

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный технический университет»
(ТвГТУ)

**ВЕСТНИК
ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

Серия «Технические науки»

**Научный рецензируемый журнал
№ 4 (8), 2020**

**Print ISSN 2658-5030
Online ISSN 2687-0029**

Тверь 2020

Учредитель – ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

Главный редактор Болотов А.Н., д.т.н., профессор ТвГТУ

Заместители главного редактора:

Измайлов В.В., д.т.н., профессор ТвГТУ

Яблонев А.Л., д.т.н., доцент ТвГТУ

Семенов Н.А., д.т.н., профессор ТвГТУ

Ответственный секретарь Афанасьева Л.Е., к. ф.-м. н., доцент ТвГТУ

Члены редакционной коллегии:

По направлению «Машиностроение и машиноведение»

Гершман И.С., д.т.н., профессор, ВНИИЖТ

Горохов Д.Б., д.т.н., доцент БрГУ

Горячева И.Г., академик РАН, д.ф.-м.н., профессор, ИПМех РАН

Иванов А.С., д.т.н., профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана

Козырева Л.В., д.т.н., доцент ТвГТУ

Матлин М.М., д.т.н., профессор, ВолгГТУ

Солдатенков И.А., д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник ИПМех РАН

Хопин П.Н., д.т.н., профессор МАИ

Шоркин В.С., д.ф.-м.н., профессор ОГУ имени И.С. Тургенева

Шустер Л.Ш., д.т.н., профессор УГАТУ

По направлению «Транспортное, горное и строительное машиностроение»

Березовский Н.И., д.т.н., профессор БНТУ, Республика Беларусь

Головин К.А., д.т.н., профессор ТулГУ

Горлов И.В., д.т.н., доцент ТвГТУ

Кантович Л.И., д.т.н., профессор НИТУ «МИСиС»

Керопян А.М., д.т.н., доцент НИТУ «МИСиС»

Кондратьев А.В., д.т.н., профессор ТвГТУ

Рахутин М.Г., д.т.н., доцент НИТУ «МИСиС»

По направлению «Информатика, вычислительная техника и управление»

Бурдо Г.Б., д.т.н., профессор ТвГТУ

Голенков В.В., д.т.н., профессор БГУИР, Республика Беларусь

Мешалкин В.П., академик РАН, д.т.н., РХТУ им. Д.И. Менделеева

Палюх Б.В., д.т.н., профессор ТвГТУ

Шпрехер Д.М., д.т.н., профессор ТулГУ

Язенин А.В., д.ф.-м.н., профессор ТвГТУ

Адрес редакции: 170026, Тверь, наб. Афанасия Никитина, д. 22.

E-mail: vestnik_tstu_tekh@mail.ru

Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки» публикует научные статьи и краткие обзоры по направлениям: 05.02.00 Машиностроение и машиноведение, 05.05.00 Транспортное, горное и строительное машиностроение, 05.13.00 Информатика, вычислительная техника и управление. Журнал издается с января 2019 года, выходит 4 раза в год.

Зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Регистрационный номер: ПИ № ФС77-74321 от 19 ноября 2018 года. Индексируется в базе данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

Перепечатка материалов из журнала возможна при письменном согласии с редакцией, при этом ссылка на журнал обязательна.

© ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 2020

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

<i>Мигранов М.Ш., Мигранов А.М.</i> Повышение износостойкости режущего инструмента	5
<i>Бурдо Г.Б., Болотов А.Н.</i> Смазочные наномасла на основе кремнийорганических наножидкостей.....	13
<i>Иванов А.С.</i> Особенности расчета резьбовых соединений опорно-поворотных подшипников.....	22

ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

<i>Горлов И.В.</i> Анализ надежности торфяных машин в процессе проектирования....	32
<i>Рахутин М.Г., Каширский А.С.</i> Расчет и прогноз производительности оборудования для подводной добычи твердых полезных ископаемых.....	39
<i>Дьяченко В.П.</i> Особенности деформации желобчатой конвейерной ленты при малых натяжениях.....	46

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

<i>Иванов В.К.</i> Экспериментальная проверка модели оценки инновационности объекта.....	54
<i>Кардаш С.М., Демидов А.В.</i> Проблема оценки функциональной готовности автоматизированной системы управления военного назначения.....	64
<i>Болотов А.Н., Бурдо Г.Б.</i> Оценка качества решений при проектировании операций механической обработки	68
<i>Пузырев Н.М., Мартынов Д.В., Барбашинова Н.Б.</i> Системный анализ при решении задач производственной безопасности в эргатических системах	77
<i>Краснов С.Г.</i> Анализ современных угроз безопасности информации в АСУ военного назначения.....	85
<i>Полянская Ю.В., Морозов А.В., Краснов С.Г.</i> Модель безопасности с «часовым» механизмом системы защиты информации.....	97
<i>Моренков В.А., Жихарев И.С.</i> Совершенствование образовательной деятельности высшего военного учебного заведения на основе информационных технологий тренажерной подготовки.....	103
Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». Оформление статей. Правила для авторов.....	110

CONTENTS

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

<i>Migranov M.Sh., Migranov A.M.</i> Increasing the wear resistance of the cutting tool.....	5
<i>Burdo G.B., Bolotov A.N.</i> Lubricating oils based on organosilicon nanofluids.....	13
<i>Ivanov A.S.</i> Features of the calculation of threaded joints of slewing bearings.....	22

TRANSPORT, MINING AND CONSTRUCTION MACHINERY

<i>Gorlov I.V.</i> Analysis of the reliability of peat machines in the process of design.....	32
<i>Rakhutin M.G., Kashirskiy A.S.</i> Calculating and forecasting hardware performance for underwater mining of solid minerals.....	39
<i>Dyachenko V.P.</i> Specific features of deformation of the grooved conveyor belt at low tensions.....	46

INFORMATICS, COMPUTER FACILITIES AND MANAGEMENT

<i>Ivanov V.K.</i> Experimental verification of model for object innovation evaluation.....	54
<i>Kardash S.M., Demidov A.V.</i> Problem of functional readiness assessment for military automated control system.....	64
<i>Bolotov A.N., Burdo G.B.</i> Evaluating the quality of solutions in the design of machining operations.....	68
<i>Puzyrev N.M., Martynov D.V., Barbashinova N.B.</i> System analysis in solving the problems of production safety in ergatic systems.....	77
<i>Krasnov S.G.</i> Analysis of modern threats to information security in a military automated control system.....	85
<i>Polyanskaya Yu.V., Morozov A.V., Krasnov S.G.</i> Security model with the "timing" mechanism of the information security system.....	97
<i>Morenkov V.A., Zhikharev I.S.</i> Improvement of educational activities for the higher military education institution on the basis of information technologies of simulator training	103
Instructions for authors of the journal “Bulletin of the Tver State Technical University. Series Engineering”. Manuscript requirements.....	110

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.91.02

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

М.Ш. МИГРАНОВ, д-р техн. наук, А.М. МИГРАНОВ, аспирант

Уфимский государственный авиационный технический университет,
450008, Уфа, ул. К. Маркса, д. 12, e-mail: migmars@mail.ru

© Мигранов М.Ш., Мигранов А.М., 2020

Приведены результаты исследования повышения износостойкости инструмента путем геометрической адаптации формы режущего клина при механообработке точением и фрезерованием различных материалов по обрабатываемости. Подтверждена возможность повышения износостойкости режущего инструмента на 75...90 % при обеспечении и улучшении показателей качества обработанного поверхностного слоя.

Ключевые слова: трение, износ, режущий клин, геометрическая адаптация, самоорганизация, точение, фрезерование.

DOI: 10.46573/2658-5030-2020-4-5-12

ВВЕДЕНИЕ

Теория изнашивания материалов изучает явления, которые происходят на ограниченном участке поверхности трения двух тел. В результате должны быть сформулированы основные закономерности изнашивания, характеризующие элементарный акт износа. Эти закономерности должны отражать все многообразие видов взаимодействия материалов и смазки и их изменений при переменности параметров внешнего взаимодействия и внутренней эволюции трибосистемы. В силу сложности такой задачи теоретическое решение вопроса до настоящего времени уступает по надежности экспериментальным данным [1]. Вместе с тем минимизация потерь машиностроительного инструмента на трение и износ при обработке резанием путем разработки и внедрения инновационных видов смазочно-охлаждающих технологических средств, многослойных композиционных износостойких покрытий в большинстве случаев приводит по существу к обеспечению длительной сохранности обоюдоострой исходной формы режущего клина.

При обработке металлов резанием традиционно стремятся сохранить исходную форму изнашивающегося режущего инструмента, не зная при этом, является ли эта форма рациональной с точки зрения естественных процессов трения, минимизирующих износ. Многочисленными исследованиями [1–5] установлено, что образование нароста на резце при умеренных скоростях резания способствует уменьшению удельной нагрузки на режущий клин. Обработка инструментом с закругленной вершиной при прерывистом резании, а также явление перехода фаски износа по задней поверхности режущего клина на переднюю с образованием лунки также можно рассматривать как пример самоорганизации элементов системы трения и резания металлов при лезвийной обработке. Такие эффекты самоорганизации оказывают существенное влияние на износостойкость режущего инструмента (уменьшение радиального износа) и, как следствие, улучшают показатели качества поверх-

ностного слоя детали (обеспечение радиальных размеров и шероховатости обработанной поверхности). При этом в самой системе резания металлов формируется рациональный с точки зрения энергетических затрат режущий клин, дополняющий инструмент.

В значительной степени пластическая деформация обрабатываемого материала, температурно-силовые условия и контактные процессы в зоне резания зависят от формы режущего клина, что в свою очередь определяет режимы и условия резания (применение смазочно-охлаждающих технологических средств, износостойких покрытий и т.д.) и, следовательно, оказывает существенное влияние на эффективность и производительность механической обработки [2, 3]. Эта закономерность поведения по образованию устойчивых естественных геометрических форм при трении и износе породило направление по повышению износостойкости инструмента за счет геометрической адаптации режущего клина.

Работа в этом направлении актуальна по следующим причинам. Во-первых, при использовании режущих инструментов, работающих в условиях прерывистого резания (фрезерование, сверление, зенкерование, развертывание и т.д.), при существенной нестационарности (торцевое точение, точение с переменными подачами и глубинами резания на станках с ЧПУ и АдСУ и т.д.), при обдирочных и черновых операциях происходит интенсивное выкрашивание обоюдоострого режущего клина.

Во-вторых, имеет значение микроскопичность контактирующих поверхностей и переменность контактных процессов – микрорезания, условий стружкообразования и т.д.

В-третьих, необходима оптимизации по интенсивности износа режущего клина лезвийной обработки крупногабаритных деталей силовой части газотурбинных двигателей, где в процессе резания в пределах одного длительного полустогового и чистового прохода нельзя менять режущий инструмент по причине вероятного снижения показателей качества обработанного поверхностного слоя [5–7].

Целью работы является исследование влияния геометрической адаптации (предварительной подготовки) режущего клина на износостойкость инструмента и показатели качества поверхностного слоя обработанной поверхности детали для повышения эффективности лезвийной обработки резанием.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При проведении экспериментальных исследований в качестве обрабатываемых материалов были использованы следующие стали и сплавы различных групп по обрабатываемости резанием: 40X, 14X17H2, 12X18H10T, 07X16H6, 15X18H12C4TЮ, ХН73МБТЮ. При обработке резанием использовались наиболее часто применяемые марки инструментальных материалов из быстрорежущей стали: Р6М5, Р6М5К5, Р9К5; твердых сплавов группы ВК: ВК8, ВК6М, ВК100М; ТК: Т15К6 и ТТК: ТТ8К6. При этом цельные резцы и твердосплавные пластины имели геометрию режущей части: передний угол $\gamma = 0^\circ$; главный задний угол $\alpha = \alpha_1 = 10^\circ$; главный угол в плане $\varphi = \varphi_1 = 45^\circ$; угол наклона главного режущего лезвия $\lambda = 0^\circ$. Использовали также концевые фрезы из быстрорежущей стали и твердосплавного материала диаметром 12 и 13 мм, торцевые фрезы диаметром 90 мм, оснащенные четырехгранными пластинами. При сверлении использовались двухленточные сверла из быстрорежущей стали марки Р6М5К5 для обработки коррозионностойких сталей диаметром 9 и 10 мм; угол при вершине сверла $2\varphi = 125^\circ$.

Резцы затачивались на универсально-заточном станке модели ЗА64Д и на станке ЗБ642 с применением алмазных кругов. Заточка осуществлялась без применения смазочно-охлаждающих жидкостей. Контроль углов режущей части инструментов осуществлялся универсальным угломером с нониусом УМ 4 с точностью до 1° .

Согласно литературным источникам [2–4] указанные марки твердых сплавов являются лучшими по износостойкости и производительности обработки в зоне оптимальных и близких к экономическим скоростям резания (для условий чистового и получистового точения). Для обеспечения идентичности экспериментальных исследований производился отбор режущего инструмента по результатам износостойкостных испытаний и предварительной сортировки по величине термоэлектродвижущей силы при резании согласно методикам [3, 5].

При точении и фрезеровании использовались заготовки из одной партии материалов, одинаковых марок. В частности, при точении использовались заготовки диаметром 70...120 мм и длиной 300...400 мм, предварительно обточенные и зацентрованные с обеих сторон.

Износостойкость режущего инструмента оценивалась по величине износа по задней поверхности h_3 (мм) и периоду стойкости T (мин). Ширина фаски износа по задней поверхности (h_3) измерялась отсчетным микроскопом МИР-2М, оснащенным насадкой МОВ-15 точностью до 0,002 мм. Достоверность результатов экспериментов обеспечивалась согласно рекомендациям [3, 4] четырехкратным повтором опытов при отклонении не более 8 %.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные данные по износу задней поверхности и периоду стойкости режущих инструментов получены путем непосредственного наблюдения и измерения зон износа на резцах и фрезях. Вместе с тем, как показали предварительные натурные эксперименты при получистовом и чистовом резании и анализ литературных данных [1, 2, 4], определяющим элементом качества обработанной поверхности по шероховатости, остаточным напряжениям на поверхностном слое и в целом износостойкости режущего инструмента является фаска износа по его задней поверхности. Известно [4–6], что наименьшей изменчивостью результатов измерения характеризуется средний износ задней поверхности вдоль главной режущей кромки или профиль износа задней поверхности. Величина этого параметра при постоянных значениях переднего и заднего углов режущего клина отражает размерную износостойкость инструмента. При этом строго соблюдалось постоянство условий заточки и доводки инструмента, радиус при вершине резца измерялся по шаблону и контролировался инструментальным микроскопом. Для экспериментальных исследований при геометрической адаптации режущего клина применялись специально заточенные резцы (по задней поверхности с фаской $f' = 30, 50$ и 100 мкм (рис. 1а); по передней поверхности с фаской $f' = 30, 50$ и 100 мкм и углом $\gamma' = 10^\circ$ (рис. 1б) и радиусом скругления вершины R' (рис. 1в) и фрезы (с дополнительной фаской по ленточке и торцевой части – рис. 2).

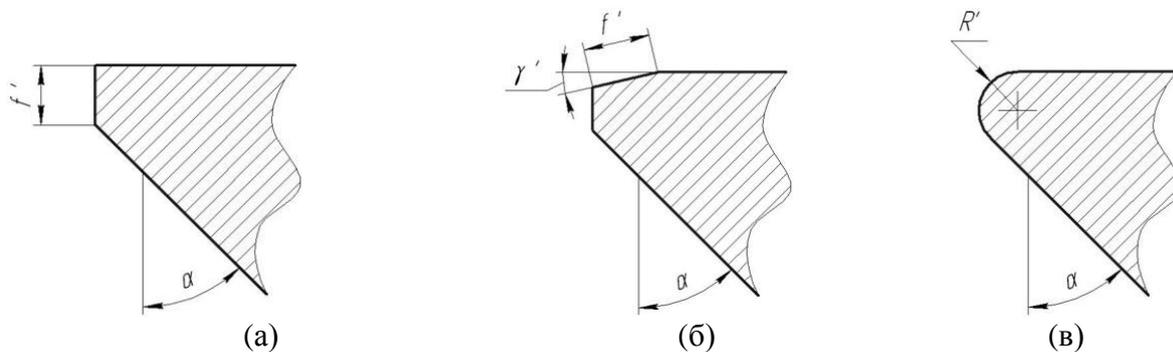


Рис. 1. Схемы резцов с геометрической адаптацией режущего клина: по задней поверхности с фаской $f' = 30, 50$ и 100 мкм (а); по передней поверхности с фаской $f' = 30, 50$ и 100 мкм и углом $\gamma' = 10^\circ$ (б); радиусом скругления вершины R' (в)

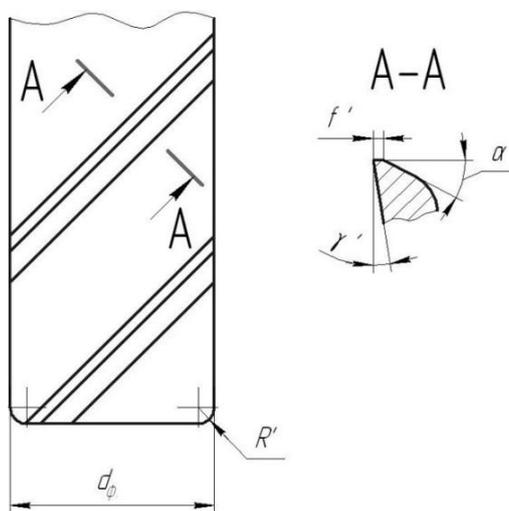


Рис. 2. Схема фрезы с геометрической адаптацией режущего клина

Натурные эксперименты при точении и фрезеровании проводились в два этапа: сначала определялась оптимальная форма (рис. 3), т.е. расположение фаски на режущем клине, а затем и размеры фасок (рис. 4). Результаты исследований износостойкости инструмента с геометрической адаптацией режущего клина приведены на рис. 3 и 4.

Результаты экспериментальных исследований износостойкости и периода стойкости режущего инструмента с различными фасками и микрофотографии поверхностей режущего инструмента представлены на рис. 5 и в таблице.

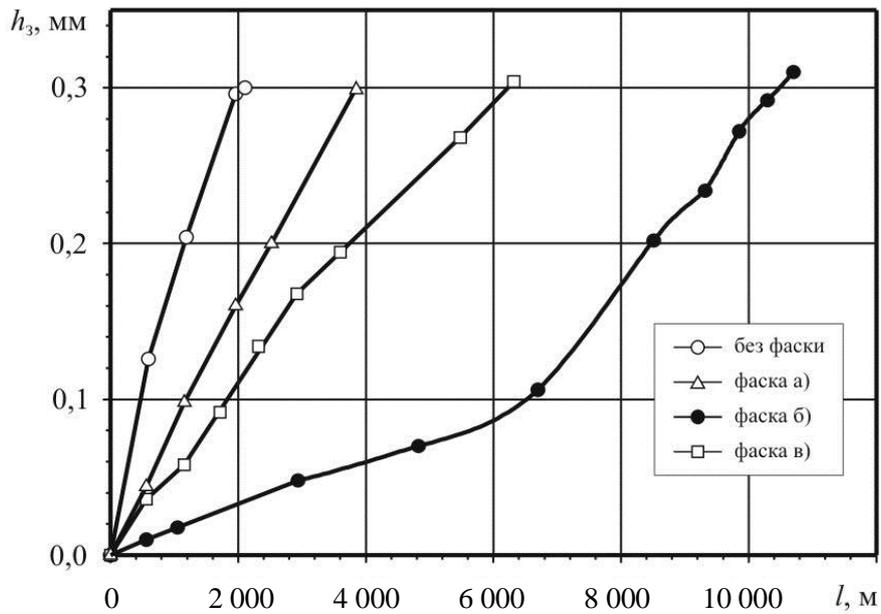


Рис. 3. Влияние длины пути резания на износ инструмента при точении стали 40Х-ТТ8К6 (скорость резания $V = 450$ м/мин; подача $S = 0,11$ мм/об; глубина резания $t = 0,5$ мм)

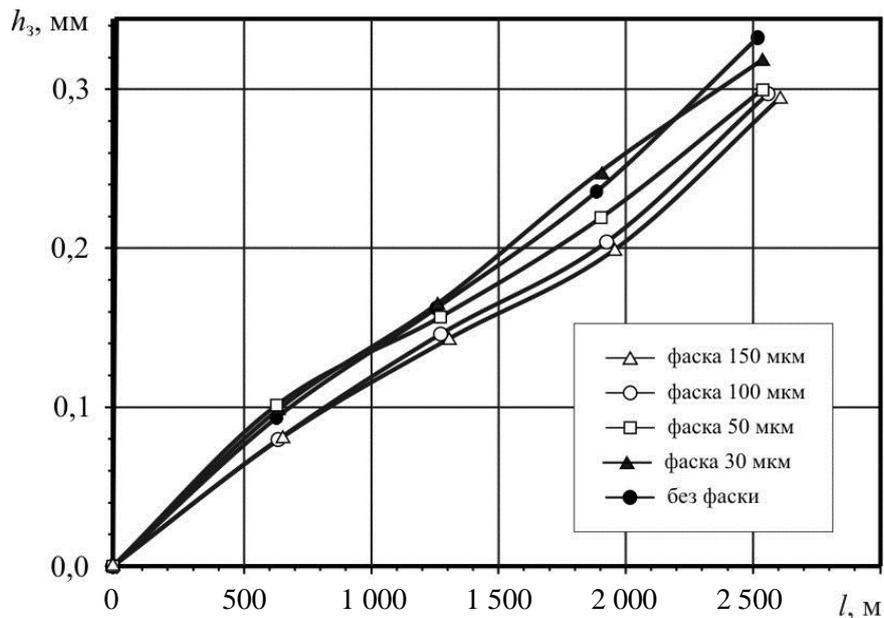


Рис. 4. Влияние длины пути резания на износ инструмента с различными фасками по передней поверхности режущего клина при точении стали 40Х-ТТ8К6 (скорость резания $V = 150$ м/мин; подача $S = 0,11$ мм/об; глубина резания $t = 0,5$ мм)

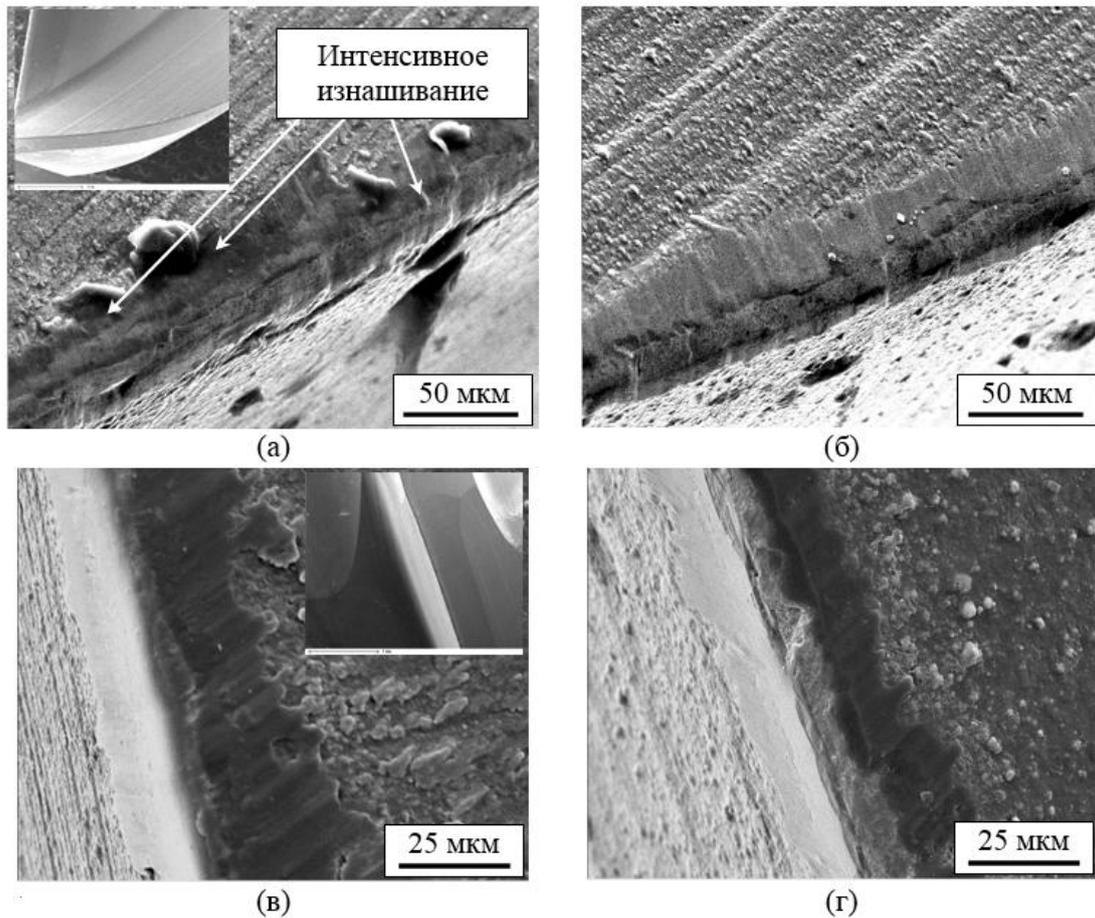


Рис. 5. Износ концевой фрезы ТТ8К6 (сталь 40Х; $l = 1\ 050$ м): передняя поверхность фрезы (а, б); задняя поверхность фрезы (в, г); фреза с фаской 50 мкм (а, в); фреза с фаской 150 мкм (б, г)

Период стойкости инструмента при точении 40Х-ТТ8К6
(скорость резания $V = 220$ м/мин; подача $S = 0,11$ мм/об; глубина резания $t = 0,5$ мм)

Величина фаски f' , мм	Прирост износа $h_3^{кр}$, мм	Длина пути резания l , м	Период стойкости T , мин
150	0,3	7 480	34
100	0,3	10 560	48
50	0,3	6 380	29
30	0,3	4 840	22
0	0,3	4 400	20

Наиболее благоприятным по износостойкости и производительности является фаска $f' = 100$ мм при этом анализ шероховатости и остаточных напряжений поверхностного слоя показал наилучшие значения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам экспериментальных исследований при различных формах геометрической адаптации режущего клина установлено:

1) износостойкость режущего инструмента при точении с различными режущими клиньями выше при фаске типа (б), при этом возможно ее повышение более чем на 40 % при оптимальных режимах резания (см. табл.);

2) при высоких скоростях резания эффект от геометрической адаптации (см. рис. 3 и 4) более существенен по сравнению с низкими скоростями резания, что, вероятно, связано с изменением температурно-силовых условий резания;

3) при фрезеровании положительное влияние на износостойкость фрезы с дополнительной фаской связано с повышением прочностных характеристик режущего клина и исключением их выкрашивания, что характерно для данной операции вследствие переменного-ударной работы зубьев инструмента (см. рис. 5).

