working feed and the speed of rotation of the cutting tool were revealed. It is revealed that the model of elastic deformation of the cutting tool during finishing milling can be used in the calculation of the deviation of the surface shape during processing with an end carbide tool.

**Ключевые слова:** отклонения от цилиндричности, отклонение формы, отгиб инструмента, пресс-форма, периферийное фрезерование.

**Key words:** deviations from cylindricity, shape deviation, tool bend, press form, peripheral milling.

УДК 621.914.1

Низкая конкурентоспособность многих машиностроительных предприятий, осуществляющих многономенклатурное производство изделий, обусловлена недостаточным уровнем их мобильности, не позволяющим эффективно реагировать на изменения экономической ситуации на рынке сбыта [1; 2]. В таких условиях производственный процесс предприятий требует пересмотра в части стратегии принятия решений при формировании технологической среды механообработки. Данное решение позволяет обеспечить наиболее полное использование технологических возможностей и имеющихся ресурсов производственных систем. Однако данные действия могут привести к значительным материальным затратам.

Повышение качества, точности, долговечности изделий в основном ограничено пределом возможностей технологий, обеспечивающих создание контактирующих поверхностей, которые в современных машинах и механизмах изготавливаются с высокой точностью. Стоимость их может достигать до 70 % от всего механизма, а запас надёжности, заложенный в них, чаще всего и является запасом надёжности всего механизма. Предприятия с многономенклатурным производственным процессом определяют в качестве основного оборудования для изготовления этих деталей станочные модули с ЧПУ. Данное решение позволяет выполнять комплекс функционально связанных технологических переходов по обработке подавляющего большинства поверхностей детали с одной установки с соблюдением принципа единства баз, что приводит к достижению более высокой точности обработки. Поэтому обработка посадочных, базирующих и рабочих поверхностей на фрезерных станках с ЧПУ является актуальной задачей. Особую значимость данные вопросы приобретают при изготовлении штампов и пресс-форм, поверхностей их базирования и контактирования.

Благодаря современным достижениям в области CAD/CAM-технологий в методах создания режущего инструмента и способах высокоскоростной обработки за последнее время важность процесса фрезерования возросла при производстве штампов и пресс-форм. В штампах и пресс-формах встречается широкий ассортимент различных поверхностей – от отверстий под болты до полированных каналов. Обработка в данной отрасли устанавливает определённые требования как к обрабатываемому, так и к инструментальному материалу. Скорость удаления материала должна быть очень высокой на черновых операциях, чистовые проходы должны обеспечивать высокое качество поверхности. Однако с учётом экономических условий, в которых оказались предприятия с многономенклатурным производственным процессом, и тенденции к использованию универсального оборудования и технологической оснастки на данный момент отсутствуют либо устарели практические рекомендации по выбору и применению стратегий фрезерования, технологических параметров и режимов обработки, необходимых для обеспечения заданной точности [3].

В работе рассматривается механическая обработка пресс-форм для литья под давлением путём механической обработки с большим вылетом инструмента, при которой режущий инструмент обычно работает в неестественном положении относительно вектора нормали к поверхности в точке контакта с заготовкой. Использование различных материалов для изготовления ответственных деталей может вызвать изменение сил резания при механообработке. Вышеперечисленные условия, вероятно, вызовут заметное влияние на инструмент, что скажется на шероховатости поверхности, а также на точности формы и размеров.

Данные обстоятельства формируют широкий спектр задач для обеспечения точности обработки поверхностей, требующих большого вылета инструмента на обрабатывающих центрах с ЧПУ, что обуславливает необходимость комплексного и всестороннего изучения факторов, влияющих на точность и производительность обработки [3].

Целью работы является исследование процессов механообработки для обеспечения требуемой точности формы поверхностей, используемых для точного позиционирования пuhanсона и матрицы пресс-формы, полученных при чистовой фрезерной обработке.

Вопросам исследования факторов, влияющих на точность формы поверхностей, посвящены многочисленные исследования. Так, в работе [4] разработана модель отклонения инструмента с

использованием уравнения консольной балки, но при этом расчёт силы резания в работе не производился. В работе [5] рассчитали прогиб сферической фрезы и рассмотрели гибкость инструмента и шпинделя при фрезеровании. В работе [6] произвели расчёт отклонения инструмента при фрезеровании концевой фрезой, в которой было предложено только моделирование сил резания. В работе [7] представлена модель отклонения инструмента, основанная на геометрии инструмента и теории упругости материала при двух- и трёхкоординатном микрофрезеровании. В работе [8] представлена модель отклонения концевой фрезы при различных ориентациях инструмента при пятиосевой обработке. В работе [9] авторы предложили общую модель для одновременного прогнозирования сил резания вместе с трёхмерной топографией поверхности во время операции бокового фрезерования с учётом биения инструмента, отклонения инструмента, динамики системы, износа боковой поверхности и наклона инструмента. В работе [10] исследовали компенсацию погрешностей поверхности из-за деформации инструмента, вызванной силой резания при периферийном фрезеровании криволинейных геометрических форм.

Как известно, погрешность формы может быть определена как отклонение поверхности от предполагаемого или номинального положения. В случае периферийного фрезерования отклонения инструмента в направлении, перпендикулярном готовой поверхности, вызывают погрешности формы, как показано на рис. 1.

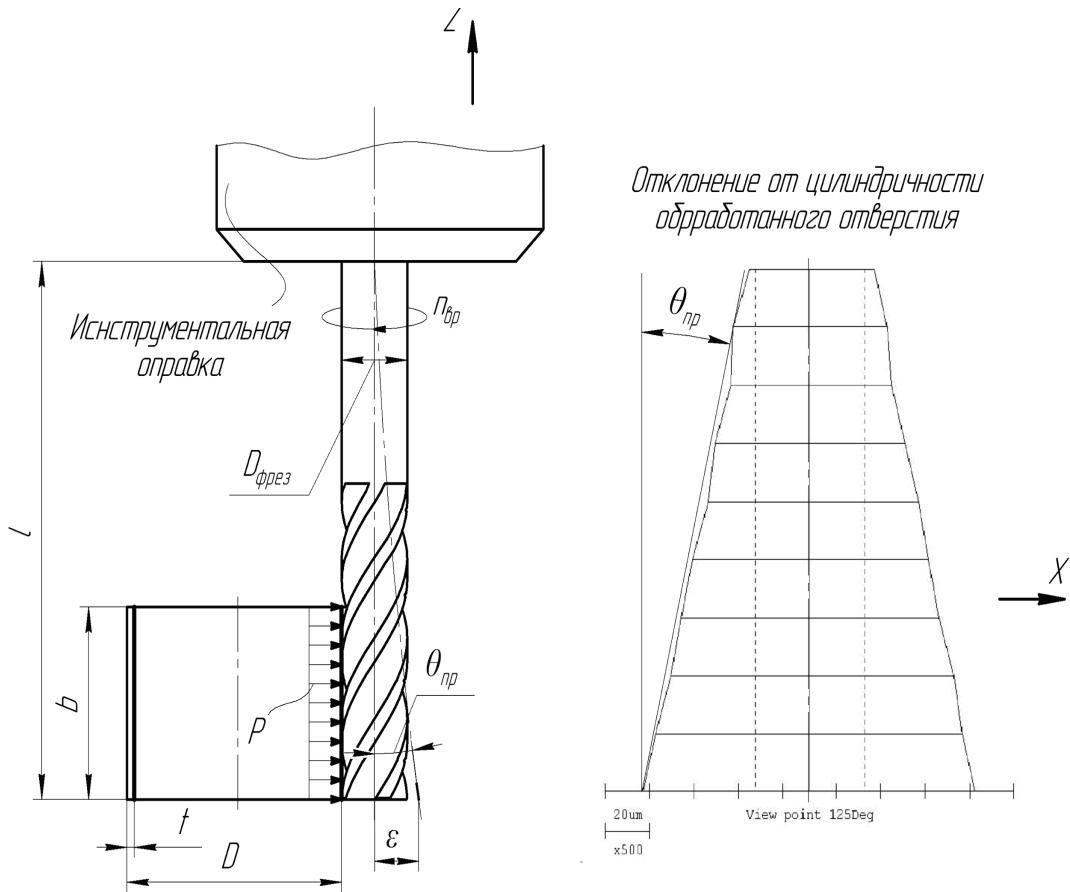


Рис. 1. Формирование поверхности при периферийном фрезеровании

Динамика процесса заключается в следующем: концевая твёрдосплавная фреза под действием силы резания, распределённой по глубине фрезерования  $b$  в направлении, перпендикулярном готовой поверхности детали, испытывает упругие деформации, приводящие к отклонению формы готовой поверхности детали. Точность детали является комплексным параметром, включающим в себя точность размера и точность геометрической формы поверхности. Так как поверх-

ность детали цилиндрическая, то оценить точность формы поверхности можно при помощи параметра отклонения от цилиндричности. Данный параметр показывает величину погрешности формы поверхности по всей длине детали.