ЛИТЕРАТУРА

1. Шульц В.В. Форма естественного износа деталей машин и инструмента. Л.: Машиностроение, 1990. 208 с.

2. Якубов Ф.Я., Ким В.А. Энергетика процесса самоорганизации при трении и изнашивании // *Высокие технологии в машиностроении*: сб. науч. трудов НТУ ХПИ. 2001. № 1. С. 84–92.

3. Лоладзе Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. М.: Машиностроение, 1982. 320 с.

4. Верещака А.С., Кушнер В.С. Резание материалов. М.: Высшая школа, 2009. 536 с.

5. Мигранов М.Ш. Повышение износостойкости инструментов на основе интенсификации процессов адаптации поверхностей трения при резании металлов. Уфа: Гилем, 2011. 229 с.

6. Мигранов М.Ш., Шустер Л.Ш. Пути повышения эффективности механической обработки резанием // *Технология машиностроения*. 2004. № 5. С. 19–22.

7. Migranov M.Sh., Migranov R.M. Tool coatings with the effect of adaptation to cutting conditions // *Key Engineering Materials*. 2012. V. 496. P. 75–79.

Для цитирования: Мигранов М.Ш., Мигранов А.М. Повышение износостойкости режущего инструмента // *Вестник Тверского государственного технического университета*. Серия «Технические науки». 2020. № 4 (8). С. 5–12.

INCREASING THE WEAR RESISTANCE OF THE CUTTING TOOL

M.Sh. MIGRANOV, Dr. Sc., A.M. MIGRANOV, Postgraduate

Ufa state aviation technical university, 12, K. Marx st., 450008, Ufa,
Russian Federation, e-mail: migmars@mail.ru

Results of research of increase of wear resistance of the tool by geometrical adaptation of the form of the cutting wedge at machining by cutting and milling of various materials on machinability, are given. The possibility of increasing the wear resistance of the cutting tool by 75...90 % while ensuring and improving the quality of the treated surface layer is confirmed.

Keywords: friction, wear, cutting wedge, geometric adaptation, self-organization, turning, milling.

REFERENCES

1. Shultz V.V. Forma yestestvennogo iznosa detaley mashin i instrumenta. [Form of natural wear of machine parts and tools]. Leningrad: Mashinostroyenie, 1990. 208 p.
2. Yakubov F.Ya., Kim V.A. Energy of self-organization process at friction and wear *Vysokiye tekhnologii v mashinostroyenii: sb. nauch. trudov NTU KhPI*. 2001. No. 1. Pp. 84–92. (In Russian).
3. Loladze T.N. Prochnost i iznosostoykost rezhushchego instrumenta. [Strength and wear resistance of the cutting tool]. Moscow: Mashinostroyenie, 1982. 320 p.
4. Vereshchaka A.S., Kushner V.S. Rezaniye materialov. [Cutting of materials]. Moscow: Vysshaya shkola, 2009. 536 p.
5. Migranov M.Sh. Povysheniye iznosostoykosti instrumentov na osnove intensivatsii protsessov adaptatsii poverkhnostey treniya pri rezanii metallov. [Increasing the wear resistance of tools based on the intensification of the processes of adaptation of friction surfaces when cutting metals]. Ufa: Gilem, 2011. 229 p.
6. Migranov M.Sh., Shuster L.Sh. Ways to improve the efficiency of mechanical processing by cutting. *Tekhnologiya mashinostroyeniya*. 2004. No 5, pp. 19–22. (In Russian).
7. Migranov M.Sh., Migranova R.M. Tool coatings with the effect of adaptation to cutting conditions. *Key Engineering Materials*. 2012. V. 496, pp. 75–79.

Поступила в редакцию/received: 18.07.2020; после рецензирования/ revised: 03.09.2020;
принята/accepted 05.10.2020

СМАЗОЧНЫЕ НАНОМАСЛА НА ОСНОВЕ КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКИХ НАНОЖИДКОСТЕЙ

Г.Б. БУРДО, д-р техн. наук, А.Н. БОЛОТОВ, д-р техн. наук,

Тверской государственной технической университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22, e-mail: gbtms@yandex.ru

© Бурдо Г.Б., Болотов А.Н., 2020

Описаны технологические особенности синтеза смазочного наномасла на основе полиэтилсилоксана, исследованы его смазочные свойства при различных условиях трения. Приведены рекомендации по выбору компонентов для создания магнитного смазочного наномасла, которые характеризуются различными механизмами снижения трения и износа трущихся поверхностей. Показаны специфические особенности процессов трения поверхностей, смазанных магнитным наномаслом.

Ключевые слова: магнитное смазочное наномасло, трение, изнашивание, дисперсионная среда, магнитная дисперсная фаза, антифрикционные и противоизносные присадки.

DOI: 10.46573/2658-5030-2020-4-13-21

ВВЕДЕНИЕ

Создание новых машин и механизмов для современной промышленности невозможно без использования триботехнических узлов, способных эффективно работать в жестких условиях эксплуатации. Основным элементом практически всех трибоузлов являются традиционные смазочные материалы, в создании которых, несомненно, достигнут определенный прогресс. Однако зачастую даже применение этих материалов не позволяет достичь требуемых технических показателей. В ряде случаев сложные триботехнические задачи удается решить за счет использования принципиально новых материалов – магнитных смазочных наномасел, отличительной особенностью которых является аномально высокая намагниченность [1–4]. Преимущество таких масел перед традиционными заключается в том, что их можно подавать в зону трения и удерживать там с помощью стационарных неоднородных термомагнитных полей. Таким образом, для смазки трибоузлов не требуются специальные циркуляционные насосы, абсолютная герметичность, большой объем масла и др. Примеры реализации подшипниковых узлов со смазкой магнитным маслом приведены в [3].

Для смазывания трибосопряжений, работающих постоянно или кратковременно при граничном режиме трения, необходимо создавать специальные магнитные жидкости – магнитные смазочные наномасла (МН) [5–7]. Причем антифрикционные и противоизносные свойства наномасел должны быть на уровне свойств лучших традиционных смазочных немагнитных масел для аналогичных условий трения [8].

Таким образом, очевидно, что для триботехнических целей нужно использовать не обычные неадаптированные для трения магнитные жидкости, а специально созданные на основе системного подхода магнитные наномасла с высокими смазочными свойствами и специфическими физико-химическими характеристиками (вязкостью, испаряемостью, температурой застывания и кипения и т.д.).

Основная задача данного исследования состояла в разработке технологических основ синтеза магнитных смазочных наномасел на основе силиконов, сочетающих высокие магнитные и триботехнические характеристики. При описании характеристик разрабатываемых магнитных масел особое внимание уделялось смазочным свойствам при граничном трении, поскольку именно этот режим в основном лимитирует долговечность узлов трения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

К основе магнитных смазочных наномасел (содержание которой может превышать 70...80 %) предъявляют следующие основные требования:

- невысокая скорость испарения;
- достаточно низкая вязкость и температура застывания;
- хорошие триботехнические свойства в режиме граничной смазки;
- низкая склонность к окислению при каталитическом действии магнетита;
- оптимальные магнитные и реологические свойства;
- невысокая себестоимость производства.

В работе [5] показано, что смазочные свойства магнитных наномасел сильно зависят от их основы, поэтому выбирать ее следует особенно тщательно.

Испытания магнитного масла проводились на установках, функционирующих по схемам трения *шар – плоскость* (аббревиатура установки МТШ-М) при контактном давлении 1,25 ГПа и *торец цилиндра – плоскость* (аббревиатура установки МТП) при контактном давлении 4,2 МПа. Скорость скольжения 0,5 и 0,24 м/с соответственно. Материалы трущихся поверхностей: шаровой образец – сталь ШХ15, контртело – сталь 20Х, цилиндрический образец – сталь Ст3, контртело – бронза марки БрОСЦ5-5-5.

Для исследований были выбраны магнитные наножидкости на основе полиэтилсилоксана ПЭС-5 [1]. В табл. 1 приведены результаты трибоиспытаний дисперсионных сред магнитных наножидкостей, представляющих основные группы кремнийорганических жидкостей. Видно, что полиэтилсилоксан ПЭС-5 хорошо защищает от износа металлические поверхности трения при высоких контактных нагрузках в условиях граничной смазки и, кроме того, обладает крайне низкой летучестью, имеет хорошую текучесть при низких температурах.

Таблица 1. Смазочные свойства дисперсионных сред магнитных масел

Марка жидкости	Машина трения МТП		Машина трения МТШ-М	
	f	$I_h, 10^{-9}$	f	$d, \text{мм}$
ПМС-100р	–	–	0,25	0,89
ПЭС-5	0,12	9	0,21	0,47
ФМ-6	0,15	5,9	0,30	1,20
ПМТС-5	0,18	25	0,22	0,60
ФС-56	–	–	0,13	0,42

Примечание. f – коэффициент трения; I_h – интенсивность линейного износа; d – диаметр пятна износа.

Для улучшения смазочных свойств магнитных наномасел в их состав вводились специальные антифрикционные, противоизносные и противозадирные присадки, содержание которых варьировалось от 1 до 20 масс.%. При составлении смазочных

композиций на основе магнитных наномасел необходимыми условиями являются, во-первых, сохранение агрегативной и седиментационной устойчивости магнитного коллоида и, во-вторых, хорошая растворимость присадки в жидкости-носителе, так как магнитная эмульсия быстро расслаивается в магнитном поле.

Изучалось влияние на трение магнитных смазочных композиций следующих противозадирных и противоизносных присадок: ДФ-11, совол и ЗН2ТЭ. Присадка ДФ-11 представляет собой 50%-й раствор диалкилдитиофосфата цинка в масле; получена на основе изобутилового спирта и 2-этилгексанола; улучшает антиокислительные, антикоррозионные и противоизносные свойства смазочных масел. Совол – это смесь пента- и тетрахлордифенилов, содержащая 40 % хлора; применяется в качестве противоизносной и противозадирной присадки. Присадка-стабилизатор ЗН2ТЭ, содержащая хлорированный эфир пентадиена, улучшает противоизносные и противозадирные свойства масел. В состав жидкости вводили также антифрикционное поверхностно-активное вещество – олеиновую кислоту (ОК). Компоненты диспергировались в магнитной наножидкости при интенсивном перемешивании в течение 30 мин при 40...50 °С. Концентрации компонентов, не ухудшающих коллоидные свойства масла: ДФ-11 – не более 5 %; совол, ИХОС ЗН2ТЭ – не более 20 %; ОК – не более 2 %.

Присадка-стабилизатор ЗН2ТЭ наиболее эффективно улучшает смазочные свойства дисперсионных сред за счет образования на поверхности трения защитных пленок, содержащих хлориды металлов. Присадка совол хорошо снижает трение и износ при невысоких контактных давлениях независимо от состава силоксановой дисперсионной среды. Присадка ДФ-11 умеренно снижает трение и износ основы наножидкостей во всем рассматриваемом диапазоне нагрузок.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СИНТЕЗА НАНОМАСЕЛ

Для получения магнитных наномасел использовался высокодисперсный магнетит, полученный по методу Элмора [2]. Размер частиц магнетита изменялся от 5 до 17 нм при их среднем размере приблизительно 10 нм; намагниченность насыщения частиц около 430 кА/м; микротвердость наночастиц магнетита около 5 ГПа (это следует учитывать при выборе материалов поверхностей трения).

В некоторых магнитных маслах на основе полиэтилсилоксана применялись дисперсные частицы из карбонильного железа, полученные термическим разложением пентакарбонила железа $Fe(CO)_5$ в жидкости-носителе с различным содержанием ПАВ. Средний размер железных магнитных частиц составлял около 5 нм; характерная намагниченность насыщения полученных масел 20...40 кА/м; микротвердость частиц карбонильного железа примерно на порядок меньше, чем у магнетита.

Для стабилизации коллоидных частиц применяют поверхностно-активные вещества, которые адсорбируются на поверхности магнетита и предотвращают агломерацию магнитных частиц, а также обеспечивают седиментационную стабильность коллоида в гравитационных и магнитных полях. Накопленный опыт изучения магнитных наномасел показывает, что для этих целей целесообразно использовать ОК.

Для пептизации магнитных наномасел на основе ПЭС-5 с магнитными наночастицами карбонильного железа хорошо подошел хлорфенилсилоксан ХС-2-1ВВ. Химическая адсорбция молекул жидкости ХС-2-1ВВ происходила непосредственно во время синтеза магнитных частиц при температуре 200 °С на их каталитически активной поверхности. Стабилизатор ХС-2-1ВВ, растворенный в несущей среде ПЭС-5, благоприятно влияет на трибосвойства смазочной композиции (табл. 2): процесс трения

становится более плавным, коэффициент трения и износ снижаются во всем диапазоне нагрузок.

Таблица 2. Смазочные свойства растворов дисперсионных сред с ПАВ-стабилизаторами

Смазочная композиция	Машина трения МТП		Машина трения МТШ-М	
	f	$I_h, 10^{-9}$	f	$d, \text{мм}$
ПЭС-5	0,12	9,0	0,21	0,69
ПЭС-5 + 5 % (масс.) ОК	0,13	20,0	0,32	0,89
ПЭС-5 + 1 % (масс.) ХС-2-1ВВ	0,10	4,5	0,13	0,42
ПЭС-5 + 1 % (масс.) МКС-2-0	–	–	0,15	0,53

Примечание. f – коэффициент трения; I_h – интенсивность линейного износа; d – диаметр пятна износа.

Разработаны магнитные смазочные наномасла на основе полиэтилсилоксана, в которых, с целью повышения температурной стабильности и улучшения реологических свойств при низких температурах, для пептизации использовали кремнийорганические триметилсилиллированные этилсиликаты (олигомер марки МКС-2-0). МКС-2-0, имеющий хорошую совместимость с дисперсионной средой магнитных наномасел и прочно адсорбируемый посредством поверхностно-активных этоксильных групп, защищает магнетит от агломерации. Данный олигомер не способствует химической модификации поверхности трения и поэтому не может влиять на снижение износа при высоких контактных давлениях (см. табл. 2). Олигомер МКС-2-0 незначительно снижает силу трения.

Для всех синтезированных магнитных масел агрегативная устойчивость нарушается, если значение градиента магнитного поля выше критического: $\text{grad } H \geq 5 \cdot 10^7 \text{ А/м}^2$. Если поле в узле трения меньше критического, образование агломератов из магнитных частиц затруднено и абразивная составляющая изнашивания поверхностей трения становится незначительной.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Магнитное поле, присутствующее в магнитожидкостных трибоузлах, оказывает разнообразное влияние на различные по природе процессы, протекающие в зоне фрикционного контакта [8]. Магнитное поле влияет на коллоидную структуру наномасла, динамику формирования смазочного слоя на поверхностях трения и на их механические свойства. Наиболее важная функция магнитного поля заключается в организации движения магнитного наномасла через зону трения для обеспечения регенерации смазочной пленки. Например, если отключить магнитное поле после начала испытаний наномасла на машине трения МТШ, то при смазывании МН1-ПЭС + 5 % (масс.) совол средний коэффициент трения постепенно возрастает от 0,23 до 0,27 и движение становится неравномерным из-за недостатка наномасла для восстановления сплошной смазочной пленки. Несмотря на наличие большого объема резервного наномасла, его поступление в зону трения под действием поверхностных сил и сил тяжести происходит недостаточно быстро из-за сравнительно высокой вязкости наномасла. После наложения магнитного поля на наномасло начинают

действовать магнитные силы, которые легко преодолевают силы внутреннего трения и обеспечивают регенерацию пленки смазки.

Специально изучалась коррозионная активность рассматриваемых магнитных наномасел. Исследования проводились на медных образцах, выполненных в виде проволочек небольшого диаметра. Для приближения условий модельных коррозионных испытаний к натурным условиям, которые возникают при трении, проволочка подвергалась циклическому нагреву и упругому деформированию. Неожиданно оказалось, что скорость коррозии меди в качественных магнитных наномаслах на порядок меньше, чем в соответствующих дисперсионных средах, содержащих ПАВ-стабилизатор. Коррозионная активность магнитных наномасел начинала повышаться только после введения в их состав дополнительно около 10 % (масс.) стабилизатора. Причина, по которой магнитные наномасла без присадок слабо корродируют поверхности металлов, заключается в том, что сильно развитая поверхность дисперсных частиц аккумулирует на себе основную массу молекул стабилизатора в адсорбированном состоянии.

Магнитное смазочное наномасло МН1-ПЭС (табл. 3) пептезировано ОК и включает всего 5...6 % (об.) магнитных дисперсных ноночастиц. Однако вязкость наномасла значительно превосходит вязкость дисперсионной среды, и это не укладывается в реологические модели дисперсных сред. Возможно, адсорбированные на частицах молекулы образуют оболочку, состоящую из нескольких последовательно располагающихся слоев молекул. Происходящее в результате этого увеличение гидродинамического размера частиц приводит к росту вязкости. Намагниченность технического насыщения наномасла МН1-ПЭС не слишком высокая – 18...24 кА/м, однако для магнитного перемещения наномасла в трибузле этого достаточно.

Таблица 3. Свойства магнитных наномасел на основе ПЭС-5

Смазочная композиция	Машина трения МТП		Машина трения МТШ-М	
	f	$I_h, 10^{-9}$	f	$d, \text{мм}$
ПЭС-5	0,14	14,5	0,21	0,69
МН1-ПЭС ($\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{ОК}$)	0,12	12,6	0,15	0,6
МН1-ПЭС + 5 % (масс.) совол	–	–	0,15	0,82
МН1-ПЭС + 15 % (масс.) совол	0,08	2,1	0,13	0,48
МН1-ПЭС + 20 % (масс.) совол	–	–	0,12	0,39
МН1-ПЭС + 10 % (масс.) ДФ-11	0,13	4,1	0,12	0,69
МН1-ПЭС + 5 % (масс.) ЗН2ТЭ	0,14	3,7	0,16	0,49
МН2-ПЭС ($\text{Fe} + \text{ХС-2-1ВВ}$)	0,1	2,0	0,3	0,95
МН3-ПЭС ($\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{МКС-2-0}$)	0,07	5,5	0,28	1,0
ТМ-5-18	0,07	0,4	0,15	0,35
ОКБ-122-7(1)	–	–	0,13...0,34	0,71
ОКБ-122-7(2)	0,12	≈ 15	0,13	0,62

Примечание. В скобках после марки наномасла указана дисперсная фаза и стабилизатор.

Магнитное наномасло МН1-ПЭС обладает очень хорошей коллоидной устойчивостью в гравитационных и магнитных полях. Низкотемпературные свойства магнитного наномасла и малая летучесть составляющих его компонентов позволяют использовать наномасло в условиях вакуума в диапазоне температур от -40 до $+100$ °С. Магнитное наномасло может эксплуатироваться в контакте с некоторыми жидкими полярными и неполярными химическими средами, например водой.

При температурах выше 100 °С происходит десорбция ПАВ в защитной оболочке магнитных частиц и в наномасле развиваются процессы агломерации. Если температура ниже -40 °С, вязкость начинает препятствовать перемещению масла в градиентном магнитном поле.

Триботехнические свойства наномасла МН1-ПЭС (см. табл. 3) несущественно отличаются от аналогичных свойств кремнийорганической жидкости ПЭС-5. Для их улучшения применяли присадки с различным механизмом влияния на процессы трения. Наблюдалась нетипичная для традиционных масел взаимосвязь между трибосвойствами наномасел и концентрацией присадки. Обычно добавление небольшого количества присадки в немагнитные масла приводит к непропорциональному уменьшению силы трения и износа. Для магнитных наномасел картина иная: при небольших концентрациях присадки (совол) наблюдается некоторое снижение трибосвойств наномасла (см. табл. 3). Ухудшение свойств наступает из-за антагонизма между молекулами присадки и ПАВ-стабилизатора. Введение присадки изменяет полярность дисперсионной среды и создает условия для увеличения свободных молекул стабилизатора, которые благодаря высокой поверхностной активности адсорбируются в первую очередь на трущихся поверхностях, экранируя ее от доступа присадки, и тем самым способствуют усилению износа. Увеличение содержания присадки в масле приводит к тому, что ее молекулы начинают доминировать в дисперсионной среде и играют определяющую роль в формировании граничного смазочного слоя.

Заметим, что магнитное наномасло МН1-ПЭС с увеличенным содержанием присадки совол обладает трибосвойствами, близкими к свойствам широко распространенных немагнитных трансмиссионных масел (см. табл. 3). Увеличение содержания присадки в наномасле выше 15 % (об.) позволяет снизить трение и износ, однако при этом повышается агрегативная неустойчивость наномасла, а повышенное содержание хлора присадки вызывает химическую коррозию поверхностей трения.

Введение в наномасло МН1-ПЭС присадки ДФ-11 не привело к ощутимому снижению трения и износа, как это наблюдалось для многих углеводородных немагнитных масел.

Присадка ЗН2ТЭ (хлорированный эфир пентадиена) позволяет существенно улучшить противоизносные свойства магнитного наномасла МН1-ПЭС. Значительный эффект в данном случае достигается при содержании присадки в количестве около 5 % (масс.). После введения присадки процесс трения становится более равномерным и амплитуда колебаний силы трения резко уменьшается. Коллоидную устойчивость нанонаномасла данная присадка заметно не изменяет.

По сравнению с другими наномаслами с той же дисперсионной средой магнитные нанонаномасла МН2-ПЭС и МН3-ПЭС (с добавкой МКС-2-0) имеют более высокую намагниченность насыщения, которая у МН2-ПЭС сочетается с относительно невысокой вязкостью. Наномасло МН2-ПЭС содержит мягкие сильномагнитные частицы железа, объемная концентрация которых приблизительно в пять раз ниже, чем в наномасле МН3-ПЭС, и поэтому во столько же раз различается их

вязкость. При контактных давлениях до нескольких мегапаскалей магнитные наномасла МН2-ПЭС и МН3-ПЭС имеют неплохие смазочные характеристики. При повышенных контактных давлениях смазочные свойства ухудшаются из-за отсутствия в составе наномасла достаточного количества молекул ПАВ, способных химически модифицировать поверхность трения.

Интересно отметить: сравнительные исследования свойств наномасел МН2-ПЭС и МН1-ПЭС показали, что ощутимо повысить смазочные характеристики магнитных наномасел только заменой твердых частиц магнетита на мягкие частицы железа не удастся. Поэтому не стоит преувеличивать абразивное действие магнитных частиц наномасел при трении.

Если не принимать во внимание магнитные особенности масла МН1-ПЭС, то по своим реологическим, низкотемпературным и коллоидным свойствам, по испаряемости и невосприимчивости к окружающей среде оно очень близко соответствует пластичным смазочным материалам с дисперсионной средой из полиэтилсилоксана. Среди пластичных смазок, содержащих полиэтилсилоксан, одной из лучших по трибосвойствам признана смазка ОКБ-122-7. Триботехнические свойства смазки, определенные по методике испытаний магнитных масел, приведены в табл. 2. Испытания смазки ОКБ-122-7(1) проводили при разовой заправке узла трения смазкой, а смазки ОКБ-122-7(2) – при постоянном восполнении ее потерь на дорожке трения. Независимо от условий испытаний, смазочные свойства магнитного масла МН1-ПЭС выше, чем у смазки ОКБ-122-7, даже без присадки. Важный практический результат такого сравнения смазочных материалов заключается в том, что магнитные масла можно эффективно применять вместо пластичных смазок, содержащих полиэтилсилоксан.

Все рассмотренные смазочные масла характеризуются ресурсом работы, который определяется временным интервалом, в течение которого масло способно в процессе эксплуатации сохранять на допустимом уровне свои смазочные и физико-химические свойства. Для сравнительной оценки ресурса традиционного немагнитного смазочного материала и магнитного масла проводили длительные испытания узла трения, заправленного ограниченным объемом масла. Ресурс магнитного масла оказался приблизительно на 10 % меньше, чем, например, трансмиссионного масла ТМ-5-18 и на два-три порядка больше, чем пластичной смазки ОКБ-122-7. Магнитное масло переставало выполнять свое назначение после прекращения процесса поступления его в зону трения под действием магнитных сил из-за недопустимого повышения вязкости и снижения намагниченности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны технологические основы получения магнитных смазочных наномасел на основе полиэтилсилоксана, которые отличаются низкой летучестью и широким температурным диапазоном работы. Получены магнитные наномасла, стабилизированные различными по химическим свойствам ПАВ. Показаны некоторые отличительные физико-химические и трибологические особенности кремний-органических магнитных смазочных масел. Например, отмечена низкая коррозионная активность магнитных масел по отношению к металлическим поверхностям.

Смазочные свойства магнитных масел изучены при различных условиях трения, установлены их специфические особенности. Детально проанализировано влияние на

трение ряда противоизносных присадок, растворенных в маслах, и предложен механизм их действия. Выявлена, в частности, необычная экстремальная зависимость смазочных свойств от концентрации присадки.

Основной вывод по работе заключается в том, что по трибологическим свойствам разработанные магнитные наномасла сравнимы с традиционным пластичным и жидким смазочными материалами. Однако наличие у наномасел аномальных для жидкостей магнитных свойств значительно расширяет область их эффективного применения. В реальных узлах трения магнитные смазочные наномасла будут иметь преимущество из-за того, что их движением можно автоматически управлять магнитными полями, и это позволяет исключить работу фрикционного контакта в условиях смазочного голодания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Магнитные жидкости в машиностроении / Д.В. Орлов, Ю.О. Михалев, Н.К. Мышкин и др. / под. ред. Д.В. Орлова, В.В. Подгоркова. М.: Машиностроение, 1993. 272 с.
2. Фертман В.Е. Магнитные жидкости: справочное пособие. Минск: Вышэйшая школа, 1988. 184 с.
3. Болотов А.Н., Бурдо Г.Б. Расчет ресурса магнитожидкостных узлов трения, работающих в вакууме или газовой среде // *Современное машиностроение. Наука и образование*. 2017. № 6. С. 294–303.
4. Ермаков С.Ф. Влияние смазочных материалов и присадок на триботехнические характеристики твердых тел. Ч. 2. Активное управление трением // *Трение и износ*. 2012. Т. 33. № 3. С. 275–283.
5. Болотов А.Н., Новикова О.О., Новиков В.В. Исследование триботехнических свойств наноструктурных магнитных смазочных наномасел с различными дисперсионными средами // *Трение и износ*. 2017. Т. 38. № 2. С. 107–113.
6. Bolotov A.N., Sozonov K.K., Orlov D.V. On the role of structural components of magnetic oil in the boundary lubrication conditions // *Friction and wear*. 1991. V. 12. № 5. P. 824–831.
7. Мишак А. Трибологические свойства феррожидкости // *Трение и износ*. 2006. Т. 27. № 3. С. 330–336.
8. Фахрутдинов Р.З., Ганиева Т.Ф. Смазочные наномасла: учебное пособие. СПб.: Проспект науки, 2018. 160 с.
9. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О., Мардян М.В. Комплект оборудования для исследования физико-химических свойств нанодисперсных магнитных сред. Ч. 1 // *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования*. 2013. № 6. С. 68.
10. Байбуртский Ф.С. Магнитные жидкости: способы получения и области применения. URL: <http://maineticliquid.narod.ru/autoritv/008.htm> (дата обращения: 12.03.2020).
11. Болотов А.Н., Лочагин Н.В., Михалев Ю.О. Роль магнитного поля при трении поверхностей, смазываемых магнитным маслом // *Трение и износ*. 1988. Т. 9. № 5. С. 870–878.

Для цитирования: Бурдо Г.Б., Болотов А.Н. Смазочные наномасла на основе кремний-органических наножидкостей // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2020. № 4 (8). С. 13–21.

LUBRICATING OILS BASED ON ORGANOSILICON NANOFLUIDS

G.B. BURDO, Dr. Sc., A.N. BOLOTOV, Dr. Sc.

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb.,
170026, Tver, Russian Federation, e-mail: gbtms@yandex.ru

Technological features of synthesis of a polyethylsiloxane-based lubricating nanomaseline are described, and its lubricating properties are investigated under various friction conditions. Recommendations are given for the selection of components for creating magnetic lubricating oil, which are characterized by various mechanisms for reducing friction and wear of rubbing surfaces. The specific features of the processes of friction of surfaces lubricated with magnetic nano-oil are shown.

Keywords: magnetic lubricating oil, friction; wear, dispersed phase, magnetic dispersed phase, antifriction additives, antiwear additives.

REFERENCES

1. Magnitnyye zhidkosti v mashinostroyenii [Magnetic fluids in mechanical engineering]. D.V. Orlov, Yu.O. Mikhailov, N.K. Myshkin i dr. Pod. red. D.V. Orlova, V.V. Podgorkova. Moscow: Mashinostroyeniye, 1993. 272 p.
2. Fertman V.E. Magnitnyye zhidkosti: spravochnoe posobie [Magnetic fluids: a reference guide]. Minsk: Vysheyshaya shkola, 1988. 184 p.
3. Bolotov A.N., Burdo G.B. Calculation of the resource of magnetofluidic friction units operating in a vacuum or gas medium. *Sovremennoye mashinostroyeniye. Nauka i obrazovaniye*. 2017. No. 6, pp. 294–303. (In Russian).
4. Ermakov S.F. The effect of lubricants and additives on the tribological characteristics of solids. Part 2. Active Friction Management. *Trenie i iznos*. 2012. V. 33. No. 3, pp. 275–283. (In Russian).
5. Bolotov A.N., Novikova O.O., Novikov V.V. Investigation of the tribotechnical properties of nanostructured magnetic lubricating nanoparticles with various dispersion media. *Treniye i iznos*. 2017. V. 38. No. 2, pp. 107–113. (In Russian).
6. Bolotov A.N., Sozonov K.K., Orlov D.V. On the role of structural components of magnetic oil in the boundary lubrication conditions. *Friction and wear*. 1991. V. 12. No. 5, pp. 824–831.
7. Mishchak A. Tribological properties of ferrofluid. *Treniye i iznos*. 2006. V. 27. No. 3, pp. 330–336. (In Russian).
8. Fakhрутдинov R.Z., Ganiyeva T.F. Smazochnyye nanomasla: uchebnoye posobiye [Lubricating Nano-Oils: Textbook.]. St. Petersburg: Prospekt nauki, 2018. 160 p.
9. Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O., Mardyan M.V. A set of equipment for studying the physicochemical properties of nanodispersed magnetic media. Part 1. *Mekhanika i fizika protsessov na poverkhnosti i v kontakte tverdykh tel, detaley tekhnologicheskogo i energeticheskogo oborudovaniya*. 2013. No. 6, pp. 68. (In Russian).
10. Bayburtsky F.S. Magnitnyye zhidkosti: sposoby polucheniya i oblasti primeneniya. [Magnetic fluids: production methods and applications]. URL: <http://maimeticliquid.narod.ru/autoritv/008.htm> (date accessed: 12.03.2020).
11. Bolotov A.N., Lochagin N.V., Mikhalev Yu.O. The role of the magnetic field during friction of surfaces lubricated by magnetic oil. *Treniye i iznos*. 1988. V. 9. No. 5, pp. 870–878. (In Russian).

Поступила в редакцию/received: 07.08.2020; после рецензирования/revised: 26.10.2020;
принята/accepted 15.11.2020

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ОПОРНО-ПОВОРОТНЫХ ПОДШИПНИКОВ

А.С. ИВАНОВ, д-р техн. наук

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,
105005, Москва, ул. Бауманская 2-я, д. 5, стр. 1, e-mail: a-s-ivanov@yandex.ru

© Иванов А.С., 2020

Рассмотрены особенности нагружения и расчета резьбовых соединений вращающегося и неподвижного относительно нагрузки колец подшипника. Обоснована формула для расчета запаса прочности по сопротивлению усталости резьбовой части винта.

Ключевые слова: опорно-поворотный подшипник, винты, сопротивление усталости, коэффициент чувствительности детали к асимметрии цикла.

DOI: 10.46573/2658-5030-2020-4-22-31

ВВЕДЕНИЕ

Во многих отраслях промышленности широко используются мотор-редукторы – устройства, которые соединяют в себе функции электродвигателя и редуктора. Этот агрегат отличается высоким КПД, удобством в обслуживании, компактными размерами.

Для того чтобы разрабатывать мотор-редукторы, конкурентоспособные на мировом рынке, существующие методы конструирования необходимо дополнить новыми, основанными на учете результатов анализа отечественных и зарубежных методов проектирования.

Надежность и эффективность работы мотор-редуктора в значительной степени зависит от правильного выбора подшипникового узла. Рассмотрим особенности расчета и конструирования подшипникового узла на примере опорно-поворотных подшипников в мотор-редукторах, которые применяются в приводах ленточного транспортера.

АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ СХЕМ ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ КОНСОЛЬНО НАГРУЖЕННЫХ ВАЛОВ

Как известно, вал обычно устанавливают на двух опорах и используют три схемы осевой фиксации валов: «враспор»; с одной плавающей и другой фиксирующей в двух осевых направлениях опорами; с обеими плавающими в осевом направлении опорами. В схеме осевой фиксации «враспор» каждый подшипник фиксирует вал в одном осевом направлении. Эта схема наиболее проста и технологична. Она применяется, если опоры расположены в одном корпусе и вал относительно короткий. Схема с одной плавающей и другой фиксирующей в двух осевых направлениях опорами менее технологична и повышает стоимость машины из-за необходимости как большего количества операций обработки посадочных мест под подшипники, так и большего количества деталей, образующих подшипниковые узлы. Обе плавающие опоры используются только тогда, когда осевую фиксацию вала обеспечивают иные детали, кроме подшипника (например, шевронное колесо в зубчатой передаче шевронными колесами).

Если вал нагружен консольно силой F_R (рис. 1а) [1], то для снижения прогибов вала в точке приложения нагрузки до приемлемых значений консоль a стремятся уменьшить, накладывая ограничение на соотношение l/a , где l – расстояние между радиальными реакциями в опорах 1 и 2. Обычно выдвигается условие

$$l/a \geq 2. \quad (1)$$

Чтобы выполнить такое условие и при этом обеспечить минимальные осевые габаритные размеры всего привода, радиальные подшипники опор вала заменяют на радиально-упорные, установленные «врастяжку» (рис. 1б), что является разновидностью схемы «враспор».

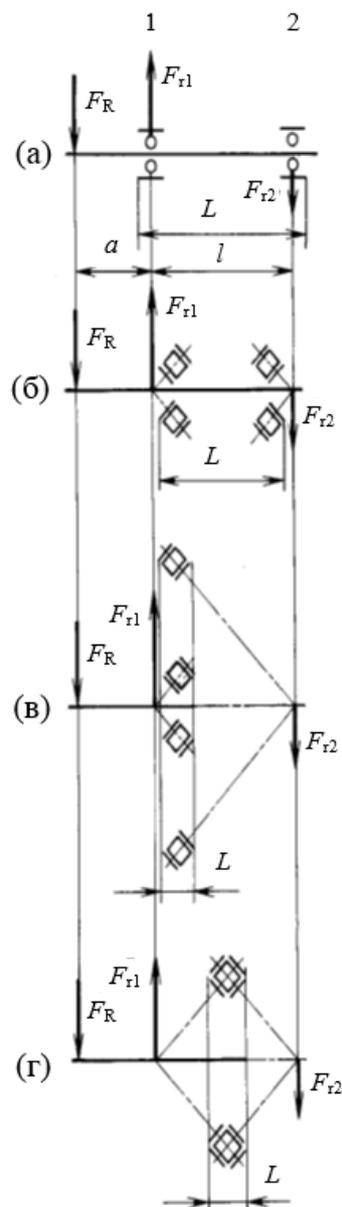


Рис. 1. Вал, нагруженный консольно, установлен на подшипниках: радиальных (а); радиально-упорных «врастяжку» (б); радиально-упорных разного диаметра «врастяжку» (в); двух соединенных радиально-упорных большого диаметра «врастяжку», образующих опорно-поворотный подшипник (г)

При схеме «врастяжку» часть вала, находящаяся между опорами, растягивается осевой силой, а не сжимается, как при схеме «враспор», и осевой габаритный размер привода (размер L на рисунке) снижается благодаря тому, что при расчете нагрузок, действующих на опоры, радиальные реакции F_{r1} и F_{r2} прикладываются к радиально-упорным подшипникам в местах пересечений с осью вала нормалей, проведенных к серединам дорожек качения их наружных колец. При этом смещение точки приложения радиальной реакции l_0 относительно середины ширины подшипника можно оценить по формуле

$$l_0 \approx 0,25(d + D)\operatorname{tg}\alpha, \quad (2)$$

где α – угол контакта; d и D – внутренний и наружный диаметры подшипника.

Из формулы (2) следует, что с увеличением среднего диаметра подшипника увеличивается смещение l_0 . Значит, при схеме установки подшипников «врастяжку», увеличивая диаметральные размеры подшипника хотя бы одной из двух опор, можно уменьшать осевой габаритный размер L привода (см. рис. 1в).

ОПОРНО-ПОВОРОТНЫЕ ПОДШИПНИКИ В МОТОР-РЕДУКТОРАХ

На рис. 2 и 3 в качестве примера конструктивных реализаций расчетных схем рис. 1 изображен привод ленточного транспортера одноступенчатым цилиндрическим мотор-редуктором с внутренним зацеплением. На рис. 2 представлено два варианта исполнения опор тихоходного вала этого редуктора [1].

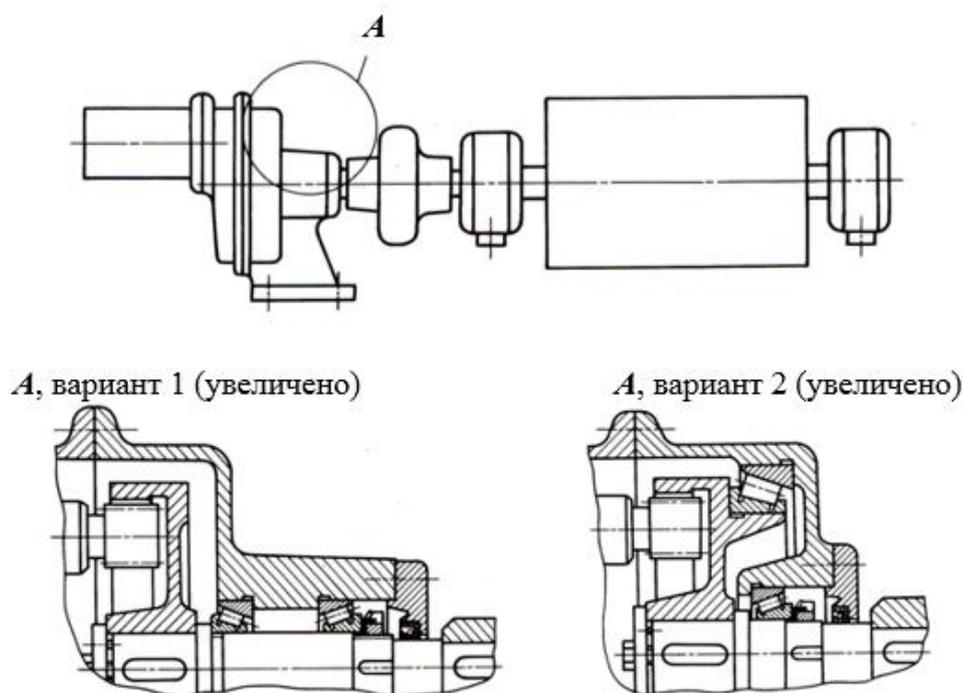


Рис. 2. Схема привода барабана ленточного транспортера одноступенчатым цилиндрическим мотор-редуктором с внутренним зацеплением и варианты конструктивного исполнения опор выходного вала мотор-редуктора

Опоры тихоходного вала выполнены в виде конических роликовых подшипников, установленных «врастяжку», и в первом варианте имеют одинаковый диаметр обоих подшипников, а во втором – разный. Регулировка осевого зазора в подшипниках осуществляется гайкой. Благодаря размещению одного подшипника внутри другого второй вариант получился более компактным в осевом направлении.

Из формул (1), (2) следует, что чем больше средний диаметр двух радиально-упорных подшипников, установленных «врастяжку», тем меньшим допускается расстояние между двумя опорами консольно нагруженного вала. В пределе получим геометрическое совпадение положений двух подшипников и замену двух опор одним опорно-поворотным подшипником (см. рис. 1г). Конструктивно совмещенные друг с другом две опоры из радиально-упорных подшипников, установленных «врастяжку», образуют так называемый опорно-поворотный подшипник (ОПП), который, в отличие от обычных подшипников, позволяет реализовать для валов одноопорное закрепление и воспринимать не только осевую F_a и радиальную F_r силы, но и опрокидывающий момент M .

На рис. 3 показан привод ленточного транспортера с помощью того же ранее рассмотренного (см. рис. 2) одноступенчатого цилиндрического мотор-редуктора с внутренним зацеплением, в котором опорой зубчатого колеса и барабана транспортера служит ОПП. В качестве опоры зубчатого колеса с внутренним зубом применен ОПП. В связи с тем, что это колесо имеет достаточно большой размер, оказалось удобным использовать ОПП с большим диаметром. При этом, учитывая, что подшипник допускает нагружение опрокидывающим моментом значительной величины, на данном подшипнике закреплен барабан ленточного транспортера. Из чертежа видно, что тихоходный вал оказался не нужен. Таким образом, благодаря замене двух радиально-упорных подшипников одним опорно-поворотным удалось уменьшить не только осевую габаритный размер, но и массу привода.

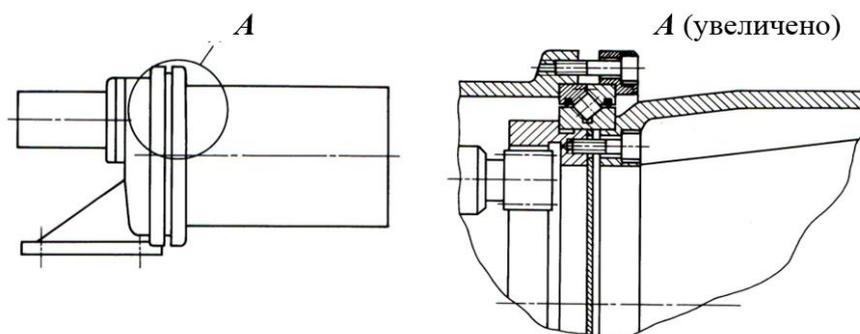


Рис. 3. Схема привода барабана ленточного транспортера одноступенчатым цилиндрическим мотор-редуктором с внутренним зацеплением

Производство ОПП освоено фирмами INA (Германия), THK (Япония), FBJ (Япония), Rothe Erde (Германия), Franke (Германия), SKF (Швеция), Kaydon (США), Rollix (Франция), ISB (Италия), PSL (Словакия) и др. В России их начал выпускать АвтоВАЗ.

Подшипниковый узел, основой которого является ОПП, распределяет нагрузки (осевую F_a и радиальную F_r силы, а также опрокидывающий момент M) между соединяемыми им звеньями посредством резьбовых соединений. Пример такого узла приведен на рис. 4, где ОПП – подшипник с перекрестным расположением роликов, отличающийся от других видов ОПП повышенной жесткостью при малых толщине и ширине подшипниковых колец. Его сепаратор состоит из цилиндров,

распирающих ролики, причем торцы цилиндров имеют вогнутые поверхности по форме ролика. Указанный подшипник встраивают в запястье руки робота, используют в качестве опор поворотных столов станков и в других случаях. Такой подшипник изготавливают фирмы SKF, INA, THK, Kaydon, Rollix, PSL и др.

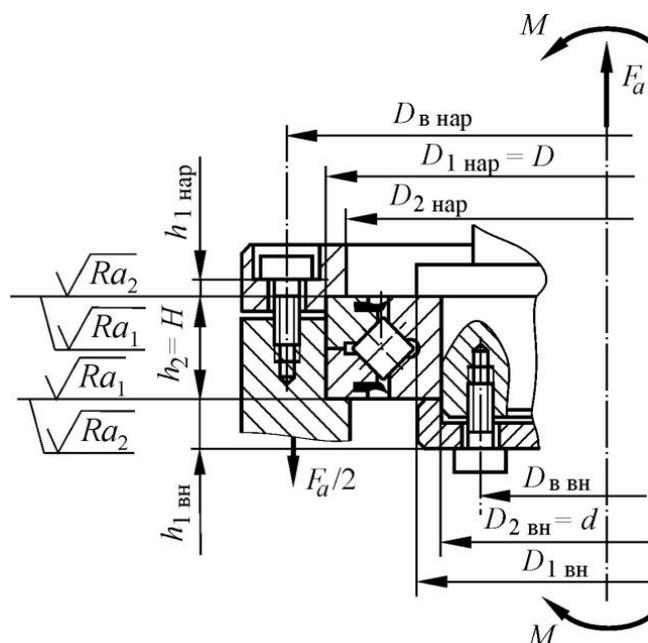


Рис. 4. Схема подшипникового узла, основой которого является подшипник с перекрестным расположением роликов

РЕЗЬБОВЫЕ СОЕДИНЕНИЯ В ОПОРНО-ПОВОРОТНЫХ ПОДШИПНИКАХ

Резьбовые соединения подшипникового узла ОПП характеризуются [2] классом прочности винтов, их номинальным диаметром d_v и внутренним диаметром d_3 резьбы, модулем упругости E_v материала винта, числом винтов наружного $n_{нар}$ и внутреннего $n_{вн}$ соединения, модулями упругости E_1 , E_2 и коэффициентами Пуассона μ_1 , μ_2 материалов стягиваемых винтами деталей, параметрами шероховатости Ra_1 , Ra_2 контактирующих поверхностей, размерами: наружным диаметром $D_{1 нар}$ опорной поверхности наружного кольца ОПП; внутренним диаметром $D_{2 нар}$ опорной поверхности наружного кольца ОПП; диаметром окружности $D_{в нар}$ расположения наружных винтов; наружным диаметром $D_{1 вн}$ опорной поверхности внутреннего кольца ОПП; внутренним диаметром $D_{2 вн}$ опорной поверхности внутреннего кольца ОПП; диаметр окружности $D_{в вн}$ расположения внутренних винтов; рабочими толщинами $h_{1 нар}$, $h_{1 вн}$ притягиваемых винтами фланцев; шириной H , наружным D и внутренним d диаметрами подшипника.

Каждый винт рассматриваемых резьбовых соединений нагружается [1, 2] силой $F_{зат}$ затяжки винта и силой F_v , создаваемой внешней нагрузкой. Обычно используют винты высоких классов прочности (8.8 и выше) и силу затяжки винта назначают такой, чтобы напряжения в винте от этой силы достигали $0,7\sigma_T$, где σ_T – предел текучести материала винта.

Сила, создаваемая внешней нагрузкой, рассчитывается как

$$F_B = F_{BF} + F_{BM},$$

где $F_{BF} = \chi_F \frac{F_a}{n}$ – сила в затянутом винте, созданная осевой силой F_a ; $F_{BM} = \chi_M M \frac{x_1}{\sum x_i^2}$ – сила в затянутом винте, созданная опрокидывающим моментом M ; χ_F , χ_M – коэффициенты основной нагрузки, определяющие, какую долю внешней нагрузки, приходящуюся на винты, составляет соответственно отрывающая сила и опрокидывающий момент; $n = n_{нар}$ или $n_{вн}$ в зависимости от того, какое резьбовое соединение рассчитывается; x_1 и x_i – расстояние наиболее удаленного винта до оси поворота стыка и i -го винта до этой оси.