Согласно работам авторов [1; 2; 5; 8], наибольшую степень влияния на точность геометрической формы поверхности при использовании концевого фрезерного инструмента вносят упругие деформации, возникающие в процессе резания.

Для определения величины упругих деформаций в произвольном сечении режущего инструмента можно воспользоваться следующим уравнением [3]:

$$\varepsilon(z) = \frac{1}{EJ_z^0} \cdot \left( P \cdot \left( l - \frac{b}{2} \right) \cdot \frac{z^2}{2} - P \cdot \frac{z^3}{6} + \frac{\left( k_2 \cdot \left( l - \frac{b}{2} - l_1 \right) - k_1 \cdot \left( l - \frac{b}{2} - l_1 \right) \right) \cdot P \cdot (z - l_1)^2}{2} - \frac{(k_2 - k_1) \cdot P \cdot (z - l_1)^3}{6} \right) + D,$$

где  $\varepsilon$  – прогиб оси инструмента;  $z$  – координата точки по оси инструмента;  $E$  – модуль упругости;  $k_1$  и  $k_2$  – коэффициенты приведения;  $P$  – сила резания;  $D$  – постоянная интегрирования, показывающая величину изгиба балки в начальной точке  $A$ .

Анализ результатов исследования показал, что параметр согласуется с величиной радиального биения инструмента после его установки в шпиндель станка.

Для реализации поставленной цели исследования предполагается произвести ряд экспериментов, которые позволяют определиться с влиянием основных факторов процесса обработки на показатель точности геометрической формы исполнительных поверхностей. В обозначенных рамках планируется изучить влияние технологических (рабочая подача, частота вращения, глубина обработки и т. д.) параметров обработки на показатели точности и качества поверхностей при различных стратегиях обработки. Следующим этапом будет являться проверка математической модели процесса формообразования цилиндрических поверхностей при обработке концевыми фрезами, позволяющая определить величину параметра отклонения от цилиндричности исходя из кинематики процесса обработки.

Экспериментальные исследования результатов механообработки цилиндрических деталей проводились в научно-исследовательской прецизионной лаборатории на установке Roundcom-41С. По результатам измерений строились круглограммы обработанных поверхностей, позволяющие судить о режимах резания. Для измерения параметров точности поверхностей для каждого исследуемого образца проводился гармонический анализ, представленный в виде ряда Фурье, коэффициенты разложения которого представляют факторы, влияющие на параметры отклонения от цилиндричности.

На рис. 2 представлены экспериментальные данные влияний подачи на значение отклонения от цилиндричности. Режимы обработки указаны в табл. 1.

Определение удельной силы резания производилось с использованием международного стандарта DIN/ISO 513 VDI3323. Для алюминия марки АМг6 удельная сила резания составила  $P_c = 700 \text{ Н/мм}^2$  при обработке с подачей 0,1 мм/зуб.

Как видно из рис. 2, экспериментальные значения величины отклонения от цилиндричности, возникающей в процессе резания, повышаются по мере роста рабочей подачи.

На рис. 3 представлены результаты влияния частоты вращения инструмента на параметр величины отклонения от цилиндричности. Режимы обработки указаны в табл. 1.

Из рис. 3 видно, что экспериментальные значения величины отклонения от цилиндричности, возникающей в процессе резания, повышаются по мере роста значения частоты вращения, однако можно заметить, что характер графика носит экспоненциальный характер. Получено, что при

малых значениях частот вращения отклонение от цилиндричности имеет неярко выраженный рост, как на максимальных значениях.

Таблица 1  
Режимы резания для экспериментальных исследований

№ эксперимента	Материал заготовки	Инструмент	Частота вращения, об/мин	Подача на зуб, мм/зуб	Глубина резания, мм	Вылет инструмента от инструментальной оправки
Влияние подачи на величину отклонения от цилиндричности						
1	АМг6	Трёхзубая твёрдосплавная фреза диаметром 6 мм по DIN 6528 Sandvik Coromant	6000	0,02	28	38
2				0,04		
3				0,06		
4				0,08		
5				0,1		
6				0,12		
Влияние частоты вращения на отклонения от цилиндричности						
1	АМг6	Трёхзубая твёрдосплавная фреза диаметром 6 мм по DIN 6528 Sandvik Coromant	2000	0,06	28	38
2			4000			
3			8000			