Коэффициенты основной нагрузки вычисляются по формулам:

$$\chi_F = \frac{\lambda_k + \lambda_d}{\lambda_k + \lambda_d + \frac{\lambda_B}{n}};$$

$$\chi_M = \frac{\lambda_k + \lambda_d}{\lambda_k + \lambda_d + \frac{\lambda_B I_y}{A \sum x_i^2}},$$

где $\lambda_k = k\varepsilon/A$ – податливость контактирующих поверхностей деталей, зависящая от коэффициента k контактной податливости (подробнее в [1–3]), коэффициента ε масштаба (подробнее в [1–3]) и площади A контактной поверхности; $\lambda_d = (h_1/E_1 + h_2/E_2)/A$ – податливость стягиваемых винтами деталей, где h_1 равен $h_{1 нар}$ или $h_{1 вн}$ в зависимости от того, какое резьбовое соединение рассчитывается; $\lambda_B = [(0,5d_B + l_0)/(\pi d^2) + (0,5d_B + l_1)/(\pi d_3^2)]4/E_B$ – податливость винта, где l_0 , l_1 – длины ненарезанной и нарезанной нагруженной частей винта. Исходными для вычисления коэффициента k контактной податливости являются параметры E_1 , E_2 , μ_1 , μ_2 , Ra_1 , Ra_2 , $D_{1 нар}$, $D_{2 нар}$, $D_{в. нар}$, $D_{1 вн}$, $D_{2 вн}$, $D_{в. вн}$.

Винты резьбового соединения фланца с кольцом подшипника, вращающегося относительно нагрузки, испытывают переменное во времени нагружение (рис. 5а). Поэтому их следует рассчитывать на сопротивление усталости. Наиболее нагруженный винт резьбового соединения фланца с кольцом подшипника, неподвижного относительно нагрузки, подвержен действию статической нагрузки (рис. 5б), поэтому этот винт следует проверять на статическую прочность.

Рассмотрим особенности расчета резьбовых соединений ОПП.

Первая заключается в необходимости установления, какое из резьбовых соединений фланца – с наружным или внутренним кольцом подшипника – вращается относительно нагрузки. Так, в случае использования ОПП как опоры зубчатого колеса и барабана транспортера (см. рис. 3) относительно нагрузки вращается соединение фланца с внутренним кольцом подшипника. В случае ОПП, обеспечивающего возможность поворота робота относительно вертикальной оси (рис. 6), относительно нагрузки вращается соединение фланца с наружным кольцом подшипника.

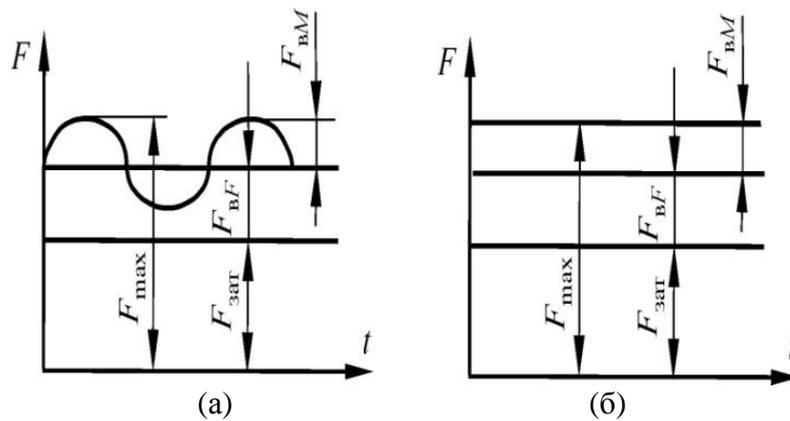


Рис. 5. Сила, нагружающая винт резьбового соединения, стягивающего фланец с кольцом подшипника, который вращается (а) или неподвижен (б) относительно нагрузки

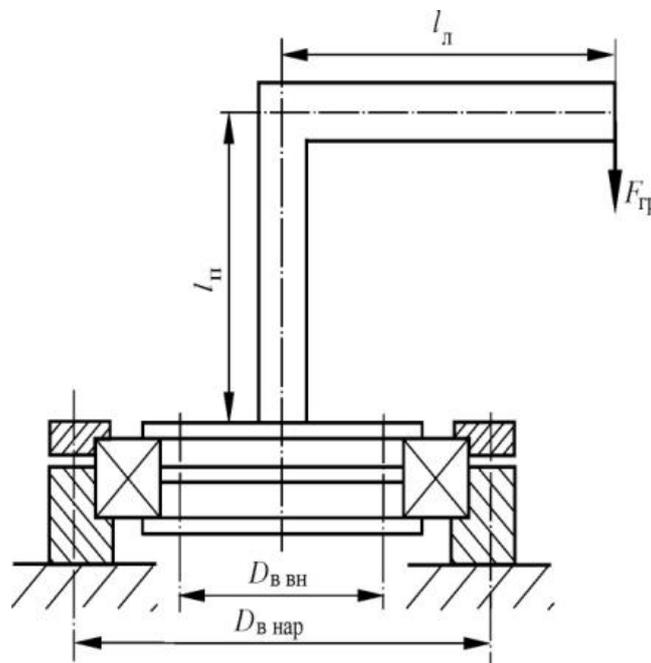


Рис. 6. Схема работа, в котором ОПШ обеспечивает возможность поворота относительно вертикальной оси

Вторая особенность состоит в том, что расчет сопротивления усталости винта следует проводить для двух опасных сечений: в его гладкой части вблизи выкружки, расположенной у головки винта, и в резьбовой части под первым нагруженным витком резьбы.

Коэффициент запаса прочности для первого случая должен удовлетворять условию [4]:

$$S_{a \text{ гл}} = \sigma_{-1} / (K_{\sigma D \text{ гл}} \sigma_{a \text{ гл}} + \Psi_{\sigma D} \sigma_{m \text{ гл}}) \geq 2, \quad (3)$$

где σ_{-1} – длительный предел выносливости материала винта; $K_{\sigma D \text{ гл}}$ – коэффициент снижения предела выносливости винта в его гладкой части; $\sigma_{a \text{ гл}}$ – амплитуда

напряжений в гладкой части винта; $\Psi_{\sigma D}$ – коэффициент чувствительности детали к асимметрии цикла; $\sigma_{m\text{гл}}$ – среднее напряжение цикла винта в его гладкой части.

Коэффициент запаса прочности для второго случая

$$S_{a p} = \sigma_{-1} / (K_{\sigma D p} \sigma_{a p}) \geq 2, \quad (4)$$

где $K_{\sigma D p}$ – коэффициент снижения предела выносливости винта в его резьбовой части; $\sigma_{a p}$ – амплитуда напряжений в резьбовой части винта.

Формула (4) отличается от формулы (3) отсутствием второго слагаемого в знаменателе, что объясняется зависимостью коэффициента $\Psi_{\sigma D}$ чувствительности детали к асимметрии цикла от коэффициента $K_{\sigma D}$ снижения предела выносливости детали, которая согласно ГОСТ 25504-82 «Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости» имеет вид

$$\Psi_{\sigma D} = \Psi_{\sigma} / K_{\sigma D}, \quad (5)$$

где Ψ_{σ} – коэффициент чувствительности материала к асимметрии цикла (для сталей $\Psi_{\sigma} = 0,02 + 0,0002\sigma_{\text{в}}$, где $\sigma_{\text{в}}$ – предел прочности материала винта в мегапаскалях, для винтов высоких классов прочности Ψ_{σ} близок значению 0,22). При небольшом коэффициенте $K_{\sigma D}$, что характерно для гладкой части винта вблизи выкружки ($K_{\sigma D\text{гл}} \approx 1,5$ [4]), коэффициент $\Psi_{\sigma D}$ мало отличается от Ψ_{σ} и второе слагаемое в формуле (3) оказывает заметное влияние на запас прочности винта. Если коэффициент $K_{\sigma D}$ существенно больше трех, что характерно для резьбы винта ($K_{\sigma D p} \approx 4,5$ [4]), то $\Psi_{\sigma D}$ оказывается близким к нулю и влияние второго слагаемого в формуле для запаса прочности становится незначительным.

Смысл формулы (5) поясняет рис. 7 [5], из которого следует, что увеличение среднего напряжения цикла практически не уменьшает предельно допустимой амплитуды напряжений в резьбовой шпильке.

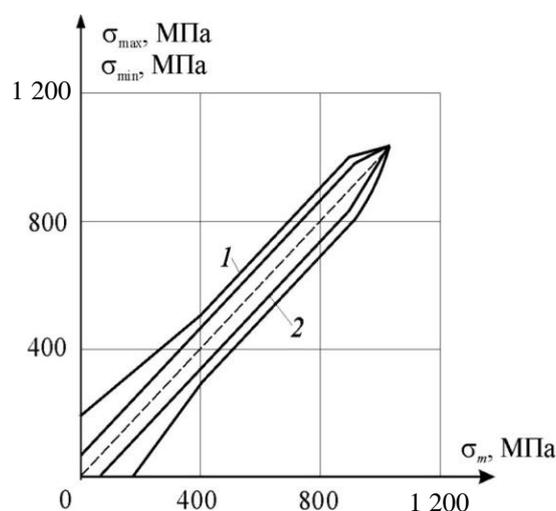


Рис. 7. Диаграмма предельных напряжений для резьбового соединения шпилькой М10 с накатанной резьбой. Шпилька термически обработана:
1 – перед накаткой резьбы; 2 – после накатки резьбы (закалена)

Амплитуды напряжений в гладкой и резьбовой частях винта вычисляют по формулам $\sigma_{a\text{ гл}} = 0,5F_{\text{вМ}} / (\pi d_{\text{в}}^2/4)$ и $\sigma_{a\text{ р}} = 0,5F_{\text{вМ}} / (\pi d_3^2/4)$. Среднее напряжение цикла в гладкой части винта $\sigma_{m\text{ гл}} = (F_{\text{зат}} + 0,5F_{\text{в}}) / (\pi d_{\text{в}}/4)$.

Расчет статической прочности винта следует проводить для опасного сечения по резьбе:

$$S_{\text{max}} = \sigma_{\text{Г}} / \sigma_{\text{max}} \geq 1,2 \dots 2,5, \quad (6)$$

где $\sigma_{\text{max}} = 4F_{\text{max}} / (\pi d_3^2)$ – напряжение, возникающее в резьбовой части винта, создаваемое силой затяжки $F_{\text{зат}}$, силой $F_{\text{вФ}}$ и силой $F_{\text{вМ}}$ (см. рис. 5б), т.е. $F_{\text{max}} = F_{\text{зат}} + F_{\text{вФ}} + F_{\text{вМ}}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Опорно-поворотные подшипники в России выпускаются индивидуально или мелкосерийно и не вошли пока в отечественные каталоги, хотя во всем мире их применение неуклонно расширяется. Использование ОПП способно повысить технический уровень мотор-редукторов за счет снижения их металлоемкости и уменьшения габаритных размеров. Рассмотрены конструктивные схемы подшипниковых узлов консольно нагруженных валов и место ОПП в этих схемах.

Показаны особенности расчета резьбовых соединений ОПП. Расчет сопротивления усталости винта следует проводить для двух опасных сечений – в его гладкой части вблизи выкружки, расположенной у головки винта, и в резьбовой части под первым нагруженным витком резьбы. Установлены критерии, которым должны удовлетворять коэффициенты запаса прочности для этих случаев. Приведено выражение для расчета статической прочности винта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Подшипники приводов: учебное пособие / М.М. Ермолаев, Б.И. Зубренков, А.С. Иванов, М.С. Куц, С.В. Муркин, М.В. Фомин, А.В. Чиркин, А.В. Шматков; под ред. А.С. Иванова. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. 198 с.
2. Иванов А.С., Муркин С.В. Расчет и проектирование резьбовых соединений приводов. М.: Инновационное машиностроение, 2015. 108 с.
3. Иванов А.С., Измайлов В.В. Расчет контактной деформации при конструировании машин // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2006. № 8. С. 3–10.
4. Серенсен С.В., Когаев В.П., Шнейдерович Р.М. Несущая способность и расчет деталей машин на прочность. М.: Машгиз, 1963. 452 с.
5. Niemann G., Winter H. Höhn B.-R. Maschinenelemente. Band 1: Konstruktion und Berechnung von Verbindungen, Lagern, Wellen. Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, 2001. 903 s.

Для цитирования: Иванов А.С. Особенности расчета резьбовых соединений опорно-поворотных подшипников // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2020. № 4 (8). С. 22–31.

FEATURES OF THE CALCULATION OF THREADED JOINTS OF SLEWING BEARINGS

A.S. IVANOV, Dr. Sc.

Bauman Moscow State Technical University, 5/1, Baumanskaya 2-ya st.,
105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: a-s-ivanov@yandex.ru

The particularities of loading and calculation of threaded joint for rotating and stationary related to the load of the bearing rings have been considered. The formula for calculating the safety factor of the fatigue strength of screw threaded parts has been justified.

Keywords: slewing bearing, screw, fatigue strength, response factor to cycle asymmetry.

REFERENCES

1. Podshipniki privodov: uchebnoye posobiye [Bearings of drives: textbook] / M.M. Ermolaev, B.I. Zubrenkov, A.S. Ivanov, M.S. Kuts, S.V. Murkin, M.V. Fomin, A.V. Chirkin, A.V. Shmatkov; ed. A.S. Ivanov. Moscow: MGTU im. N.E. Baumana, 2019. 198 p.
2. Ivanov A.S., Murkin S.V. Raschet i proyektirovaniye rezbovykh soyedineniy privodov. [Calculation and design of threaded connections for drives]. Moscow: Innovatsionnoye mashinostroyeniye, 2015. 108 p.
3. Ivanov A.S., Izmailov V.V. Calculation of contact deformation in the design of machines. *Treniye i smazka v mashinakh i mekhanizмах*. 2006. No. 8, pp. 3–10. (In Russian).
4. Serensen S.V., Kogaev V.P., Shneiderovich R.M. Nesushchaya sposobnost i raschet detaley mashin na prochnost. [Bearing capacity and strength calculation of machine parts]. Moscow: Mashgiz, 1963. 452 p.
5. Niemann G., Winter H. Höhn B.-R. Maschinenelemente. Band 1: Konstruktion und Berechnung von Verbindungen, Lagern, Wellen. Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, 2001. 903 p. (In German).

Поступила в редакцию/received: 14.07.2020; после рецензирования/ revised: 10.09.2020;
принята/accepted 15.10.2020

ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 622.331.002.5

АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ ТОРФЯНЫХ МАШИН В ПРОЦЕССЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

И.В. ГОРЛОВ, д-р техн. наук

Тверской государственный технический университет, 170026, Тверь,
наб. Аф. Никитина, д. 22, e-mail: gorloviv@yandex.ru

© Горлов И.В., 2020

В статье рассматривается методика предварительного анализа надежности конструкции торфяных машин (ТМ) на стадии проектирования. Для проектируемых ТМ можно проводить оценку надежности, используя обобщенные статистические данные по аналогичным торфяным машинам, но при этом возникают существенные ошибки, не позволяющие с требуемой точностью прогнозировать техническое состояние разрабатываемого оборудования. Предлагаемая методика позволяет оценить разрабатываемую конструкцию машины с точки зрения надежности на основе анализа эксплуатации аналогичных агрегатов существующих ТМ. Для этого существующие ТМ разбиваются на отдельные механизмы, для которых имеются статистические данные по параметрам отказов. Аналогично производится разбиение проектируемых машин, при этом для получения необходимых параметров надежности предполагается использовать коэффициентный метод расчета с учетом наличия в разрабатываемой конструкции ТМ количества наиболее ответственных деталей и узлов. Таким образом, использование данных эксплуатации существующих ТМ позволяет повысить качество прогнозирования изменения параметров надежности разрабатываемых машин. Как следствие, при их эксплуатации достигается снижение количества простоев из-за труднопрогнозируемых отказов, что позволяет увеличить сезонную производительность ТМ.

Ключевые слова: торфяные машины, эксплуатация, надежность, ресурс, прогнозирование, производительность, исследования.

DOI: 10.46573/2658-5030-2020-4-32-38

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшей особенностью эксплуатации ТМ для фрезерного способа добычи является сезонность использования и метеорологические ограничения, влияющие на сушку торфяной крошки. Вследствие этого возникновение сложных отказов приводит к значительным простоям в периоды с благоприятными погодными условиями, что нарушает производственный цикл добычи и ведет к существенному снижению производства фрезерного торфа [1].

Для повышения эффективности торфяного производства многие производители ТМ разрабатывают новые технологические машины с повышенной производительностью и более широкими возможностями использования, что в большинстве случаев ведет к существенному усложнению их конструкции. Оценить надежность таких машин на этапе проектирования достаточно сложно,

так как их структура значительно изменяется по сравнению с существующими аналогами.

При внедрении новых машин в торфяное производство [2] для снижения потерь из-за непредвиденных отказов необходимо использовать предварительную оценку их надежности, полученную на этапе проектирования. Это позволит в процессе разработки планов добычи учитывать рекомендации производителей новых машин по составлению планов-графиков ремонта и обслуживания ТМ.

Разработка таких рекомендаций затруднительна без использования опыта эксплуатации аналогичных ТМ, но при этом применение статистических данных для существующих машин не всегда корректно из-за их отличия от новых. Отчасти данную проблему можно решать за счет использования имеющихся усредненных статистических данных по существующим аналогичным машинам с учетом количества узлов в новых машинах, но в этом случае не всегда могут быть учтены особенности нагружения деталей проектируемого оборудования.

При проектировании новых торфяных машин необходимо учитывать особенности взаимодействия деталей в процессе работы, так как рабочие органы ТМ эксплуатируются в тяжелых условиях и испытывают при этом значительные статические и динамические нагрузки. Для проверки работоспособности проектируемых машин проводятся лабораторные и модельные испытания, но в большинстве случаев они не могут обеспечить необходимую полноту данных по надежности.

Таким образом, при разработке новых торфяных машин требуется использование новых подходов для анализа их надежности на этапе проектирования. Для решения данной проблемы можно структурно разделить существующую торфяную машину на механизмы, имеющие определенное назначение, получить для них статистические данные по надежности, а затем использовать эту информацию для аналогичных механизмов проектируемой машины с учетом отличия ее конструкции.

Целью данного исследования является разработка методики установления предварительных параметров надежности для проектируемой торфяной машины на основе анализа эксплуатации аналогичных машин с разделением полученных данных по механизмам, имеющим определенное назначение, что позволит на стадии внедрения новых ТМ осуществлять прогнозирование изменения технического состояния оборудования и обеспечит наибольшую сезонную производительность.

АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ СУЩЕСТВУЮЩИХ ТОРФЯНЫХ МАШИН

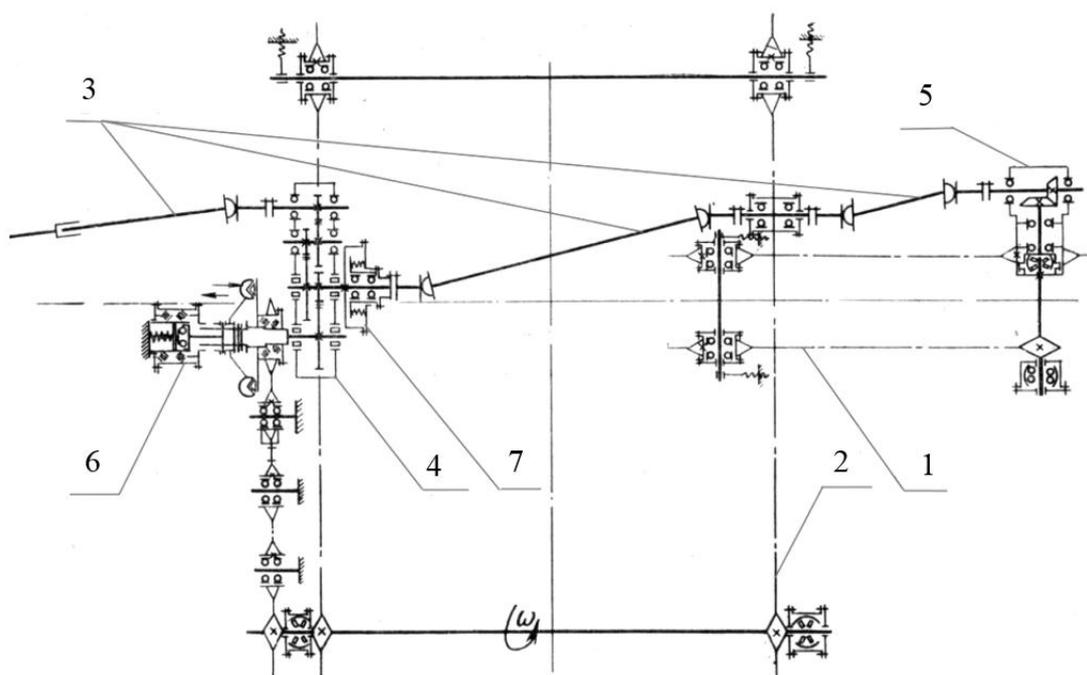
Анализ данных эксплуатации торфяных машин может осуществляться различными методами [3, 4], но исходя из целей исследования в первую очередь изучались отказы, связанные с отдельными механизмами, выполняющими определенные функции у ТМ для фрезерного способа добычи. На базе предприятия ОАО «Васильевский мох» в течение двух лет было исследовано более 30 ТМ.

Наиболее важны данные о машинах, имеющих сложную структуру механизмов, таких как скреперно-бункерные уборочные агрегаты МТФ-43А и МТФ-43АК, фрезеры Ф-6,5 и др.

В скреперно-бункерных уборочных агрегатах можно условно выделить несколько механизмов, такие как ковшовый элеватор загрузки, скребковый конвейер разгрузки, карданная передача, раздаточная коробка, редуктор привода ковшového элеватора (рисунок).

В процессе работы уборочных машин МТФ-43А и МТФ-43АК элеватор достаточно часто заклинивало древесными остатками, находящимися в торфяной

залежи, из-за чего приходилось останавливать машину для устранения проблем (в среднем это происходило с периодичностью 8...10 часов). В некоторых случаях заклинивание элеватора загрузки приводило к отказам предохранительных муфт, что требовало ее регулировки или замены некоторых деталей механизма. Нарботка на отказ данного механизма в среднем составляла 48...64 часа. Периодически (через 54...72 часа работы) происходил также сход цепи элеватора со звездочек из-за ослабления натяжения вследствие попадания древесных остатков.



Кинематическая схема уборочной машины МТФ-43:

- 1 – ковшовый элеватор; 2 – скребковый конвейер разгрузки; 3 – карданная передача; 4 – раздаточная коробка; 5 – редуктор привода ковшового элеватора; 6 – муфта включения привода выгрузки; 7 – предохранительная муфта ковшового элеватора

Наблюдались отказы карданных передач (в среднем один на 84 часа работы), отказы муфты включения привода выгрузки (в среднем один на 76 часов работы). Обрывы цепи ковшового элеватора происходили у машин, выработавших значительно более половины ресурса, в среднем для рассматриваемых машин по данной причине происходил один отказ на 165 часов работы. Встречались и другие отказы скреперно-бункерных уборочных агрегатов (особенно у машин с большой наработкой), но значительно реже и поэтому не учитывались.

При эксплуатации фрезеров наиболее часто происходили отказы приводов фрез из-за пробуксовывания предохранительных муфт (в среднем один отказ на 72 часа работы). Наблюдались также отказы карданных приводов (в среднем один отказ на 156 часов работы), отказ редуктора привода фрез у машин с наработкой значительно больше половины ресурса (что в среднем дает один отказ на 116 часов работы). Разрушение режущих элементов и другие отказы, встречавшиеся существенно реже, не учитывались.

Большинство из наблюдаемых отказов рассматриваемых механизмов происходило из-за наличия в обрабатываемой торфяной залежи древесных остатков, поэтому практически у всех исследуемых машин в конструкции предусмотрены предохра-

нительные устройства, от настройки которых зависит надежность функционирования ТМ. Кроме того, необходимо учитывать состояние торфяной залежи, что в принципе невозможно на этапе проектирования ТМ, в связи с чем полученные на основе представленного анализа параметры надежности носят ориентировочный характер.

АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОТКАЗОВ ПО МЕХАНИЗМАМ

Анализ распределения отказов показал, что отдельные механизмы исследуемых ТМ имеют сходную конструкцию, но различную величину потока отказов. Это связано с тем, что данные механизмы используются на разных этапах добычи. Соответственно, при определении параметров надежности проектируемой машины это обстоятельство должно обязательно учитываться. Поэтому использование зависимостей, например для получения потока отказов машины, который вычисляется суммированием произведений количества однотипных элементов на поток их отказов, будет давать значительные погрешности. Решением этой проблемы может стать методика расчета параметров надежности проектируемых машин с разделением по механизмам, имеющим различное назначение [5].

Проведем анализ функционирования ТМ на примере скреперно-бункерного уборочного агрегата, при работе которого на первом этапе происходит подбор торфяной крошки из предварительно сформированного валка. Древесные включения, которые встречаются в торфяной залежи, в процессе добычи попадают в торфяную крошку и при ее подъеме ковшовым элеватором в бункер могут заклинивать данный механизм. У оператора уборочной машины в кабине имеется устройство сигнализации остановки ковшового элеватора. Если оно срабатывает, то оператор останавливает машину, извлекает помеху из механизма загрузки и, если механизм исправен, продолжает работу. Таким образом, на первом этапе работы уборочной машины из торфяной крошки удаляется значительное количество включений, приводящих к остановкам и перегрузкам механизмов. На втором этапе работ, выполняемых данной машиной, заполненный бункер разгружается в установленных местах с помощью скребкового конвейера. Так как количество крупных инородных включений в торфяной крошке за счет их удаления на первом этапе снижается, то отказы данного механизма происходят существенно реже. Следовательно, хотя механизмы загрузки и выгрузки имеют сходную конструкцию, но рассматривать их с точки зрения надежности нужно отдельно. Кроме того, отказы, происходящие у ТМ со значительной наработкой и не встречающиеся у относительно новых машин, не должны учитываться при определении параметров надежности на этапе проектирования.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАДЕЖНОСТИ ТОРФЯНЫХ МАШИН НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Для определения параметров надежности проектируемых ТМ необходимо использовать данные эксплуатации по аналогичным машинам с разделением информации по механизмам. В большинстве случаев такие данные доступны для ТМ, применяемых для фрезерного способа добычи. Расчет параметров надежности с разделением по механизмам, выполняющим различные функции, можно проводить с помощью двух вариантов: по среднему уровню надежности аналогичных механизмов машин и с использованием коэффициентного метода.

При расчете по среднему уровню надежности однотипных механизмов, выполняющих аналогичные функции, принимается $\lambda_{ai}^i = \lambda_{ni}^i$, где λ_{ai}^i – интенсивность

потока отказов основных элементов, влияющих на надежность i -го механизма торфяной машины аналога; λ'_{ni} – интенсивность потока отказов основных элементов, влияющих на надежность i -го механизма проектируемой ТМ. Следовательно, для ТМ как сложных механических систем, состоящих из r механизмов, которые имеют определенное назначение, можно использовать известные интенсивности потока отказов λ'_{ai} для механизмов машин-аналогов с учетом количества N'_{ni} элементов i -го механизма проектируемой машины и определить суммарный поток отказов проектируемой ТМ:

$$\lambda'_n = \sum_{i=1}^r N'_{ni} \lambda'_{ai},$$

а наработку на отказ проектируемой машины можно рассчитать по выражению

$$T'_{m} = \frac{1}{\lambda'_n}.$$

Параметры надежности проектируемой машины можно также рассчитать, используя коэффициентный метод с учетом результатов опытной эксплуатации машины аналога. Для этого определяется поправочный коэффициент

$$a = \frac{T'_{наф}}{T'_{на}},$$

где $T'_{на}$ – расчетная наработка на отказ аналогичной торфяной машины; $T'_{наф}$ – опытная наработка на отказ машины.

$T'_{на}$ определяется на основе табличных данных потока отказов λ'_{ai} для отдельных механизмов N'_{ai} , имеющих определенное назначение:

$$T'_{на} = \left(\sum_{i=1}^r N'_{ai} \lambda'_{ai} \right)^{-1}.$$

Нарработка на отказ исследуемой машины

$$T'_{m} = a T'_{на}.$$

Представленные методы расчета параметров надежности проектируемых ТМ являются достаточно простыми, но позволяют проводить предварительный анализ эксплуатации новых машин с достаточной точностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выбор того или иного метода расчета представленных параметров надежности в процессе проектирования зависит от множества факторов, таких как наличие достаточных статистических данных по эксплуатации отдельных механизмов ТМ-аналога; наличие соответствующих табличных данных эксплуатации отдельно по механизмам; качество проектирования и др.

Следовательно, при проектировании выбор метода расчетов параметров надежности в большинстве случаев будет индивидуальным. При этом сначала могут быть использованы доступные приближенные методы [6], которые чаще всего дают относительно грубые результаты, затем при проведении эксплуатационных испытаний новых ТМ с ростом объема статистических данных по отдельным механизмам появляется возможность применения предложенных методик, что поможет повысить качество прогнозирования изменения технического состояния ТМ.

Разработка планов добычи торфяными предприятиями, использующими новую, неапробированную технику, встречается со значительными затруднениями вследствие отсутствия данных по эксплуатации таких машин. В этом случае предприятия – изготовители новых ТМ обязаны представлять эксплуатирующим организациям расчетные данные по надежности внедряемого оборудования. На базе полученных от производителей расчетных данных по надежности новых машин можно с достаточной точностью определить требуемое количество ТМ для выполнения плана добычи в соответствии с их проектной производительностью, а также с учетом коэффициентов технической готовности, полученных на основе предложенной методики расчета параметров надежности для внедряемых машин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлов А.В., Иванов С.Л., Габов В.В. Формирование и эффективное использование машинного парка торфодобывающих компаний // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело*. 2015. № 14. С. 82–91.
2. Михайлов А.В., Иванов С.Л., Бондарев Ю.Ю. Состояние технического перевооружения машинно-тракторного парка торфодобывающих компаний // *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. 2014. № 3 (202). С. 229–235.
3. Исаенко В.Д., Исаенко А.В., Исаенко П.В. Основы теории надежности и диагностика автомобилей: учебное пособие. Томск: ТГАСУ, 2007. 240 с.
4. Горлов И.В., Болотов А.Н. Информационная составляющая системы управления работоспособностью торфяных машин // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2013. № 1. С. 216–221.
5. Шиловский В.Н., Питухин А.В., Костюкевич В.М. Исследование потока отказов элементов конструкций лесных машин // *Современные наукоемкие технологии*. 2016. № 7 (1). С. 94–98.
6. Скрыпников А.В., Кондрашова Е.В., Бурмистрова О.Н., Яковлев К.А. Комплексная оценка надежности лесозаготовительных машин // *Современные проблемы науки и образования*. 2013. № 2. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=8537> (дата обращения: 12.08.2020).

Для цитирования: Горлов И.В. Анализ надежности торфяных машин в процессе проектирования // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2020. № 4 (8). С. 32–38.

ANALYSIS OF THE RELIABILITY OF PEAT MACHINES IN THE PROCESS OF DESIGN

I.V. GORLOV, Dr. Sc.

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,
Russian Federation, e-mail: gorloviv@yandex.ru

The article discusses the method of preliminary analysis of the reliability of the design of peat machines (PM) at the design stage. For the designed TM, it is possible to assess the reliability using generalized statistical data on similar peat machines, but significant errors arise that do not allow predicting the technical condition of the equipment under development with the required accuracy. The proposed technique makes it possible to evaluate the developed design of the machine in terms of reliability based on the analysis of the operation of similar units of existing PM. For this, the existing peats machines are divided into separate mechanisms, for which there are statistics on failure parameters. The division of the designed machines is carried out in a similar way; while in order to obtain the necessary reliability parameters, it is proposed to use the coefficient calculation method, taking into account the presence in the developed PM design of the number of the most critical parts and assemblies. Thus, the use of data from the operation of existing PM makes it possible to improve the quality of predicting changes in the reliability parameters of the machines being developed, and as a result, during their operation, a decrease in the number of downtime due to difficult-to-predict failures is achieved, which makes it possible to increase the seasonal productivity of PM.

Keywords: peat machines, operation, reliability, resource, forecasting, productivity, research.

REFERENCES

1. Mikhaylov A.V., Ivanov S.L., Gabov V.V. Formation and efficient use of the machine park of peat mining companies. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftegazovoye i gornoye delo*. 2015. No. 14, pp. 82–91. (In Russian).
2. Mikhaylov A.V., Ivanov S.L., Bondarev Yu.Yu. The state of technical re-equipment of the machine and tractor fleet of peat mining companies. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU*. 2014. No. 3 (202), pp. 229–235. (In Russian).
3. Isaenko V.D., Isaenko A.V., Isaenko P.V. *Osnovy teorii nadezhnosti i diagnostika avtomobiley: uchebnoe posobie*. [Fundamentals of reliability theory and car diagnostics: textbook]. Tomsk: TGASU, 2007. 240 p.
4. Gorlov I.V., Bolotov A.N. The information component of the peat machine performance management system. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)*. 2013. No. 1, pp. 216–221. (In Russian).
5. Shilovsky V.N., Pitukhin A.V., Kostyukevich V.M. Investigation of the failure flow of structural elements of forest machines. *Sovremennyye naukoymkiye tekhnologii*. 2016. No. 7 (1), pp. 94–98. (In Russian).
6. Skrypnikov A.V., Kondrashova E.V., Burmistrova O.N., Yakovlev K.A. Comprehensive assessment of the reliability of logging machines. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*. 2013. No. 2. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=8537> (date accessed: 12.08.2020).

Поступила в редакцию/received: 06.08.2020; после рецензирования/revised: 27.10.2020;
принята/accepted 08.11.2020

Вестник Тверского государственного технического университета.
Серия «Технические науки». № 4 (8), 2020

РАСЧЕТ И ПРОГНОЗ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПОДВОДНОЙ ДОБЫЧИ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

М.Г. РАХУТИН¹, д-р техн. наук, А.С. КАШИРСКИЙ², инженер

¹ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
119049, Москва, Ленинский проспект, д. 4, e-mail: rahutin.mg@misis.ru

² Министерство промышленности и торговли Российской Федерации,
125039, Москва, Пресненская наб., д. 10, стр. 2, e-mail: kashirsky@mail.ru

© Рахутин М.Г., Каширский А.С., 2020

В работе предложены новые классификационные признаки машин для подводной добычи твердых полезных ископаемых – цикличность и непрерывность действия. Установлено, что начиная с глубины 300...500 м для машин циклического действия скорость перемещения исполнительного органа (трала, драги-волокуши и др.) и концентрация полезных ископаемых не имеют определяющего значения. При выборе оборудования для подводной добычи на глубине более 100 м и прогнозе его производительности для машин циклического действия предложено учитывать глубину разработки, скорость подъема и опускания исполнительного органа, а для машин непрерывного действия – показатели надежности, например коэффициент готовности, определяемый экспертным путем.

Ключевые слова: машины для подводной добычи, классификационные признаки, твердые полезные ископаемые, эксплуатационная производительность, Мировой океан, железомарганцевые конкреции.

DOI: 10.46573/2658-5030-2020-4-39-45

ВВЕДЕНИЕ

Месторождения дна Мирового океана являются весьма перспективным источником полезных ископаемых и содержат практически весь их спектр в объемах, которые по многим полезным компонентам значительно превышают запасы континентальной суши [1, 2].

Во многих странах такие месторождения считают перспективной сырьевой базой и активно занимаются проблемой их разработки [3–5].

В ближайшем будущем с высокой вероятностью предполагается начало промышленной подводной добычи со дна Мирового океана твердых полезных ископаемых, в том числе железомарганцевых конкреций (ЖМК), имеющих средние размеры 3...8 см и находящихся непосредственно на дне на глубине от 150 м до 5 км [6].

Цель работы – разработать принципы расчета и прогноза производительности оборудования для подводной добычи твердых полезных ископаемых на глубине свыше 100 м.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Начиная с 60-х годов прошлого века в различных странах проводились как экспериментальные работы, так и теоретические исследования. Предложено большое количество машин и оборудования для подводной добычи полезных ископаемых, в основном ЖМК.

Данное оборудование предлагалось классифицировать по различным признакам:

1) виду энергии, используемой для добычных и транспортных целей [7]. Основные группы машин по данному классификационному признаку – это машины, использующие механическую, гидравлическую или оба вида энергии [8];

2) глубине разработки исходя из экономической эффективности методов добычи [9]. Диапазон глубин варьировался от 50 м для многоковшовой драги до 300 м для эрлифтовой гидравлической драги; в этом диапазоне рассматривались также гидравлическая землесосная и канатная драги.

3) типу передвижения по морскому дну [10]: установки с гибким тяговым элементом, устройства с колесными движителями, машины на гусеничном и шнековом ходу, установки шагающего типа.

Наличие продолжительного и обширного опыта подводной добычи полезных ископаемых до глубины 50 м значительно облегчает выбор способа и оборудования для таких условий и не является предметом рассмотрения в данной статье.

В то же время нам не встречалось работ, посвященных расчету и прогнозу эксплуатационной производительности на больших глубинах, при этом в связи с перспективностью подводной добычи в ближайшее время расчет и прогноз производительности такого оборудования окажутся востребованными.

При выборе способа добычи и используемого оборудования одним из основных параметров является производительность как отдельных машин, так и производственного участка и предприятия в целом. Поэтому в дополнение к имеющимся классификационным признакам, приведенным выше, мы предлагаем по аналогии с подземными породопогрузочными машинами разделить все оборудование на две большие группы: машины (методы) **циклического** и **непрерывного** действия.

Примером машин непрерывного действия являются многоковшовые драги, оборудование сбора ЖМК со дна с использованием аэрлифтного подъема на поверхность.

К машинам **циклического** действия можно отнести грейферы, драги-волокуши, тралы.

В настоящее время практически отсутствуют работы, посвященные расчету или прогнозу эксплуатационной производительности рассматриваемого оборудования. Основные параметры эффективности добычи полезных ископаемых невозможно рассчитать без определения величины эксплуатационной производительности, о чем и пойдет речь в данной статье.

Основу прогноза эксплуатационной производительности машин непрерывного действия для подводной добычи полезных ископаемых, на наш взгляд, должна составлять оценка уменьшения расчетной (теоретической) производительности W , что позволит прогнозировать фактическую (эксплуатационную) производительности W_0 в рассматриваемых условиях.

Для решения данной задачи предложено учитывать среднюю продолжительность производительной работы T_p на оцениваемом отрезке – например, в среднем за смену, сутки, месяц. Средняя продолжительность выполнения вспомогательных операций T_e определяется за тот же период эксплуатации. Уровень организации работ предлагается учитывать через продолжительность простоев по организационным причинам T_{on} .

Для машин непрерывного действия основным фактором, влияющим на эксплуатационную производительность, на наш взгляд, является частота отказов и продолжительность их устранения (время восстановления), характеризуемая таким показателем, как «коэффициент готовности». Данная оценка может быть точной при наработке достаточного объема статистических данных.

Надежность комплекса предлагается оценивать через продолжительность устранения отказов (время восстановления) T_{yo} с использованием показателя «коэффициент готовности» K_z . Для выбора значения данного коэффициента оцениваемое оборудование нужно разделить на пять групп исходя из предполагаемой частоты отказов и продолжительности их устранения, для этого используют пять значений коэффициента готовности K_z в диапазоне 0,4...0,9 (например, 0,4; 0,5; 0,7; 0,8; 0,9).

Тогда выражение для определения величины эксплуатационной (фактической) производительности примет вид

$$W_э = W \frac{T_p}{T_p + T_{yo} + T_э + T_{on}} \quad (1)$$

Разделив числитель и знаменатель на продолжительность времени работы T_p , получим следующее выражение для определения эксплуатационной производительности:

$$W_э = W \cdot \frac{1}{\frac{1}{K_z} + \frac{T_э + T_{on}}{T_p}} \quad (2)$$

На рис. 1 показано изменение расчетной эксплуатационной производительности в зависимости от значения коэффициента готовности и доли затрат времени на вспомогательные операции и простои по организационным причинам.

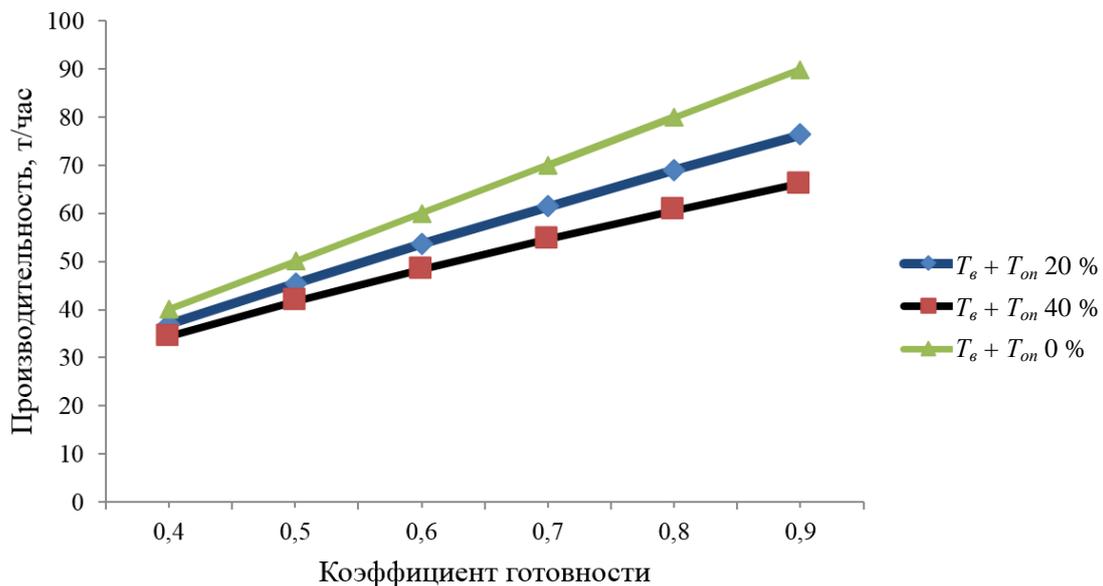


Рис. 1. Зависимость эксплуатационной производительности от значения коэффициента готовности, затрат времени на вспомогательные операции и простои по организационным причинам

Рассмотрим расчет эксплуатационной производительности циклического оборудования, к которому можно отнести тралы, драги-волокуши, грейферы (далее – «трал»).

В общем виде эксплуатационную производительность можно выразить как отношение массы полезного ископаемого в трале Q к суммарным затратам времени, включая затраты времени на его заполнение T_3 , подъем и спуск T_{cn} :

$$W_3 = \frac{Q}{T_{cn} + T_3 + T_{yo} + T_6 + T_{on}}. \quad (3)$$

В свою очередь продолжительность времени заполнения трала, учитываемая в расчетах массой полезного ископаемого, находится из выражения

$$T_3 = \frac{Q}{A_3 \cdot v \cdot q_{3AL} \cdot K_n \cdot \eta}, \quad (4)$$

где A_3 – ширина захвата трала (заходки), м; v – скорость движения (буксировки) трала, м/мин; q_{3AL} – плотность залегания конкреций, т/м²; K_n – полнота сбора конкреций, которую предлагается учитывать коэффициентом, имеющим диапазон от 0 до 1, при отсутствии потерь при сборе полезного ископаемого предлагаемый коэффициент принимает значение «1»; η – разубоживание конкреций налипшими илами, $\eta = 0,01 \cdot (100 - П\%)$, где П% – процент разубоживания.

Для расчета продолжительности подъема и опускания трала T_{cn} необходимо учитывать:

глубину залегания полезного ископаемого H , м;

скорость подъема и спуска трала V_{cn} , м/мин (для упрощения рассматриваемой модели в данном примере принимаем скорость подъема и спуска равными друг другу).

Затраты времени на подъем и опускание трала определяется из выражения

$$T_{cn} = \frac{2H}{V_{cn}}. \quad (5)$$

С учетом формул (4) и (5) выражение (3) можно записать в следующем виде:

$$W = \frac{Q}{\frac{2H}{V_{cn}} + \frac{Q}{A_3 \cdot v \cdot q_{3AL} \cdot K_n \cdot \eta} + T_{yo} + T_6 + T_{on}}. \quad (6)$$

Для многосекционных тралов объем трала нужно трактовать как объем всех секций, а к продолжительности вспомогательных операций добавляется суммарная продолжительность ввода в работу очередных секций.

Рассмотрим влияние на производительность различных факторов для следующих условий эксплуатации: ширина трала 2 м, скорость траления 30 м/мин, плотность залегания конкреций 20 кг/м², продолжительность вспомогательных операций 12 мин, время простоев по организационным причинам – 10 мин на один цикл, емкость трала 6 т, коэффициент заполнения с учетом разубоживания илом 0,85, скорость спуска-подъема трала 50, 100, 200 м/мин.

Зависимость эксплуатационной производительности от глубины разработки, скорости спуска-подъема трала и коэффициента готовности K_2 при различной глубине разработки представлена на рис. 2, 3.

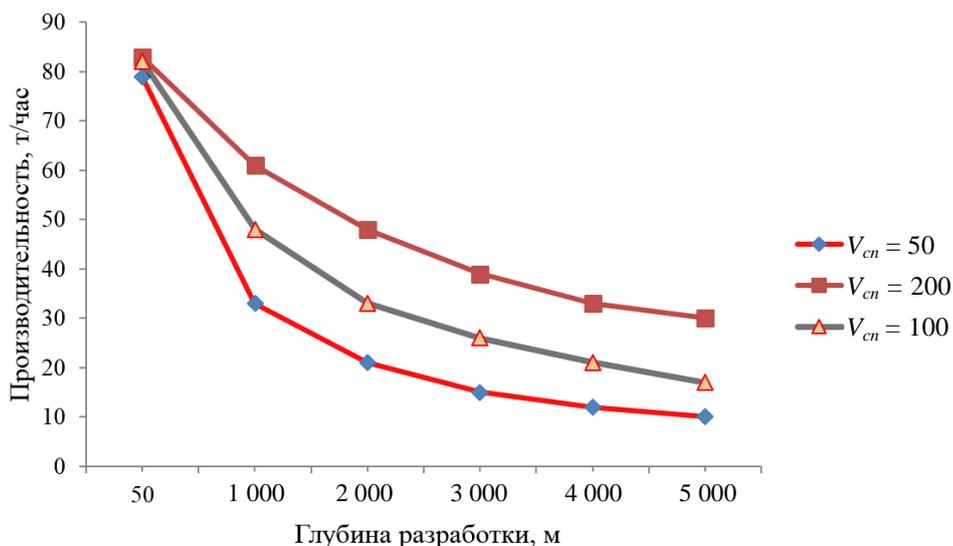


Рис. 2. Зависимость эксплуатационной производительности от глубины разработки и скорости спуска-подъема троса

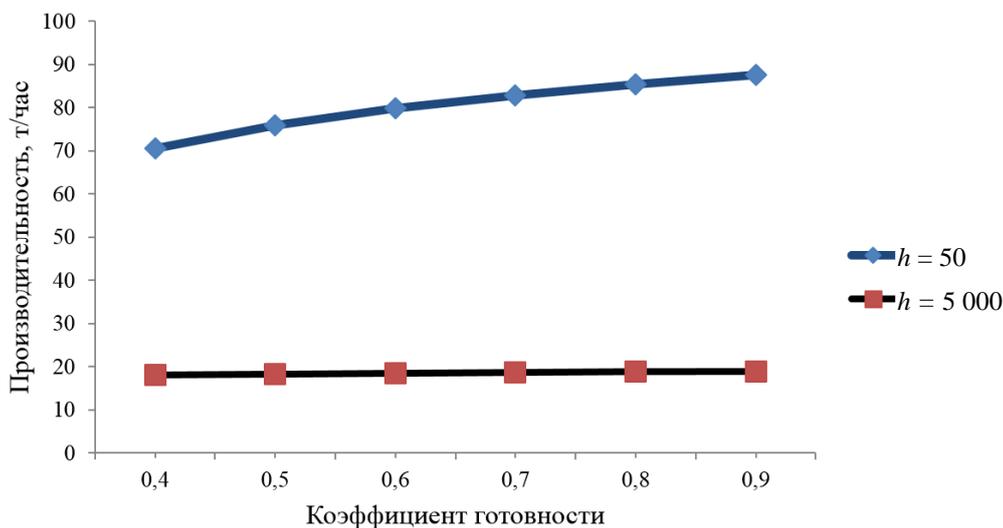


Рис. 3. Зависимость эксплуатационной производительности от значения коэффициента готовности и глубины разработки

Как видно из представленных зависимостей, основными факторами, влияющими на производительность машин циклического действия, являются глубина разработки и скорость спуска-подъема троса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования предложено классифицировать машины для подводной добычи на машины **циклического** и **непрерывного** действия.