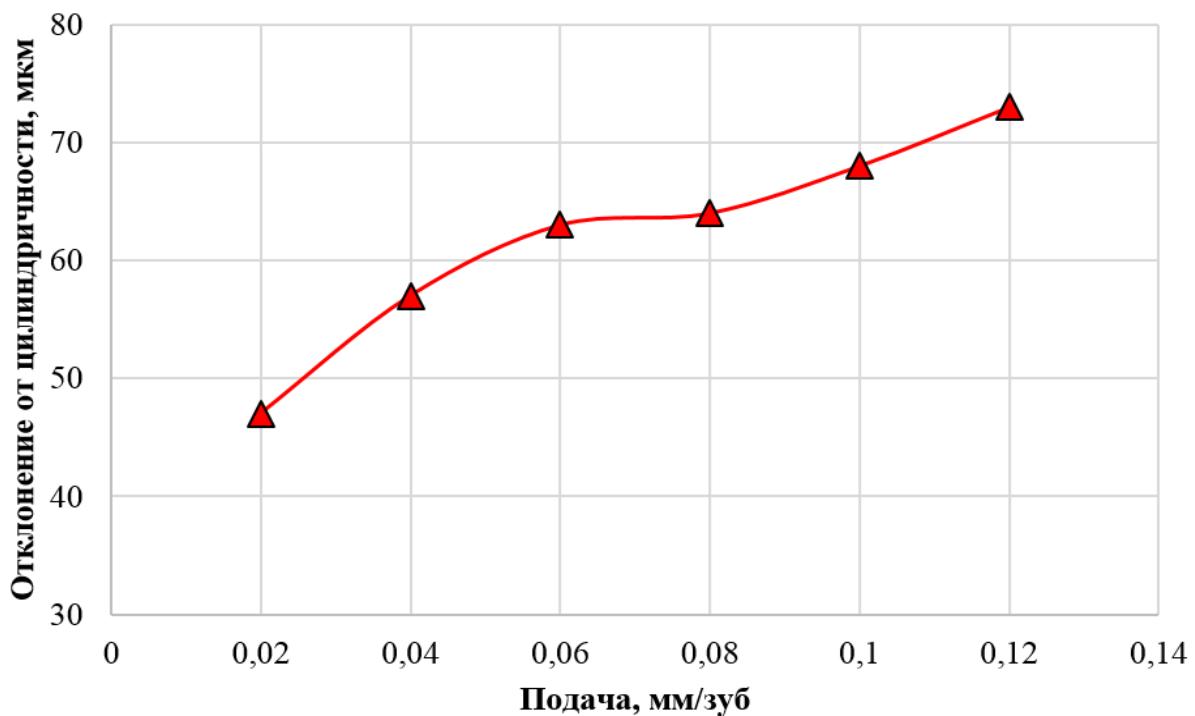


Рис. 2. Зависимость величины отклонения от цилиндричности от значения рабочей подачи

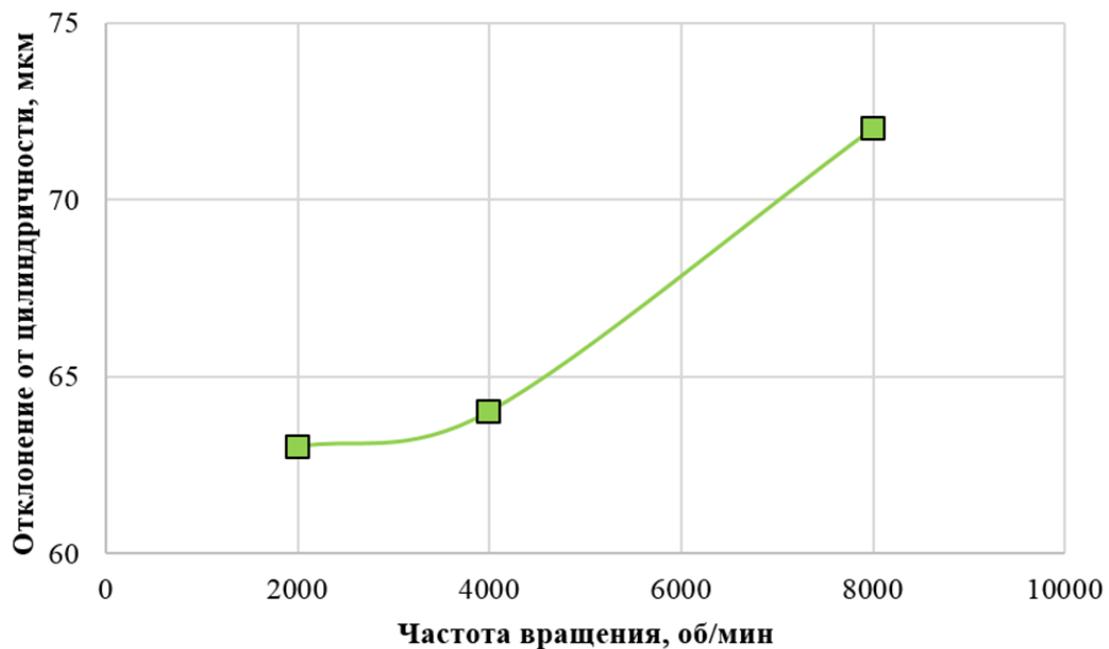


Рис. 3. Зависимость величины отклонения от цилиндричности от значения частоты вращения шпинделя обрабатывающего центра