При выборе оборудования подводной добычи и прогнозе его производительности предложено учитывать для машин циклического действия глубину разработки и скорость подъема и спуска исполнительного органа (троса, драги и т.д.), а для машин непрерывного действия прогнозные показатели их надежности, в частности коэффициент готовности.

Установлено, что начиная с глубины 300...500 м для машин циклического действия скорость перемещения исполнительного органа и концентрация полезного ископаемого на дне не имеют определяющего значения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Минеральные ресурсы Мирового океана: концепция изучения и освоения (на период до 2020 г.) / гл. ред. С.И. Андреев. СПб.: ВНИИ «Океангеология», 2007. 97 с.
2. Вержанский А.П., Андреев С.И. К вопросу «О создании морской горнодобывающей отрасли России» // *Горная промышленность*. 2015. № 3. С. 6–9.
3. Дробаденко В.П., Вильмис А.Л., Луконина О.А., Маркелов С.В. Проблемы и перспективы освоения минеральных ресурсов дна морей и океанов // *Горный журнал*. 2019. № 11. С. 44–49.
4. Lodge M.W., Segerson K., Squires D. Sharing and Preserving the Resources in the Deep Sea: Challenges for the International Seabed Authority // *The International Journal of Marine and Coastal Law*. 2017. V. 32. № 3. P. 427–457.
5. Nijen K.V., Passel S.V., Squires D. A stochastic techno-economic assessment of seabed mining of polymetallic nodules in the Clarion Clipperton Fracture Zone // *Marine Policy*. 2018. V. 95. P. 133–141.
6. Железо-марганцевые конкреции Тихого океана / отв. ред. П.Л. Безруков. М.: Наука, 1976. 300 с.
7. Добрецов В.Б., Рогалев В.А. Основные вопросы минеральных ресурсов Мирового океана. СПб.: Международная академия наук экологии, безопасности человека и природы, 2003. 524 с.
8. Сержан С.Л. Обоснование рациональных параметров системы с грунтозаборным устройством и гидродвигателем для добычи железомарганцевых конкреций: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2015. 157 с.
9. Мерио Дж. Минеральные богатства океана. М.: Прогресс, 1969. 440 с.
10. Тимофеев И.П. Шагающие машины для освоения ресурсов морского дна. Л.: ЛГИ, 1987. 176 с.

Для цитирования: Рахутин М.Г., Каширский А.С. Расчет и прогноз производительности оборудования для подводной добычи твердых полезных ископаемых // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2020. № 4 (8). С. 39–45.

CALCULATING AND FORECASTING HARDWARE PERFORMANCE FOR UNDERWATER MINING OF SOLID MINERALS

M.G. RAKHUTIN¹, Dr. Sc., A.S. KASHIRSKIY², Engineer

¹ National research technological university "MISIS", 4, Leninsky Prospekt, 119049, Moscow, Russian Federation, e-mail: rahutin.mg@misis.ru

² Ministry of industry and trade of the Russian Federation, 10, p. 2, Presnenskaya emb., 125039, Moscow, e-mail: kashirsky@mail.ru

In this article, new classification features of machines for underwater mining of solid minerals are proposed, such as their cyclical and continuous operation. It is established that for cyclical machines starting from a depth of 300...500 m the speed of movement of the executive body (trawl, drag, etc.) and the concentration of minerals do not have a determining

*Вестник Тверского государственного технического университета.
Серия «Технические науки». № 4 (8), 2020*

value. When selecting equipment for underwater mining at a depth of more than 100 m and forecasting its performance, it is proposed to take into account the depth of development for cyclical machines, the speed of lifting and lowering of the executive body, and for continuous machines, reliability indicators, for example, the readiness coefficient determined by expert means.

Keywords: machines for underwater mining, classification features, solid minerals, operational productivity, world ocean, ferromanganese nodules.

REFERENCES

1. Mineralnye resursy Mirovogo okeana: kontseptsiya izucheniya i osvoyeniya (na period do 2020 g.) [Mineral resources of the World Ocean: the concept of study and development (for the period until 2020)]. Ch. ed. S.I. Andreev. Saint Petersburg: VNI Okeangeologiya, 2007. 97 p.

2. Verzhansky A.P., Andreev S.I. On the question "On the creation of the marine mining industry in Russia". *Gornaya promyshlennost*. 2015. No. 3 (121), pp. 6–9. (In Russian).

3. Drobadenko V.P., Vilmis A.L., Lukonina O.A., Markelov S.V. Problems and prospects for the development of mineral resources of the bottom of the seas and oceans. *Gornyi Zhurnal*. 2019. No. 11, pp. 44–49. (In Russian).

4. Lodge M.W., Segerson K., Squires D. Sharing and Preserving the Resources in the Deep Sea: Challenges for the International Seabed Authority. *The International Journal of Marine and Coastal Law*. 2017. V. 32. No. 3, pp. 427–457.

5. Nijen K.V., Passel S.V., Squires D. A stochastic techno-economic assessment of seabed mining of polymetallic nodules in the Clarion Clipperton Fracture Zone. *Marine Policy*. 2018. V. 95, pp. 133–141.

6. Zhelezo-margantsevyie konkretnii Tikhogo okeana. [Ferromanganese nodules of the Pacific Ocean]. Resp. ed. P.L. Bezrukov. Moscow: Nauka, 1976. 300 p.

7. Dobretsov V.B., Rogalev V.A. Osnovnye voprosy mineralnykh resursov Mirovogo okeana [Main issues of mineral resources of the World ocean]. Saint Petersburg: Mezhdunarodnaya akademiya nauk ekologii, bezopasnosti cheloveka i prirody, 2003. 524 p.

8. Serjeant S.L. Substantiation of rational parameters of a system with a ground-intake device and a hydraulic motor for mining ferromanganese nodules: cand. diss. (Engineering). Saint Petersburg, 2015. 157 p. (In Russian).

9. Mero Dzh. Mineralnye bogatstva okeana. [Mineral wealth of the ocean]. Moscow: Progress, 1969. 440 p.

10. Timofeev I.P. Shagayushchie mashiny dlya osvoyeniya resursov morskogo dna. [Walking machines for the development of the resources of the sea bottom]. Leningrad: LGI, 1987. 176 p.

Поступила в редакцию/received: 11.08.2020; после рецензирования/revised: 27.10.2020;
принята/accepted 08.11.2020

ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИИ ЖЕЛОБЧАТОЙ КОНВЕЙЕРНОЙ ЛЕНТЫ ПРИ МАЛЫХ НАТЯЖЕНИЯХ

В.П. ДЬЯЧЕНКО, канд. техн. наук

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
119049, Москва, Ленинский проспект, д. 4, e-mail: viach.dyachenko@yandex.ru

© Дьяченко В.П., 2020

Приведены аналитические зависимости для предельно допустимого радиуса изгиба желобчатой ленты конвейера в продольном направлении, при котором на участках с малым натяжением происходит потеря формы желоба, обусловленная конструктивными и физико-механическими свойствами ленты. Представлены результаты расчетов по этим зависимостям для ряда современных резинотканевых и резинотросовых лент. Полученные результаты могут использоваться для определения минимально допустимого натяжения ленты и максимально допустимого ее прогиба, которые обычно имеют место в зоне загрузки конвейера и являются отправной величиной при построении диаграммы натяжений для тягового расчета конвейера. Кроме того, они могут быть полезны при определении параметров переходных участков ленточных конвейеров.

Ключевые слова: ленточный конвейер, тяговый расчет, конвейерные ленты, прогиб, физико-механические характеристики.

DOI: 10.46573/2658-5030-2020-4-46-53

ВВЕДЕНИЕ

На ленточном конвейере при транспортировании сыпучих грузов конвейерная лента, опираясь на трехроликовые роlikоопоры, искривляется в поперечном направлении и принимает форму желоба, средний радиус кривизны которого в случае установки боковых роликов под углом 30° рассчитывается как

$$r = 3B/\pi, \quad (1)$$

где B – ширина ленты.

Ввиду действия значительных растягивающих усилий лента желобчатой формы приобретает определенную изгибную жесткость и устойчивость, что позволяет рассматривать ее поведение на конвейере как упругого тонкостенного стержня открытого профиля.

В результате искажения поперечной формы желоба ленты при изгибе между опорами транспортируемый материал может просыпаться. Для того чтобы предотвратить это, при тяговом расчете конвейеров проверяют прогиб ленты в зоне минимального натяжения (обычно в зоне загрузки конвейера).

Действующие до настоящего времени нормы расчета минимального натяжения ленты конвейеров разработаны для лент с бельтинговым сердечником шириной 0,6...0,8 м. При этом значения натяжения ленты были относительно большими. Поэтому лента совершенно правильно рассматривалась как гибкая нить, нагруженная распределенной поперечной нагрузкой q , включающей вес груза и самой ленты. Норма максимального прогиба ленты первоначально устанавливалась как 3...5 см в пролете между роlikоопорами, который составлял не более 1,0...1,2 м. В дальнейшем была

принята проверочная формула для минимально допустимого натяжения ленты при шаге роlikоопор l_p [1, 2]:

$$S \geq (5 \dots 8) q l_p.$$

Обозначим радиус кривизны поперечного сечения ленты через r , а радиус продольного сечения срединной линии ленты в точке максимального прогиба – через ρ . При этом из теории гибких нитей следует, что максимально допустимая относительная кривизна

$$K = \frac{r}{\rho} = \frac{3B}{\pi(2,5 - 4,0)l_p} = \frac{(0,24 - 0,38)B}{l_p}.$$

В дальнейшем сопоставим эту величину с полученными ниже расчетными данными.

С целью решения вопроса о рациональном соотношении ширины ленты, расстояния между поддерживающими роlikооперами и начального натяжения ленты с точки зрения устойчивости формы желоба можно рассмотреть деформированное состояние желобчатой конвейерной ленты между роlikооперами от действующих нагрузок. Поскольку это потребует моделирования деформированного состояния гибкой упругой оболочки с применением ЭВМ, практическое использование данного метода расчета затруднительно и не дает аналитических зависимостей от действующих нагрузок, конструктивных параметров ленты и конвейера, а также от физико-механических свойств ленты.

Потеря устойчивости равновесной формы, как известно, происходит при некоторой критической для данной системы нагрузке, знание которой является достаточным для принятия мер по предотвращению потери устойчивости. Значение критической для желобчатой ленты нагрузки можно определить, используя теорию изгиба тонкостенных стержней открытого профиля.

Так как положение желоба на конвейере при центральной загрузке ленты и отсутствии в поперечной плоскости перепада высот осей опорных роlikов обеспечивает совмещенность плоскости действия нагрузки и линии центров сдвига смежных его поперечных сечений, то потери устойчивости в виде поворота сечений желоба относительно продольной оси, которая свойственна тонкостенным стержням открытого профиля, не произойдет.

Потеря устойчивости ленты характеризуется внезапностью распрямления поперечного сечения в середине пролета между роlikооперами, т.е. там, где действует наибольший изгибающий момент. Такой локальный характер раскрытия желоба ленты в пролете между роlikооперами указывает на достаточность рассмотрения зависимостей для случая чистого изгиба с целью определения критических значений изгибающего момента или продольной кривизны, которые в дальнейшем можно использовать для сложного нагружения ленты.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Устойчивость желобчатой полосы из изотропного материала (например, из стали) при продольном изгибе в условиях отсутствия продольного натяжения исследована в классической работе [3]. Однако конвейерная лента обладает свойством анизотропии, поэтому, рассматривая чистый изгиб желобчатой конвейерной ленты, будем использовать результаты работы [4], где учтена анизотропия ленты, т.е. различие

физико-механических свойств в поперечном и продольном направлениях, в частности разница в модулях упругости, но не учтено различие соответствующих коэффициентов Пуассона (коэффициентов поперечного сужения). Рассмотрим задачу в постановке работы [4] без учета продольного натяжения ленты.

Обозначим радиус кривизны поперечного сечения желобчатой ленты через r , а радиус продольного сечения срединной линии ленты в точке максимального прогиба – через ρ .

До нагружения поперечной нагрузкой образующие линии желоба параллельны оси z (рис. 1). Главные центральные оси поперечного сечения обозначены через x и y .

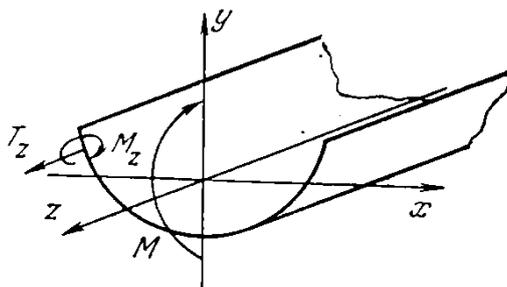


Рис. 1. Схема нагружения желоба ленты [4]

Изгиб цилиндрического желоба сопровождается продольной деформацией его образующих. Расположенные выше оси x образующие укорачиваются, а расположенные ниже нее – удлиняются. Считая, что поперечные сечения желоба при изгибе остаются плоскими (согласно общепринятой гипотезе плоских сечений), деформацию любой образующей определяем по формуле

$$\varepsilon_z = -\frac{y}{\rho}, \quad (2)$$

где ρ – радиус кривизны образующей; y – координата точки пересечения образующей с плоскостью сечений xy .

При этом в соответствии с законом Гука продольное усилие

$$T_z = \frac{E_z \delta_k y}{\rho}, \quad (3)$$

где E_z – продольный модуль упругости ленты; δ_k – толщина каркаса прокладок ленты со сдвижками (для резинотканевых лент).

На рис. 2 изображен выделенный из ленты бесконечно малый элемент с размерами δ_k , dx , dz и показаны действующие на него моменты и перерезывающие силы, которые соответствуют изгибу элемента. При этом сдвигающие силы и распределенные крутящие моменты в поперечных сечениях отсутствуют.

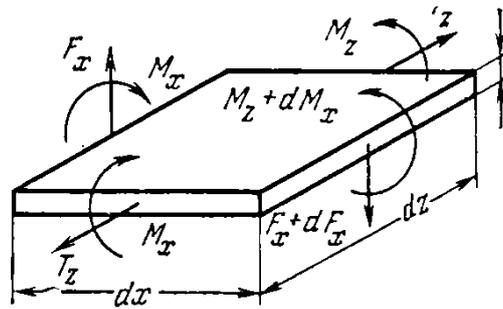


Рис. 2. Схема нагрузки элемента ленты [4]

Проецируя действующие силы на нормаль к срединной поверхности элемента с учетом искривления соответствующей образующей, получаем следующие соотношения для моментов и перерезывающих сил:

$$T_z = \rho \frac{dF_z}{dx}; \quad (4)$$

$$F_x = \frac{dM_x}{dx}; \quad (5)$$

$$T_z = \rho \frac{d^2 M_x}{dx^2}, \quad (6)$$

которыми определяется связь между продольным усилием T_z и изгибающим моментом M_x .

Связь изгибающих моментов M_x и M_z с соответствующими приращениями кривизн χ_{xy} и χ_{yz} в плоскостях xu и uz определяется соотношениями:

$$M_x = D_x \chi_{xy} + \nu D_z \chi_{yz}; \quad (7)$$

$$M_z = D_z \chi_{yz} + \nu D_x \chi_{xy}, \quad (8)$$

где ν – коэффициент Пуассона; D_x – цилиндрическая жесткость ленты в поперечном сечении; D_z – цилиндрическая жесткость ленты в продольном сечении.

Заметим, что в работе [4] коэффициенты Пуассона в поперечном и продольном направлениях обозначены одним и тем же знаком, т.е. считаются равными, хотя они непременно будут различными, обратно пропорциональными модулям упругости в силу закона парности касательных напряжений.

Если начальную кривизну поперечного сечения принять равной $1/r$, а конечную $\frac{d^2 z}{dx^2}$, то приращение кривизн составит:

$$\chi_{xy} = \frac{d^2 y}{dx^2} - \frac{1}{r}; \quad (9)$$

$$\chi_{yz} = \frac{1}{\rho}. \quad (10)$$

Подставим эти выражения в формулы (7) и (8):

$$M_x = D_x \left(\frac{d^2 y}{dx^2} - \frac{1}{r} \right) + \nu D_z \frac{1}{\rho}; \quad (11)$$

$$M_z = D_z \frac{1}{\rho} + \nu D_x \left(\frac{d^2 y}{dx^2} - \frac{1}{r} \right). \quad (12)$$

При подстановке (3) и (11) в (6) в работе [4] получено уравнение продольного изгиба желобчатой ленты:

$$\frac{d^4 y}{dx^4} - \frac{E_z \delta_k \rho^2}{D_x} y = 0. \quad (13)$$

Обозначив

$$\frac{E_z \delta_k \rho^2}{D_x} = 4m^4, \quad (14)$$

получим решение уравнения (13) в виде

$$y = c_1 \operatorname{ch} \frac{mx}{\rho} \cos \frac{mx}{\rho} + c_2 \operatorname{sh} \frac{mx}{\rho} \sin \frac{mx}{\rho} + c_3 \operatorname{ch} \frac{mx}{\rho} \sin \frac{mx}{\rho} + c_4 \operatorname{sh} \frac{mx}{\rho} \cos \frac{mx}{\rho}. \quad (15)$$

Постоянные c_1 , c_2 , c_3 и c_4 определяются из граничных условий для поперечного сечения ленты при отсутствии нагрузки на продольных кромках:

$$F_x = 0, \quad M_x = 0 \quad \text{при} \quad x = \pm \frac{B}{2}. \quad (16)$$

С учетом зависимостей (5) и (11) можно определить, что

$$c_1 = \frac{\rho^2}{2m^2} \left(\frac{1}{r} - \frac{D_z \nu}{D_x \rho} \right) \frac{\operatorname{sh} \frac{mB}{2\rho} \cos \frac{mB}{2\rho} - \operatorname{ch} \frac{mB}{2\rho} \sin \frac{mB}{2\rho}}{\operatorname{sh} \frac{mB}{2\rho} \operatorname{ch} \frac{mB}{2\rho} + \sin \frac{mB}{2\rho} \cos \frac{mB}{2\rho}}; \quad (17)$$

$$c_2 = \frac{\rho^2}{2m^2} \left(\frac{1}{r} - \frac{D_z \nu}{D_x \rho} \right) \frac{\operatorname{sh} \frac{mB}{2\rho} \cos \frac{mB}{2\rho} + \operatorname{ch} \frac{mB}{2\rho} \sin \frac{mB}{2\rho}}{\operatorname{sh} \frac{mB}{2\rho} \operatorname{ch} \frac{mB}{2\rho} + \sin \frac{mB}{2\rho} \cos \frac{mB}{2\rho}}; \quad (18)$$

$$c_3 = c_4 = 0. \quad (19)$$

Решение равенства (15) с учетом формул (17) и (18) приближенно описывает форму деформированного поперечного сечения ленты в зависимости от искривления ее в продольном направлении (без учета сделанных нами выше замечаний о различиях коэффициентов Пуассона в продольном и поперечном направлениях).

Значение критического (вызывающего потерю устойчивости формы желоба ленты) внешнего изгибающего момента получено из выражения

$$M = \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} (M_z - T_z y) dx. \quad (20)$$

Подставив в формулу (20) значения T_z , M_z и y из выражений (6), (12) и (14) с учетом равенств (11), (17) и (18), получим

$$M = \frac{D_z B}{r} \left[\frac{r}{\rho} - \nu \frac{D_x}{D_z} + \left(\nu \frac{D_x}{D_z} - \nu^2 \frac{r}{\rho} \right) \Phi_1 + \frac{\rho}{r} \frac{D_x}{D_z} \left(1 - \frac{D_z}{D_x} \nu \frac{r}{\rho} \right)^2 \Phi_2 \right], \quad (21)$$

где

$$\Phi_1 = \frac{2}{\lambda} \frac{ch \lambda - \cos \lambda}{sh \lambda + \sin \lambda}; \quad (22)$$

$$\Phi_2 = \frac{1}{2\lambda} \frac{ch \lambda - \cos \lambda}{sh \lambda + \sin \lambda} - \frac{\sin \lambda sh \lambda}{(sh \lambda + \sin \lambda)^2}; \quad (23)$$

$$\lambda = \frac{mB}{\rho}. \quad (24)$$

Удобнее использовать удельную величину критического момента $\mu = M / D_z$, которая отложена на приведенном ниже графике.

Выражение (21) описывает искомую связь между внешним моментом M и соответствующей кривизной $\frac{1}{\rho}$.

С учетом большой разницы между коэффициентами Пуассона в поперечном и продольном направлениях нами уточнены варианты уравнения (21):

для резинотканевых лент:

$$\mu = M/D_z = \frac{\pi}{3} \left[K - \nu \cdot c + (\nu \cdot c - \nu^2 \cdot K) \Phi_1 + \left(\frac{c}{K} \right) (1 - \nu \cdot K/c)^2 \Phi_2 \right];$$

для резинотросовых лент:

$$\mu_1 = M/D_z = \frac{\pi}{3} \left[-K - \nu + \nu \Phi_1 - \left(\frac{c}{K} \right) \Phi_2 \right], \text{ где } c = \frac{D_x}{D_z}.$$

Отсюда можно найти выражение для критической кривизны продольного изгиба желобчатой ленты, если решить уравнение

$$\frac{dM}{d\left(\frac{1}{\rho}\right)} = 0. \quad (25)$$

Однако решение этого уравнения сопряжено со значительными математическими трудностями. Для требуемого частного случая проще найти критическое значение изгибающего момента графически. При этом, задаваясь рядом значений $K = \frac{r}{\rho}$, по формуле (24) определяем соответствующие значения λ , а затем из выражений (22) и (23) – Φ_1 и Φ_2 , после чего по формуле (21) находим соответствующие значения удельного критического момента $\mu = M / D_z$.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ВЫВОДЫ

Выполнены расчеты по уточненным формулам для линеек резинотканевых и резинотросовых лент, выпускаемых «Уральским заводом РТИ», DUNLOP, Metso Minerals и другими ведущими фирмами в этой области промышленности. На типичном примере графика, приведенного на рис. 3, видно, что состояние равновесия желоба ленты (в данном случае типа 1ТК-400 (три прокладки) шириной 1 200 мм) описывается

кривой, имеющей пик при некотором критическом значении изгибающего момента. Координаты пиков таких кривых для различных типов лент соответствуют значениям критических изгибающих моментов и критических кривизн в продольном направлении.

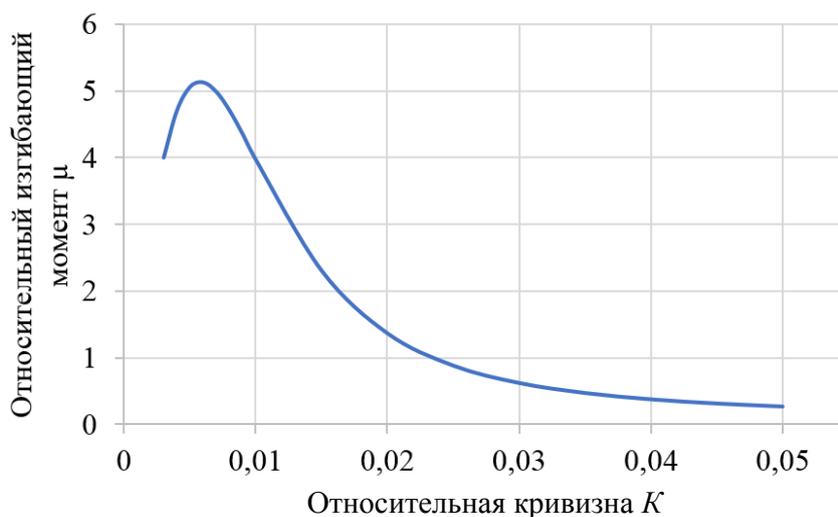


Рис. 3. Кривая состояния равновесия желоба для лент 1ТК-400

При нагружении желоба от нуля до $M_{кр}$ зависимость внешнего момента от продольной кривизны почти линейна. На этом этапе нагружения искажение формы поперечного сечения не происходит. Закритическая область кривой характеризуется постепенным распрямлением желобчатой формы до полного ее исчезновения, после чего полотно конвейера становится практически линейно деформируемым.

В соответствии с данными расчетов устойчивость желоба резиноканевых лент при одинаковой ширине значительно меньше устойчивости резинотросовых, поскольку поперечная жесткость тканевых лент больше, чем у резинотросовых. Критическая кривизна для лент одинаковой ширины имеет одно и то же значение.

Для резиноканевых лент критическое значение $K = 0,004 \dots 0,001$. Чем больше величина c (она варьировалась в диапазоне от 0,22 до 1,0), тем меньше допустимая кривизна ленты K . При большом сопротивлении изгибу ленты в желоб она легче распрямляется при продольном изгибе. Это подтверждают и результаты расчетов для резинотросовых лент: для них критическое значение $K = 0,010 \dots 0,015$, т.е. на порядок меньше, чем для резиноканевых.