На рис. 4 представлен сравнительный анализ экспериментальных и теоретических данных величины отклонения от цилиндричности в зависимости от значений рабочей подачи.

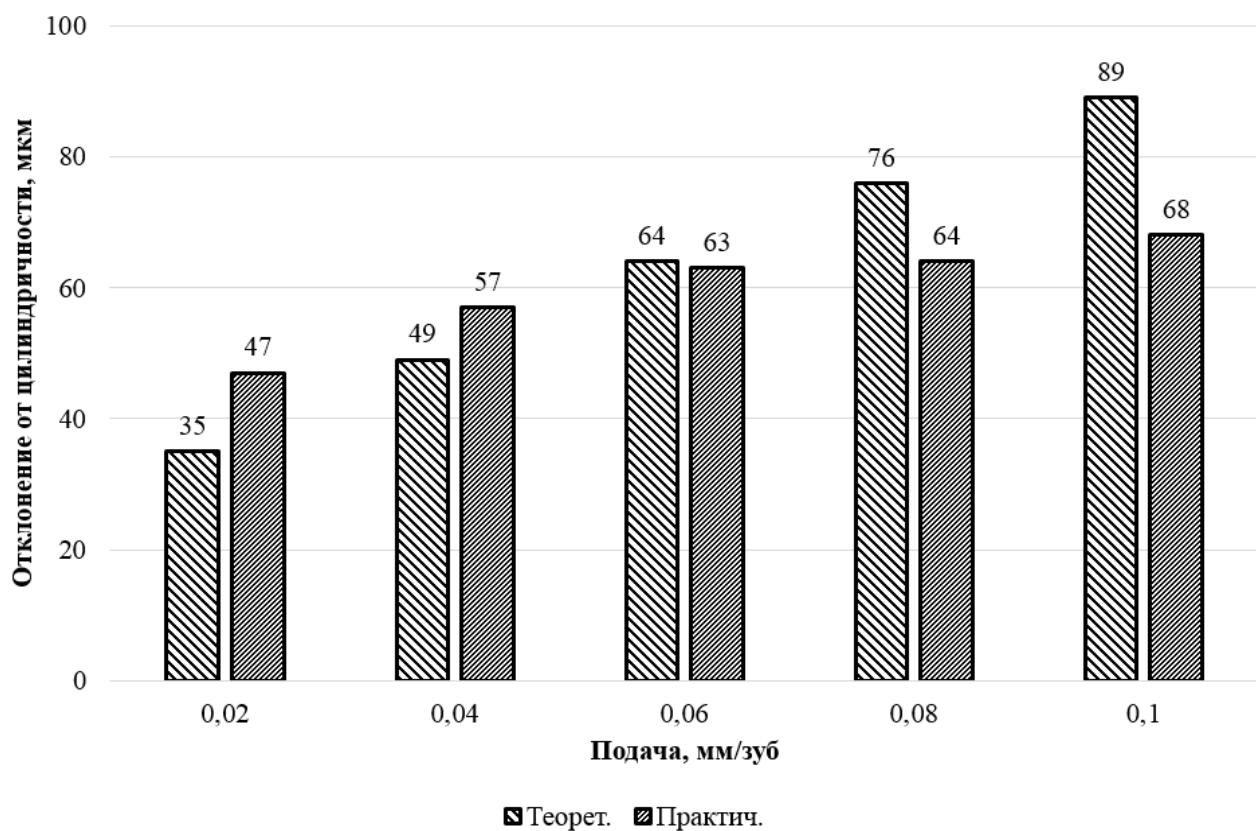


Рис. 4. Сравнительный анализ экспериментальных и теоретических данных величины отклонения от цилиндричности в зависимости от значений рабочей подачи