Минимально допустимое натяжение ленты должно, конечно, определяться по критическому моменту изгиба в сопоставлении с нагрузкой на пролет между роlikоопорами и шагом роlikоопор, что является предметом дальнейшего исследования.

Определяемые по кривым состояния значения критических изгибающих моментов и критических кривизн желобчатых лент в продольном направлении необходимы для расчета оптимальных значений параметров конвейера по условию отсутствия развала ленты на переходных участках.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриев В.Г., Вержанский А.П. Основы теории ленточных конвейеров. М.: Горное машиностроение, 2017. 592 с.
2. Современная теория ленточных конвейеров горных предприятий / В.И. Галкин, В.Г. Дмитриев, В.П. Дьяченко, И.В. Запенин, Е.Е. Шешко. М.: Горная книга, 2011. 545 с.

3. Пановко Я.Г., Губанова И.И. Устойчивость и колебания упругих систем. М.: Наука, 1987. 352 с.

4. Шибалов С.Ф. Исследование ленточно-канатного конвейера для крупнокузовых скальных грузов: дис. ... канд. техн. наук. М., 1978. 251 с.

Для цитирования: Дьяченко В.П. Особенности деформации желобчатой конвейерной ленты при малых натяжениях // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2020. № 4 (8). С. 46–53.

SPECIFIC FEATURES OF DEFORMATION OF THE GROOVED CONVEYOR BELT AT LOW TENSIONS

V.P. DYACHENKO, Cand. Sc.

National research technological university "MISIS", 4, Leninsky Prospekt,
119049, Moscow, Russian Federation, e-mail: viach.dyachenko@yandex.ru

The article presents analytical dependences for the maximum permissible bending radius of the conveyor belt in the longitudinal direction, in which the shape of the gutter is lost in areas with low tension, depending on the design and physical and mechanical properties of the belt. The results of calculations based on these dependencies for a number of modern rubber-fabric and rubber-rope belts are presented. The results obtained can be applied to determine the minimum allowable belt tension and the maximum allowable belt deflection, which usually occur in the loading zone of the conveyor and are the starting value when constructing a tension diagram in the process of traction calculation of the conveyor. They are also useful for determining the parameters of transition sections of conveyor belts.

Keywords: belt conveyor, traction calculation, conveyor belts, deflection, physical and mechanical characteristics.

REFERENCES

1. Dmitriev V.G., Verzhanskiy A.P. Osnovy teorii lentochnykh konveyerov [Grounds of the belt conveyor theory]. Moscow: Gornoe mashinostroenie, 2017. 592 p.

2. Sovremennaya teoriya lentochnykh konveyerov gornykh predpriyatiy [Modern theory of the belt conveyors of mining enterprises]. V.I. Galkin, V.G. Dmitriev, V.P. Dyachenko, I.V. Zapenin, E.E. Sheshko. Moscow: Gornaya kniga, 2011. 545 p.

3. Panovko Ya.G., Gubanova I.I. Ustojchivost i kolebanija uprugih system. [Stability and vibrations of elastic systems]. Moscow: Nauka, 1987. 352 p.

4. Shibalov S.F. Research of the belt-rope conveyor for large-bulk rock cargo. Cand. diss. (Technical). Moscow, 1978. 251 p. (In Russian).

Поступила в редакцию/received: 10.08.2020; после рецензирования/revised: 27.10.2020;
принята/accepted 08.11.2020

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.891

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ИННОВАЦИОННОСТИ ОБЪЕКТА

В.К. ИВАНОВ, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет, 170026, Тверь,
наб. Аф. Никитина, д. 22, e-mail: mtivk@mail.ru

© Иванов В.К., 2020

В статье рассматривается подход к количественной оценке инновационности продуктов и технологий. Результаты такой оценки могут быть использованы при создании хранилища данных для описаний объектов со значительным инновационным потенциалом. Модель расчета индекса инноваций основана на понятиях новизны, актуальности и имплементируемости объекта. Даны формальные определения этих показателей, описана методика их расчета. Используются нечеткие методы для обработки неполной информации из многочисленных источников и для получения вероятностных оценок инноваций. Представлены экспериментальные данные проверки модели, в том числе расчеты локальных критериев и глобального аддитивного оценочного критерия. Установлены цикличность динамических изменений показателей, их взаимозависимость, некоторые общие особенности продвижения продуктов. Полученные экспериментальные данные согласуются с экспертными оценками исследуемых продуктов. Анализ локальных критериев дает основание утверждать о правильном использовании аддитивной n -мерной функции полезности. Подтверждается адекватность предположений и формальных выражений, которые применяются в вычислительных алгоритмах отбора информации для размещения в хранилище данных.

Ключевые слова: хранилище данных, инновационность, аддитивный критерий, функция полезности, поисковый запрос.

DOI: 10.46573/2658-5030-2020-4-54-63

ВВЕДЕНИЕ

В проекте «Организация и поддержка хранилища данных на основе интеллектуализации поискового агента и эволюционной модели отбора целевой информации» [1] предлагается технология создания хранилища описаний объектов (продуктов и технологий), обладающих значимым инновационным потенциалом. Инновационный потенциал количественно оценивается индексом инновационности, модель вычисления которого основана на показателях новизны, востребованности и имплементируемости объекта. Указанные показатели вычисляются для лингвистической модели объекта, создаваемой с помощью архетипов.

Архетипы объекта (АО) – это концепции предметной области для рассматриваемого объекта. Они реализуются термами, определяющими ключевые свойства объекта, и группируются в три дескриптивных класса: структура объекта, условия применения и результаты функционирования. Область определения АО

определяется термом-маркером. Могут также существовать дополнительные локальные ограничения: умолчания, синонимы термов, веса термов, предельное количество запросов, количество термов в запросе и т.п. Классы АО, маркер и локальные ограничения образуют лингвистическую модель объекта, которая используется как поисковый паттерн для генерации набора запросов на поиск информации о потенциально инновационном объекте.

Поисковые запросы – логические выражения, где множества операндов есть различные комбинации термов-архетипов и маркера. Релевантные документы, найденные после исполнения всех сгенерированных запросов, используются для вычисления показателей инновационности объекта.

Цель статьи – подтвердить основные предположения, используемые при разработке модели для вычисления аддитивного оценочного критерия инновационности объектов, представив данные экспериментальной проверки этой модели.

РАБОТЫ ПО ТЕМАТИКЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Обсуждаемые в настоящей статье глобальный и частные критерии применяются в разрабатываемой технологии создания хранилища описаний инновационных объектов. Анализ источников [2, 3], посвященных различным аспектам инновационного развития, показывает, что в понятие «инновация» всегда включаются такие коннотаты, как новый, научный, повышающий эффективность, приносящий прибыль. Исходя из этого формализуем понятие «инновационность».

Теоретическую основу формирования многокритериальных скалярных оценок, включая глобальный аддитивный критерий, составляет аксиоматическая теория полезности [4]. Одним из ее важных положений является доказанное утверждение, что из аддитивности оценочной функции следует взаимная независимость факторов, влияющих на нее [5]. Анализ используемых в исследовании частных критериев дает основание говорить о корректном использовании аддитивной n -мерной функции полезности.

В связи с ожидаемой неполнотой и неточностью информации об инновационном потенциале объектов, полученной из различных источников, использованы подход и методы теории свидетельств [6, 7].

Настоящая статья является продолжением предыдущих работ автора и его коллег о различных аспектах технологии создания хранилища описаний инновационных объектов [8, 9 и др.].

МОДЕЛЬ ВЫЧИСЛЕНИЯ ИНДЕКСА ИННОВАЦИОННОСТИ ОБЪЕКТА

Основные понятия. Ниже сформулированы понятия новизны, востребованности и имплементируемости как составных частей критерия инновационности искомого объекта. Количественная оценка этих показателей основывается на предположении об адекватности отображения жизненного цикла продуктов в виде информационных объектов, размещенных в различных хранилищах данных.

Новизна определяет значительные улучшения, новый способ использования или предоставления объекта. Предполагается, что для новых объектов количество найденной информации будет меньше, чем для давно существующих.

Востребованность (или спрос) – это осознанная потенциальным потребителем необходимость в этом объекте. Оценка востребованности основывается на значении частоты пользовательских запросов информации об объекте, находящейся в хранилищах данных. Примеры: частота выполнения запросов, похожих на запросы из поискового паттерна; показатель цитирования материалов об объекте; количество продаж объекта.

Имплементируемость определяет технологическую обоснованность, физическую осуществимость и способность объекта быть интегрированным в какую-либо систему для получения желаемых эффектов. Оценка имплементируемости основывается на значении среднего периода восстановления уровня новизны и/или востребованности объекта после их потери. Чем быстрее это происходит за счет новых технологий, конструкций, улучшенных функциональных и потребительских характеристик, тем выше имплементируемость.

Базовые вычисления. Индикатор технологической новизны Nov вычисляется следующим образом:

$$Nov = 1 - 1/N \sum_{k=1}^N f_n^{01}(R_k, \dots), \quad (1)$$

где N – общее количество выполненных запросов; R_k – число документов, найденных в результате выполнения k -го запроса; $f_n^{01}(R_k, \dots)$ – вариативная функция, нормирующая значение R_k на диапазон $[0; 1]$.

Индикатор востребованности Dem рассчитывается по формуле

$$Dem = 1/S \sum_{k=1}^S f_n^{01}(F_k, \dots), \quad (2)$$

где S – общее количество выполненных запросов; F_k – частота выполнения k -го запроса; $F_{01}(F_k, \dots)$ – вариативная функция, нормирующая значение F_k на диапазон $[0; 1]$.

Индикатор имплементируемости Imp находится как

$$Imp = 1 - 1/2(\Delta t_N(Nov(t)) + \Delta t_D(Dem(t))), \quad (3)$$

где $Nov(t)$ – функция, показывающая зависимость Nov от времени на временном интервале $[t_0; t_m]$; $Dem(t)$ – функция, показывающая зависимость Dem от времени на том же $[t_0; t_m]$; Δt_N и Δt_D – средние расстояния между двумя последовательными точками временного ряда $t_i, t_{i+1} \in [t_0; t_m]$ локальных максимумов функций $Nov(t)$ и $Dem(t)$. При этом Nov , Dem и Imp рассчитываются для точки t_{m+1} .

Индекс инновационности Ix имеет вид аддитивного критерия:

$$Ix = w_{Nov}Nov + w_{Dem}Dem + w_{Imp}Imp, \quad (4)$$

где w_{Nov} , w_{Dem} , w_{Imp} – весовые коэффициенты для Nov , Dem и Imp соответственно и $w_{Nov} + w_{Dem} + w_{Imp} = 1$.

Вычисления при неполной и неточной информации об объектах. В этом случае в проекте вводятся нечеткие показатели вероятности того, что объект обладает новизной, востребованностью и имплементируемостью. Для вычисления указанных вероятностей применяется теория свидетельств Демпстера – Шафера [6, 7]. Определяются базовые вероятности m попадания результатов измерения Nov , Dem и Imp в k -й интервал значений A_k ; результаты из различных источников комбинируются

с помощью разработанного специализированного алгоритма групповой обработки результатов измерений. Комбинирование выполняется рекурсивно по парам источников: из двух источников свидетельств образуется один условный источник, свидетельства которого комбинируются с очередным фактическим источником.

Рассчитываются функция доверия $Bel(A) = \sum_{A_k: A_k \subseteq A} m(A_k)$ и функция правдоподобия $Pl(A) = \sum_{A_k: A_k \cap A} m(A_k)$, которые определяют верхнюю и нижнюю границу вероятности того, что объект обладает свойством, заданным соответствующим фактором. Тогда выражение (4) приобретает вид мультипликативного оценочного критерия:

$$I_x = [Bel_{Nov}(A), Pl_{Nov}(A)]^{w_{Nov}} \times [Bel_{Dem}(A), Pl_{Dem}(A)]^{w_{Dem}} \times [Bel_{Imp}(A), Pl_{Imp}(A)]^{w_{Imp}}, \quad (5)$$

которое сводится логарифмированием I_x к аддитивному критерию:

$$\ln I_x = w_{Nov} \times \ln([Bel_{Nov}(A), Pl_{Nov}(A)]) + w_{Dem} \times \ln([Bel_{Dem}(A), Pl_{Dem}(A)]) + w_{Imp} \times \ln([Bel_{Imp}(A), Pl_{Imp}(A)]). \quad (6)$$

Поскольку $\ln()$ – возрастающая функция, рассуждения, касающиеся I_x , справедливы для $\ln(I_x)$.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Методика проведения экспериментов. Цель экспериментов заключалась в проверке модели вычислений локальных и глобального оценочных критериев и тем самым подтверждении адекватности формальных выражений (1)–(3), которые используются в вычислительных алгоритмах отбора информации для размещения в хранилище данных.

В качестве объектов с очевидным инновационным потенциалом были выбраны смартфоны популярных моделей известных производителей. После этого экспертами были сформированы две лингвистических модели: *iPhone X* и *Samsung Galaxy S*. Эти модели были использованы для генерации поисковых запросов. Пример поисковых запросов (маркер – «смартфон iPhone»; АО: «камера», «экран», «музыка», «производительность», «аккумулятор»; ограничение – три термина в запросе):

смартфон AND iPhone AND камера;
смартфон AND iPhone AND экран;
смартфон AND iPhone AND производительность;
смартфон AND iPhone AND музыка;
смартфон AND iPhone AND аккумулятор.

В качестве источников данных об объектах использовались следующие хранилища данных: Google Scholar (<https://scholar.google.ru>), AliExpress (<https://aliexpress.com>), ACM Digital Library (<https://dlnext.acm.org>), IEEE Explore Digital Library (<https://ieeexplore.ieee.org>).

Измеряемые показатели: *Nov*, *Dem* (усреднялись среднеарифметическим и медианным значениями, нормализовались на диапазон [0; 1] функциями для линейной и экспоненциальной нормализации). Вычисляемые показатели: *Imp*, *I_x*.

Результаты экспериментов. На рис. 1 представлен график изменения индикатора новизны исследуемых объектов за 10-летний период. На этом и последующих графиках аппроксимирующие кривые показаны пунктиром.

Сравнение графиков изменения индикатора новизны объектов в зависимости от вида нормирующей функции показано на рис. 2.

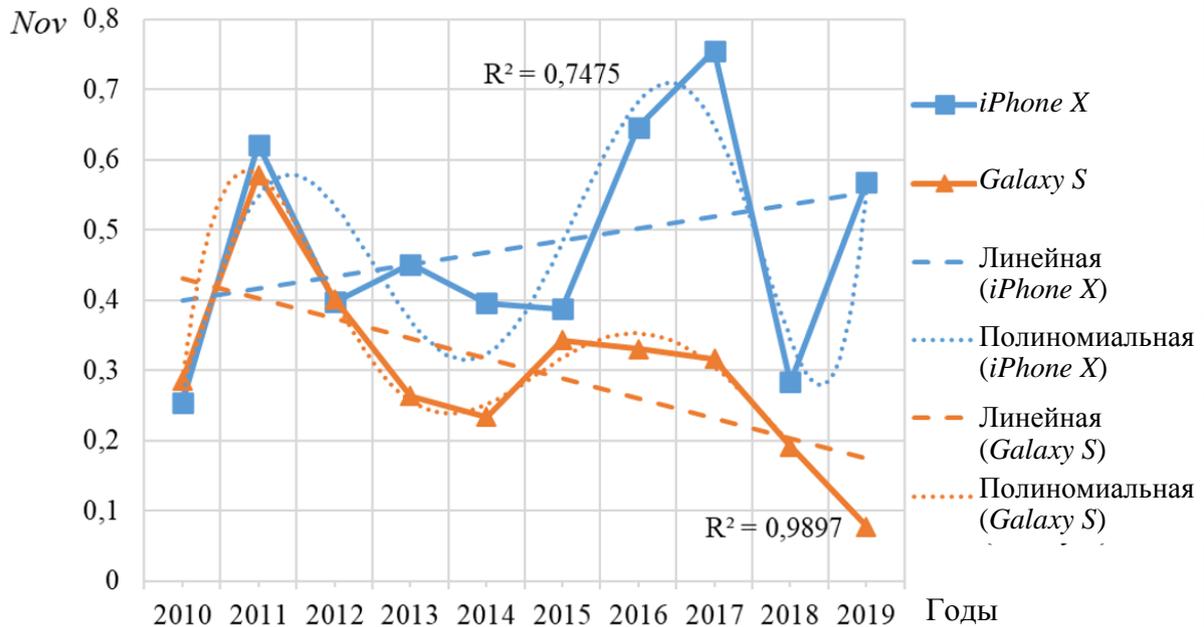


Рис. 1. Динамика изменения новизны объектов *iPhone X* и *Galaxy S* за 10-летний период

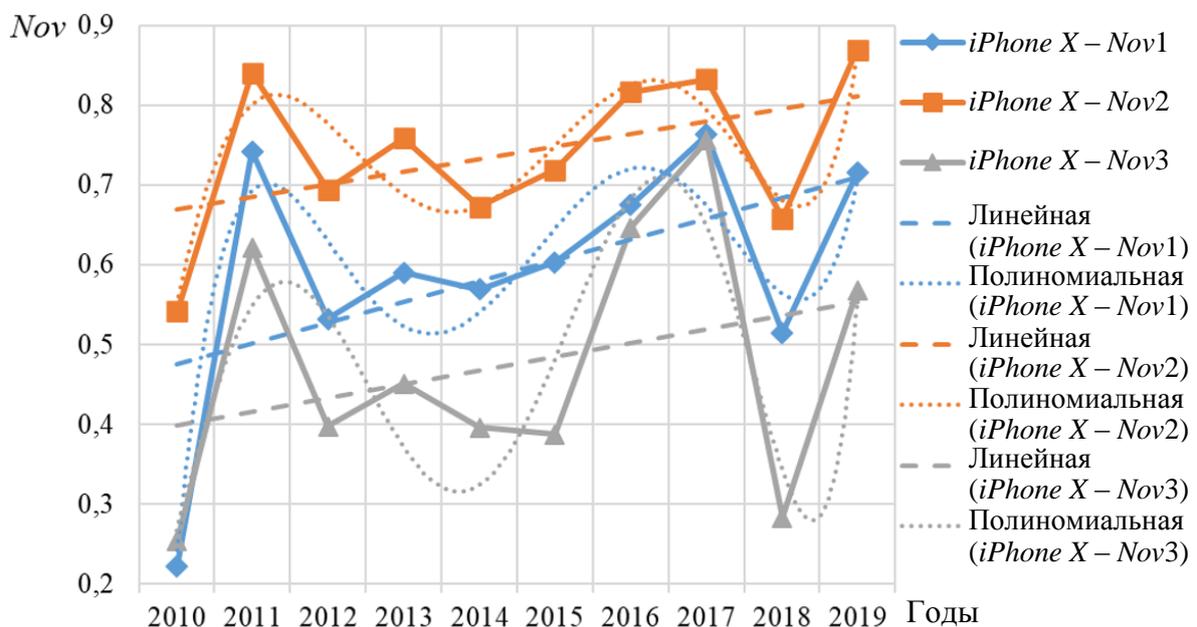


Рис. 2. Динамика изменения новизны объекта *iPhone X* для различных нормирующих функций

Рис. 3 и 4 иллюстрируют изменения индикатора востребованности исследуемых объектов за 10-летний период (для случаев, когда F_k – медиана и среднее арифметическое).

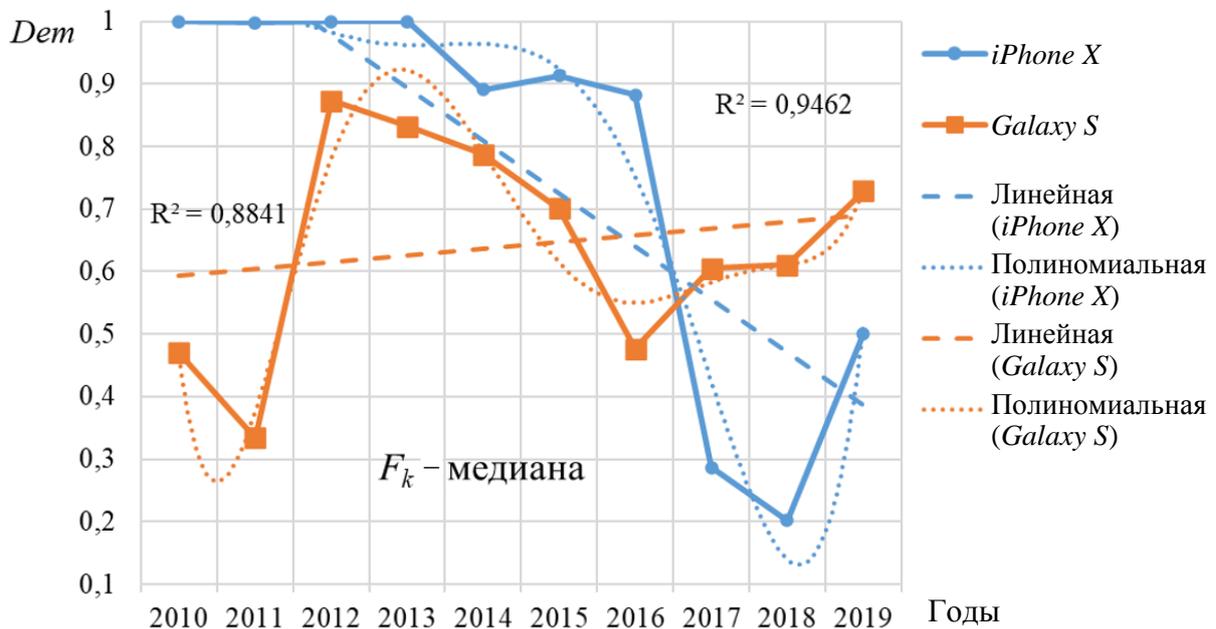


Рис. 3. Динамика изменения востребованности объектов *iPhone X* и *Galaxy S* за 10-летний период (F_k – медиана)

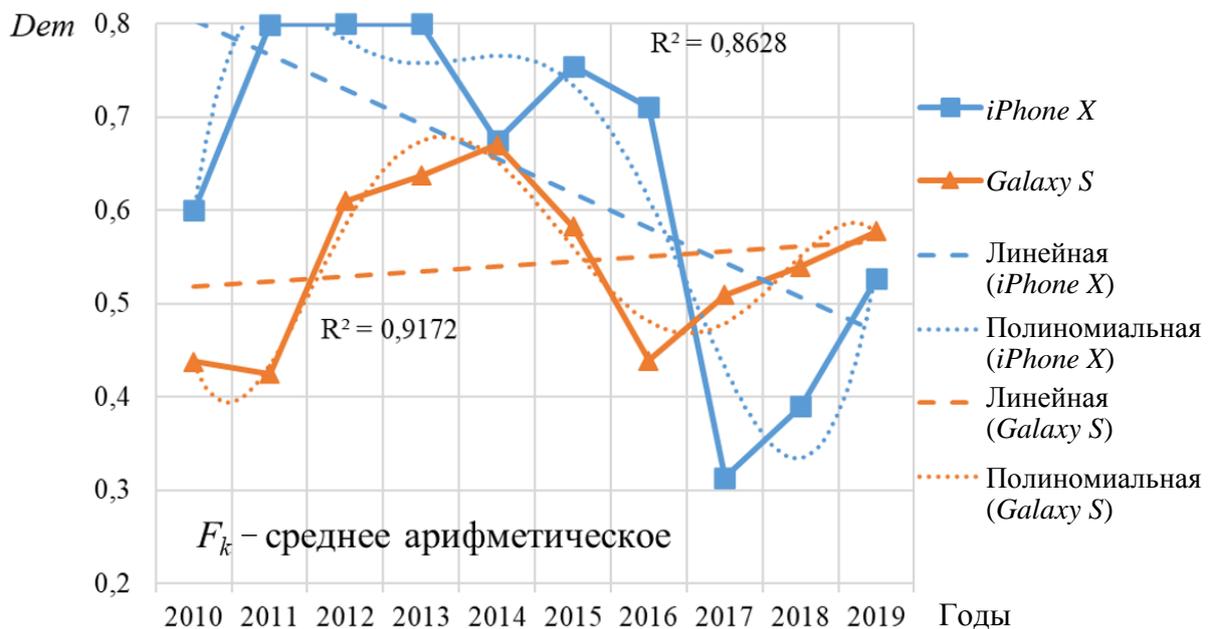


Рис. 4. Динамика изменения востребованности объектов *iPhone X* и *Galaxy S* за 10-летний период (F_k – среднее арифметическое)

На рис. 5 представлена сравнительная диаграмма индикаторов новизны, востребованности и имплементируемости исследуемых объектов, построенная по

данным из двух источников. Диаграмма индикатора востребованности исследуемых объектов в сравнении с экспертной оценкой рейтинга смартфонов (<https://rskrf.ru/ratings/tekhnika-i-elektronika/electronic/smartfony->) «Российской системы качества» показана на рис. 6.