Исходя из вышеизложенного можно заключить, что экспериментальные значения максимального отгиба инструмента отличаются от расчётных не более чем на 20 %. Данный процент несоответствия объясняется сложностью получения экспериментальных значений силы резания при данной рабочей подаче, а также влиянием на процесс формообразования других факторов. Сложность получения экспериментальных данных сил резания заключается в следующем: для каждого инструмента, конфигурации заготовки, а также режимов резания необходимо провести ряд экспериментальных исследований. Кроме того, вышеупомянутые исследования требуют ввода дополнительных коэффициентов сил резания для каждой пары инструмент-материал с учётом представляющих интерес режимов резания. Дальнейшая аппроксимация полученных данных и возможное выявление зависимостей между коэффициентами силы резания и режимами обработки всё равно не даёт полную картину формообразования поверхности. Данное обстоятельство требует, возможно, новых подходов к изучению вопроса влияния процессов механообработки для обеспечения требуемой точности формы поверхности, полученной при чистовой фрезерной обработке.

### Выводы:

1. Установлена зависимость величины отклонения от цилиндричности от рабочей подачи, при анализе которой выявлено, что с ростом численного значения рабочей подачи значение отклонения от цилиндричности увеличивается.
2. Установлена зависимость величины отклонения от цилиндричности от частоты вращения инструмента, при анализе которой выявлено, что с ростом частоты вращения инструмента увеличивается значение параметра отклонения от цилиндричности.
3. Установлено, что модель процесса упругой деформации режущего инструмента при фрезерной обработке может быть использована при расчёте отклонения формы поверхности при обработке концевым твёрдосплавным инструментом, т. к. при сравнении экспериментальных значений максимального отгиба инструмента с теоретическими выявлено, что максимальный процент разницы данных показателей составил не более 20 % при наименьшем значении рабочей подачи.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Давыдов В. М. Концептуальное проектирование мехатронных модулей механообработки: моногр. / В. М. Давыдов, Ю. Г. Кабалдин. – Владивосток: Дальнаука, 2003. – 251 с.
2. Математическое моделирование самоорганизующихся процессов в технологических системах обработки резанием / Ю. Г. Кабалдин, А. И. Олейников, А. М. Шпилев, А. А. Бурков. – Владивосток: Дальнаука, 2000. – 195 с.
3. Стельмаков, В. А. Исследование процесса формообразования цилиндрических поверхностей отверстий при стратегии чистовой фрезерной обработки концевыми фрезами с круговой интерполяцией / В. А. Стельмаков, В. М. Давыдов, А. В. Сарыгин // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2019. – № 5 (78). – С. 25-31.
4. Kim, G. M., Kim, B. H., and Chu, C. N., 2003, «Estimation of Cutter Deflection and Form Error in Ball-End Milling Processes», *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 43(9), pp. 917-924.
5. Dow, T. A., Miller, E. L., and Garrard, K., 2004, «Tool Force and Deflection Compensation for Small Milling Tools», *Precis. Eng.*, 28(1), pp. 31-45.
6. Dépincé, P., and Hascoët, J. Y., 2006, «Active Integration of Tool Deflection Effects in End Milling. Part 1. Prediction of Milled Surfaces», *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 46(9), pp. 937-944.
7. Rodríguez, P., and Labarga, J. E., 2014, «Tool Deflection Model for Micromilling Processes», *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 76(1-4), pp. 199-207.
8. Xianyin, D., Fangyu, P. and Rong, Y., 2016, «Estimation of Cutter Deflection Based on Study of Cutting Force and Static Flexibility», *Int. J. Manuf. Sci. Eng.*, 138(4), pp. 316-331.
9. Omar, O. E., EL-Wardany, T., Ng, E., Elbestawi, M. A. An improved cutting force and surface topography prediction model in end milling. *Int. J. Tools Manuf.* 2007, 47, 1263-1275.
10. Rao, V. S., Rao, P. V. M. Tool deflection compensation in peripheral milling of curved geometries. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2006, 46. 2036-2043.

## НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ SCIENTIFIC LIFE

10 февраля 2022 г. ушёл из жизни выдающийся человек и личность, учёный, доктор технических наук, профессор кафедры «Промышленная электроника» Комсомольского-на-Амуре государственного университета

### КЛИМАШ ВЛАДИМИР СТЕПАНОВИЧ (10.07.1953 – 10.02.2022)

Вся жизнь Владимира Степановича была посвящена науке, преподаванию и изобретательству. Осталась добрая память и большое научное наследие, которое ещё многие годы будет востребовано при подготовке высококвалифицированных специалистов и учёных в электронике и электроэнергетике.

Климаш Владимир Степанович родился 10 июля 1953 г. в г. Комсомольске-на-Амуре. После окончания средней школы № 29 в 1971 г. поступил в Комсомольский-на-Амуре вечерний политехнический институт и в 1976 г. окончил его по специальности «Электрические машины». В мае 1976 г. В. С. Климаш начал свою трудовую деятельность в Комсомольском-на-Амуре политехническом институте в должности инженера, а августе 1976 г. был избран ассистентом кафедры «Электрические машины».

Владимир Степанович Климаш в 1980 г. был зачислен в аспирантуру Ленинградского ордена Ленина, Ордена Октябрьской революции и Ордена Трудового Красного знамени горный институт имени Г. В. Плеханова по специальности «Электрооборудование горной промышленности». В 1985 г. Владимир Степанович защитил кандидатскую диссертацию, вернулся в Комсомольский-на-Амуре политехнический институт и поступил работать на кафедру «Промышленная электроника» в качестве ассистента.

В 1991 г. Владимиру Степановичу присвоено учёное звание доцента и по 2000 г. он работал на кафедре «Промышленная электроника», занимался научной работой со студентами, руководил научно-исследовательскими работами.

В 2001 г. для завершения работы над докторской диссертацией Климаш Владимир Степанович был переведён на должность старшего научного сотрудника, а в 2003 г. защитил докторскую диссертацию и ему была присуждена учёная степень доктора технических наук. В 2004 г. Климашу Владимиру Степановичу присвоено учёное звание профессора по кафедре «Промышленная электроника».

В 2008 г. награждён нагрудным знаком «Почётный работник высшего профессионального образования Российской Федерации».

В феврале 2017 г. избран членом-корреспондентом Академии электротехнических наук Российской Федерации.

При его непосредственном участии опубликовано более 247 научных трудов, он являлся членом докторских диссертационных советов и государственных аттестационных комиссий ряда университетов Дальнего Востока. Подготовил 6 кандидатов технических наук, руководил магистерской программой.

За свою научную деятельность В. С. Климаш подал и получил авторские свидетельства более чем на 100 заявок полезных моделей, патентов и авторских свидетельств на программы ЭВМ. Разработаны новые направления в науке и технике: авторские свидетельства СССР и патенты РФ на изобретения, в том числе имеющие практическое использование в различных сферах деятельности и особенно в промышленности.

Наименование основных научных публикаций:

1. Klimash V. S., Nimatov R. R. Power transformer electronic starter // Lecture Notes in Networks and Systems. 2021. Т. 200. Р. 567-575.





2. Klimash V. S., Tabarov B. D. Application of a reactor-thyristor device at a transformer substation // Lecture Notes in Networks and Systems. 2021. T. 200. P. 614-621.

3. Иньков Ю.М., Климаш В.С., Климаш С.В., Жемчужина Е.А. Исследование электротехнического комплекса в среде MATLAB с применением специализированных модулей // Электротехника. 2017. № 9. С. 13-18.

4. In'kov Y. M., Klimash V. S., Svetlakov D. P. Compensators for nonactive power with voltage stabilization on transformer substations // Russian Electrical Engineering. 2007. T. 78. № 7. P. 366.

5. Inkov Y., Klimash V. Reactive power compensators with the stabilization of the load transformer substations // The Electricity Journal. 2003. № 12. P. 11.

6. Климаш В. С., Петухов А. В. Исследование устойчивости электротехнического комплекса деревообрабатывающей линии к провалам напряжения в сети электроснабжения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 3. С. 184-190.

7. Климаш В. С., Табаров Б. Д. Разработка конденсаторных установок и способа регулирования реактивной мощности в системах промышленного электроснабжения // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. 2022. № I-1 (57). С. 7-14.

8. Климаш В. С., Соколовский М. А. Повышение эффективности комплекса электроприводов технологического оборудования горнoperерабатывающего предприятия // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 2. С. 575-581.

9. Климаш В. С., Петухов А. В. Электротехнический деревообрабатывающий комплекс с улучшенной энергоэффективностью и производительностью // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 4 (53). С. 19-27.

10. Климаш С. В., Табаров Б. Д., Климаш В. С. Повышение точности регулирования реактивной мощности конденсаторной установки // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2021. № 40. С. 27-43.

11. Климаш В. С., Ниматов Р. Р. Способы и устройства для включения силовых трансформаторов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 4. С. 450-458.

12. Климаш В. С., Константинов А. М. Стабилизатор трёхфазного напряжения для трансформаторных подстанций 10/0,4 кВ и анализ способов его управления // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 2 (47). С. 33-40.

Проработав с ним много лет, занимаясь силовой электроникой, продвижением научных разработок, мы всегда видели в нём профессионала и учёного, талантливого изобретателя и генератора идей, направленных на создание новых технологий в области электротехнических комплексов и систем.

Светлая память о Владимире Степановиче Климаше навсегда останется в наших сердцах!

Факультет энергетики и управления, ректорат

# Содержание

## УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

Феоктистов С. И., Андрианов И. К., Лин Х.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ  
ПРИ ФОРМОИЗМЕНЕНИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТРУБ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ ..... 4

Феоктистов С. И., Андрианов И. К., Лин Х.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ  
ТОЛСТОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК С УЧЁТОМ ФИЗИЧЕСКОЙ  
НЕЛИНЕЙНОСТИ МАТЕРИАЛА ..... 12

Кобылицкий А. Н., Игнатенко И. В., Власенко С. А., Пухова А. И., Казакул А. А.  
ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАСЧЁТА  
АВАРИЙНО ДОПУСТИМЫХ ТОКОВ В ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ..... 21

Горьковый М. А., Егорова В. П., Горьковый А. И., Мельниченко М. А.  
ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА  
ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ИМИТАЦИОННЫХ  
МОДЕЛЕЙ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА РОБОТИЗИРОВАННОГО ПРОЦЕССА ..... 27

Краснояров Н. А., Дмитриева Т. Л.  
СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ  
И ВОЗМОЖНОСТИ ИХ АВТОМАТИЗАЦИИ ..... 35

Колесник М. Б.  
ПОЛУЧЕНИЕ АППРОКСИМИРУЮЩИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ  
ДЛЯ УЧЁТА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ НАГРУЗКИ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ  
ПОКАЗАТЕЛИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ..... 43

Ким К. К., Иванов С. Н., Колесова А. В.  
МЕТОД УЧЁТА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОНТАКТНОГО  
ПРОВОДА С ПАНТОГРАФОМ ..... 48

Марущенко С. Г., Ненюк В. В.  
ПРИМЕНЕНИЕ АВТОНОМНОГО ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ  
ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ПИКОВОЙ НАГРУЗКИ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ СЕТЬ ..... 54

Младова Т. А., Муллер Н. В.  
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ  
И УПРАВЛЕНИЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫМИ РИСКАМИ ..... 66

Поляков И. А., Сысоев О. Е., Сысоев Е. О.  
К ВОПРОСУ АВТОМАТИЗАЦИИ РАСЧЁТОВ ПРОГРЕВА МОНОЛИТНЫХ  
КОНСТРУКЦИЙ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ  
В УСЛОВИЯХ ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА ..... 72

Стельмащук С. В., Демин С. Д.  
РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА НАСОСА  
ДЛЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СЕТИ С УЧЁТОМ ИНЕРЦИОННОЙ  
СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ДАВЛЕНИЯ ..... 78

Сысоев Е. О., Добрышкин А. Ю., Сысоев О. Е.  
ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ КОМПОЗИТНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ  
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РАЗОМКНУТЫХ ОБОЛОЧЕК ..... 85

## МАШИНОСТРОЕНИЕ

Кравченко Е. Г., Афанасьева С. А., Кравченко А. К., Пачурина С. Б.  
РАСШИРЕНИЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПОРТАТИВНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ  
ТВЁРДОСТИ ПРИ КОНТРОЛЕ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ ..... 91

Максимов И. С., Галанский С. А., Мустафин А. Г.  
ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА  
ШЛИФОВАНИЯ РЕЛЬСОВ В ПУТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
КОМПОЗИЦИОННЫХ АБРАЗИВНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ ..... 99

Стельмаков В. А., Давыдов В. М., Никитенко А. В., Ли А. А.  
ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ТОЧНОСТЬ ФОРМЫ  
ПОВЕРХНОСТЕЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ЧИСТОВОЙ ФРЕЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ ..... 110

## НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ

ПОСВЯЩАЕТСЯ СВЕТЛОЙ ПАМЯТИ УЧЁНОГО  
ВЛАДИМИРА СТЕПАНОВИЧА КЛИМАША ..... 117

Научное издание

Учёные записки КнАГТУ  
2022 № III (59)  
Науки о природе и технике

Выпускающий редактор  
С. Н. Иванов

Подписано в печать 24.06.2022  
Дата выхода в свет 29.06.2022

Формат А4.  
Бумага офисная 80 г/м<sup>2</sup>.  
Усл. печ. л. 13,63.  
Уч.-изд. л. 17,18.  
Тираж 200. Заказ 30620

Отпечатано в типографии  
КнАГУ  
681013,  
г. Комсомольск-на-Амуре,  
пр. Ленина, д. 27.