В ходе проведения экспериментов был получен достаточный объем данных для первичного анализа динамики изменений показателей инновационности объектов и сравнения их с экспертными оценками. На рис. 1–6 приведена часть этих данных.

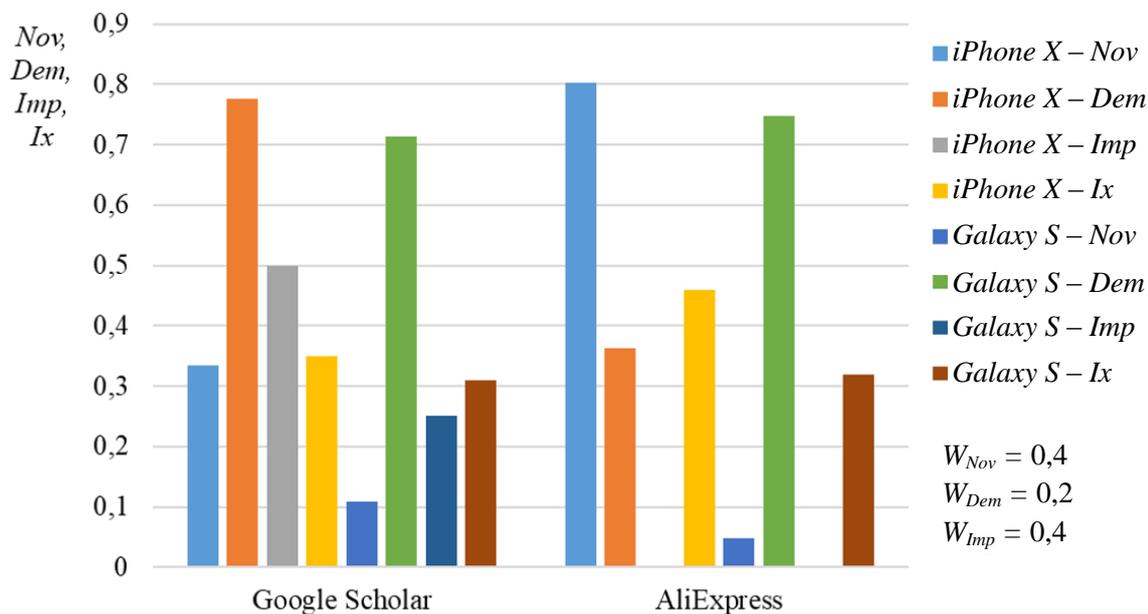


Рис. 5. Индикаторы инновационности исследуемых объектов *iPhone X* и *Galaxy S*

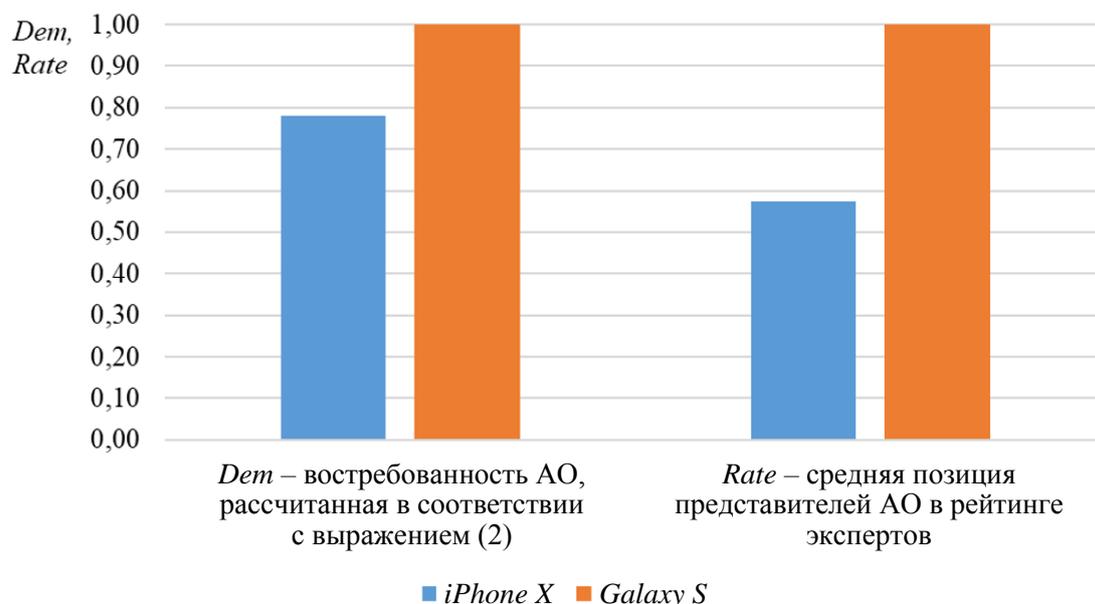


Рис. 6. Вычисленный индикатор востребованности *Dem* в сравнении с экспертной оценкой

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Очевидна цикличность изменений анализируемых показателей (см. рис. 1–4), которая соответствует предположению о наличии инновационных циклов в конкретной области применения.

Для рассмотренной области применения (смартфоны) установленная цикличность появления инновационных продуктов составляет 5–6 лет (см. рис. 1–4). Эта периодичность требует дополнительного анализа.

Анализ соотношений показателей новизны о востребованности объектов выявляет определенные закономерности: падение востребованности вызывает рост новизны объекта, а рост востребованности объекта приводит к падению его новизны, что подтверждают рис. 1–3.

Полученные данные позволяют оценить некоторые особенности производства и продвижения продуктов. Так, восходящий тренд новизны и нисходящий тренд востребованности продуктов *iPhone X* показывают высокий производственный потенциал производителя и наличие резервов в маркетинге. Для продуктов *Samsung Galaxy S* идентифицируется наличие производственных резервов (нисходящий тренд новизны) и стабильный уровень маркетинга (флэт востребованности продуктов) (см. рис. 1, 3 и 4).

Особенностью аддитивного критерия является возможность взаимной компенсации значений локальных критериев при вычислении глобального оценочного критерия. Эта ситуация показана на рис. 5. Здесь значения показателей *Nov* и *Dem* для продуктов *iPhone X* существенно отличаются для различных источников исходных данных. Кроме того, соотношения между значениями как *Nov*, так и *Dem* обратны для этих источников. При этом значения глобального критерия I_x для обоих источников сопоставимы.

Аппроксимация полученных значений показателей инновационности позволяет оценить (и в определенном смысле прогнозировать) их динамику.

Чувствительность модели вычислений к виду нормирующей функции очевидна: существенно различаются значения *Nov* (см. рис. 2). Отметим некоторые особенности. Линейная аппроксимация дает практически одинаковый угловой коэффициент для всех трех вариантов, но различные величины сдвига, полиномиальная показывает одинаковую периодичность *Nov* для всех вариантов, что говорит об отсутствии влияния нормирующей функции на вычисление значения *Imp*. Более точная оценка условий применения методов нормирования требует проведения дополнительных исследований.

Полученные экспериментальные данные хорошо согласуются с экспертными оценками исследуемых объектов (см. рис. 6). Показано соотношение показателей востребованности разных объектов, вычисленных в соответствии с формулой (2). Аналогичное соотношение наблюдается при анализе результатов экспертизы. Результаты вычислений и экспертизы востребованности объектов вполне сравнимы, так как методикой экспертных оценок смартфонов предусматривается выбор параметров оценки и их значимости исходя из предпочтений пользователей.

Теоретическое обоснование типа оценочного критерия базируется на положениях теории полезности и теории свидетельств. Их достаточная апробированность позволяет надеяться на адекватность разработанных моделей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная в статье модель используется при разработке вычислительных алгоритмов для отбора информации об объектах с инновационным потенциалом. Экспериментальные данные позволили усовершенствовать методику расчета пока-

зателей инновационности объектов, включая совместную обработку нечетких данных, полученных из разных поисковых систем. Результаты исследования подтвердили основные предположения, используемые при разработке модели. В дальнейших исследованиях предполагается расширить экспериментальную базу для получения более статистически значимых результатов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ
(проект № 18-07-00358 и проект № 20-07-00199).

ЛИТЕРАТУРА

1. Организация и поддержка хранилища данных на основе интеллектуализации поискового агента и эволюционной модели отбора целевой информации. Описание проекта. URL: https://www.rfbr.ru/rffi/ru/project_search/o_2071601 (дата обращения: 30.05.2020).
2. Tucker R.B. Driving growth through innovation: how leading firms are transforming their futures. 2nd ed. Berrett-Koehler Publishers, San Francisco, 2008. 224 p.
3. Mortensen P.S., Bloch C.W. Oslo Manual-Guidelines for collecting and interpreting innovation data // Organisation for Economic Cooperation and Development. Paris: OECD, 2005.
4. Фишберн П. Теория полезности для принятия решений. М.: Наука, 1978. 352 с.
5. Кини Р.Л., Райфа Х. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения: пер. с англ. / под ред. И.Ф. Шахнова. М.: Радио и связь, 1981. 560 с.
6. Shafer G. A Mathematical theory of evidence. Princeton, N.J.: Princeton University Press, 1976.
7. Yager R., Liping Liu. Classic works of the Dempster – Shafer theory of belief functions. London: Springer, 2010.
8. Ivanov V.K., Palyukh B.V., Sotnikov A.N. Efficiency of genetic algorithm for subject search queries // *Lobachevskii Journal of Mathematics*. 2016. V. 37. № 3. P. 244–254.
9. Ivanov V.K., Palyukh B.V., Sotnikov A.N. Features of data warehouse support based on a search agent and an evolutionary model for innovation information selection. *Proceedings of the Fourth International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (ITI’19)*, Springer Nature Switzerland AG, 2020. P. 1–11.

Для цитирования: Иванов В.К. Экспериментальная проверка модели оценки инновационности объекта // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2020. № 4 (8). С. 54–63.

EXPERIMENTAL VERIFICATION OF MODEL FOR OBJECT INNOVATION EVALUATION

V.K. IVANOV, Cand. Sc.

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,
Russian Federation, e-mail: mtivk@mail.ru

The article discusses the approach for evaluating the innovation index of the products and technologies. The evaluation results can be used to create a warehouse for the object descriptions with significant innovation potential. The innovation index calculation model is

*Вестник Тверского государственного технического университета.
Серия «Технические науки». № 4 (8), 2020*

based on the concepts of novelty, relevance, and implementability of the object. Formal definitions of these indicators are given and a methodology for their calculation are described. The fuzzy methods to process (incomplete) data from numerous sources and to obtain probabilistic innovation assessments are used. The experimental data of the model verification including the calculations of local criteria and global additive evaluation criterion are presented. The cyclical nature of dynamic changes in indicators, their interdependence and some general features of product promotion have been established. The obtained experimental data check with expert judgement of the investigated products. The analysis of the local criteria used in the research affords ground to assert about the correct use of the additive n-dimensional utility function. The adequacy of assumptions and formal expressions that are used in computational algorithms for selection information for data warehouse is confirmed.

Keywords: data warehouse, innovation, additive criterion, utility function, search query.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research, project № 18-07-00358 and project № 20-07-00199.

REFERENCES

1. Data Warehousing Based on Search Agent Intellectualization and Evolutionary Model of Target Information Selection. The project summary. URL: https://www.rfbr.ru/rffi/ru/project_search/o_2071601 (data accessed: 07.05.2020).
2. Tucker R.B. Driving growth through innovation: how leading firms are transforming their futures. 2nd ed. Berrett-Koehler Publishers, San Francisco, 2008. 224 p.
3. Mortensen P.S., Bloch C.W. Oslo Manual-Guidelines for collecting and interpreting innovation data. Organization for Economic Cooperation and Development. Paris: OECD, 2005.
4. Fishburn P. Teoriya poleznosti dlya prinyatiya resheniy. [The theory of utility for decision making]. Moscow: Nauka, 1978. 352 p.
5. Kini R.L., Raifa X. Prinyatiye resheniy pri mnogikh kriteriyakh: predpochteniya i zameshcheniya. [Decision making under many criteria: preferences and substitutions] Ed. I.F. Shakhnov. Moscow: Radio i svyaz, 1981. 560 p.
6. Shafer G. A Mathematical theory of evidence. Princeton, N.J.: Princeton University Press, 1976.
7. Yager R., Liping Liu. Classic works of the Dempster – Shafer theory of belief functions. London: Springer, 2010.
8. Ivanov V.K., Palyukh B.V., Sotnikov A.N., Efficiency of genetic algorithm for subject search queries. *Lobachevskii Journal of Mathematics*. 2016. V. 37. No. 3. Pp. 244–254.
9. Ivanov V.K., Palyukh B.V., Sotnikov A.N. Features of data warehouse support based on a search agent and an evolutionary model for innovation information selection. *Proceedings of the Fourth International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (IITI’19)*, Springer Nature Switzerland AG. 2020, pp. 1–11.

Поступила в редакцию/received: 17.07.2020; после рецензирования/revised: 16.10.2020; принята/accepted 15.11.2020

ПРОБЛЕМА ОЦЕНКИ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ГОТОВНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

С.М. КАРДАШ, канд. техн. наук, А.В. ДЕМИДОВ, адъюнкт

Военная академия воздушно-космической обороны имени Маршала Советского
Союза Г.К. Жукова, 170003, Тверь, ул. Жигарева, д. 50,
e-mail: kardashsm@mail.ru

© Кардаш С.М., Демидов А.В., 2020

Обоснована необходимость оценки функциональной готовности комплексов автоматизированных систем управления (АСУ) с учетом следующих факторов: надежность технических средств, надежность управляющих программ (программного обеспечения), надежность технической системы с учетом деятельности операторов боевого управления.

Ключевые слова: воздушно-космические силы, автоматизированная система управления военного назначения, функциональная готовность.

DOI: 10.46573/2658-5030-2020-4-64-67

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время развитие Вооруженных сил Российской Федерации (ВС РФ) направлено на гарантированное управление войсками (силами) и оружием в едином информационном пространстве (ЕИП).

Вооруженные силы РФ представляют собой иерархические организационные системы, элементы которых находятся во взаимодействии друг с другом согласно предназначению. Функционирование видов и родов ВС РФ различного уровня иерархии в условиях применения противником новейших средств воздушно-космического нападения поставило новые задачи по совершенствованию управленческой деятельности на основе комплексной автоматизации управления.

Существующие методы обоснования рационального варианта оснащения автоматизированной системы управления военного назначения (АСУ ВН) не позволяют в полной мере решить данную задачу. Это связано со сложностью оценки функционирующей АСУ ВН вследствие ее иерархичности и с многофункциональностью элементов системы.

Существующие методы оценки АСУ ВН [1–3] не учитывают вероятность безотказной работы программного обеспечения и человека-оператора в дополнение к вероятности безотказной работы технических средств. В связи с этим целью данной статьи является вербальное описание проблемы оценки функциональной готовности АСУ ВН.

ВЕРБАЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ ПРОБЛЕМЫ ОЦЕНКИ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ГОТОВНОСТИ

В данной статье под функциональной готовностью АСУ ВН понимается характеристика, выражающаяся в возможности АСУ реализовать свой потенциал с учетом дестабилизирующих факторов, таких как отказы и ошибки.

Характерными особенностями перспективной АСУ ВН должны быть модульное построение ее элементов, стандартизация и унификация аппаратных и программных средств.

Создание такой АСУ ВН возможно при соединении необходимыми вертикальными и горизонтальными связями всех звеньев управления и обеспечении их взаимодействия между собой, что позволит расширить информационное пространство контура управления. В связи с этим актуальным представляется анализ состава и порядка функционирования элементов АСУ ВН.

Поскольку в настоящий момент отсутствует порядок оценки функциональной готовности элементов АСУ ВН на этапе эксплуатации, в статье приведена декомпозиция задачи оценки надежности АСУ ВН.

Декомпозиция задач оценки надежности связана с рядом особенностей АСУ ВН, в связи с чем требуется учитывать ряд особенностей:

каждая АСУ является многофункциональной системой, функции которой имеют существенно различную значимость и, соответственно, характеризуются разным уровнем требований к надежности их выполнения;

во многих АСУ возможно возникновение некоторых исключительных (аварийных, критических) ситуаций, представляющих сочетание отказов или ошибок функционирования системы и способных привести к значительным нарушениям функционирования объекта управления (авариям);

в функционировании АСУ участвуют различные виды ее обеспечения и персонал АСУ, которые могут в той или иной степени влиять на уровень надежности системы;

в состав каждой АСУ входит большое количество разнородных элементов (технических, программных и др.), при этом в выполнении одной функции АСУ обычно участвует несколько различных элементов, а один и тот же элемент может участвовать в выполнении нескольких функций системы.

Таким образом, при рассмотрении функциональной готовности элементов АСУ ВН на этапе эксплуатации целесообразно отдельно оценивать:

надежность технических средств;

надежность управляющих программ (программного обеспечения);

надежность технической системы с учетом деятельности операторов боевого управления.

Оценка показателей надежности технических средств является обязательной процедурой, выполняемой на этапах проектирования, приработки и эксплуатации комплекса средств автоматизации АСУ ВН [5].

Для АСУ ВН крайне важно добиться реализации максимальных значений показателей надежностей технических средств, в том числе путем их корректных расчетов.

В настоящее время основные расходы на разработку АСУ ВН составляют затраты на создание качественного программного обеспечения (ПО). Надежность ПО существенно влияет на общую функциональную готовность элементов АСУ ВН. Это связано с тем, что значения показателя интенсивности программных дефектов и ошибок гораздо выше, чем у аналогичного показателя интенсивности отказов технических средств [1].

Между надежностью оператора и технических устройств в системе «человек – машина» существует взаимное влияние. Как машина, так и оператор могут выводить из строя систему. Кроме того, несовершенство машины может провоцировать отказы оператора. Человек, в свою очередь, тоже может при управлении машиной вызвать в ней отказы.

Однако человек в состоянии обнаруживать и устранять отказы машины в случае их возникновения и способен, даже при отдельных поломках машины, удерживать ее выходные параметры в заданных пределах и не допускать ее полного отказа. Человек с его большим адаптационным и творческим потенциалом самым фактом своего участия в системе управления способствует повышению ее надежности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Автоматизированная система управления ВН – сложная, иерархическая, решающая огромный спектр задач специального назначения система. На данный момент в проблеме функционирования АСУ ВН существует множество «белых пятен», поскольку существующие системы находятся в стадии морального и физического устаревания, а новые, перспективные АСУ до сих пор на вооружение не поступили. Следовательно, проблема оценки функциональной готовности элементов, существующих АСУ ВН на этапе эксплуатации на данный момент стоит достаточно остро и ее решение является одним из важнейших шагов для принятия решения по переоснащению элементов, снижающих возможности применения системы автоматизации при решении поставленных задач по повышению эффективности функционирования АСУ ВН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кардаш С.М. Научно-методический подход к оценке функциональной надежности автоматизированной системы управления военного назначения // *Сборник научно-методических трудов II Всероссийской научно-практической конференции*. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. С. 259–263.
2. Ляковский В.Л. Основы проектирования и эксплуатации автоматизированных систем управления военного назначения: учебное пособие. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. 188 с.
3. Кардаш С.М., Ефимов Н.А. Модель оценки надежности функционирования технических средств КСА КП объединения ВКС // *Сборник материалов военно-научной конференции ЯВЗРКУ*. Ярославль, 2017. С. 80–84.
4. Егоров Ю.П., Пятаков А.И., Сулейманова Л.И. Оценка готовности программно-технического комплекса к решению функциональных задач // *Автоматизация процессов управления*. 2018. № 2 (52). С. 20–27
5. ГОСТ 24.701-86 Единая система стандартов автоматизированных систем управления. Надежность автоматизированных систем управления. М.: Стандартинформ, 2009. 12 с.

Для цитирования: Кардаш С.М., Демидов А.В. Проблема оценки функциональной готовности автоматизированной системы управления военного назначения // *Вестник Тверского государственного технического университета*. Серия «Технические науки». 2020. № 4 (8). С. 64–67.

PROBLEM OF FUNCTIONAL READINESS ASSESSMENT FOR MILITARY AUTOMATED CONTROL SYSTEM

S.M. KARDASH, Cand. Sc., A.V. DEMIDOV, Adjunct

Military Academy of Aerospace Defense named after Marshal of the Soviet Union
G.K. Zhukov, 50, Zhigareva st., 170003, Tver, Russian Federation,
e-mail: kardashsm@mail.ru

It is substantiated the necessity of evaluating the functional readiness for complexes of automated control systems (ACS) with the following factors: reliability of technical means, reliability of control programs (software reliability), reliability of the technical system taking into account the activities of combat control operators.

Keywords: air-space forces, automated control system for military purposes, functional readiness.

REFERENCES

1. Kardash S.M. A scientific and methodological approach to assessing the functional reliability of an automated military control system. *Sbornik nauchno-metodicheskikh trudov II Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Moscow: MGTU im. N.E. Baumana, 2017, pp. 259–263. (In Russian).
2. Lyaskovsky V.L. *Osnovy proyektirovaniya i ekspluatatsii avtomatizirovannykh sistem upravleniya voyennogo naznacheniya*. Uchebnoye posobiye. [Fundamentals of the design and operation of automated military control systems. Textbook]. Moscow: MGTU im. N.E. Baumana, 2016. 188 p.
3. Kardash S.M., Efimov N.A. A model for assessing the reliability of the functioning of technical equipment of the KSA KP association of the videoconference. *Sbornik materialov voyenno-nauchnoy konferentsii YAVZRKU*. Yaroslavl. 2017, pp. 80–84. (In Russian).
4. Egorov Yu.P., Pyatakov A.I., Suleymanova L.I. Assessment of the readiness of the software and hardware complex for solving functional problems. *Avtomatizatsiya protsessov upravleniya*. 2018. No. 2 (52), pp. 20–27. (In Russian).
5. GOST 24.701-86 *Yedinaya sistema standartov avtomatizirovannykh sistem upravleniya*. Nadezhnost avtomatizirovannykh sistem upravleniya. [Unified system of standards for automated control systems. Reliability of automated control systems]. Moscow: Standartinform, 2009. 12 p.

Поступила в редакцию/received: 30.07.2020; после рецензирования/revised: 24.08.2020;
принята/accepted 15.09.2020

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА РЕШЕНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ОПЕРАЦИЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

А.Н. БОЛОТОВ, д-р техн. наук, Г.Б. БУРДО, д-р техн. наук

Тверской государственной технической университет, 170026, Тверь,
наб. Аф. Никитина, д. 22, e-mail: *gbtms@yandex.ru*

© Болотов А.Н., Бурдо Г.Б., 2020

В работе показана методика оценки решений при проектировании технологических процессов. Методика применима при синтезе технологических процессов по способу многовариантной декомпозиции, когда проектирование выполняется на нескольких уровнях. Отбор решений в соответствии с предлагаемыми критериями позволяет резко сократить число просматриваемых вариантов синтезированных решений и целенаправленно управлять процессом проектирования.

Ключевые слова: машиностроительное производство, декомпозиция, критерии оптимальности, целевая функция, технологический процесс, системы автоматизированного проектирования технологических процессов.

DOI: 10.46573/2658-5030-2020-4-68-76

ВВЕДЕНИЕ

Машиностроительное производство в настоящее время является по большей части многономенклатурным, относящимся к серийному и мелкосерийному типам производства. Этот факт предполагает малые сроки проведения технологической подготовки производства в связи с большим числом одновременно запускаемых в работу заказов.

Использование систем автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР ТП), как правило, заключается в оформлении с их помощью разработанных технологами процессов механообработки, а также в выборе из имеющихся баз данных модели оборудования и средств технологического оснащения.

Применение при проектировании в САПР ТП метода декомпозиции ограничивается необходимостью просмотра большого числа вариантов решений, что приводит к значительным временным затратам.

В связи с этим целью выполняемого исследования явилась разработка системы критериальных оценок для отбора целесообразных решений на уровнях декомпозиции процесса проектирования.

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ КРИТЕРИЕВ

Рассмотрим основные правила, которые определяют построение системы критериев (СК) на уровнях декомпозиции процесса проектирования (ПП).

Система критериев на уровнях декомпозиции [1, 2] ПП в автоматизированных системах проектирования технологических процессов – важная составляющая для оценки возможных вариантов.

Так как полученные варианты технологических процессов на верхних уровнях проектирования вследствие малой степени их подробности затруднительно оценить в окончательных параметрах технологического процесса, оценка выполнялась технологом. Предлагаемый подход лишен указанного недостатка.

Следует также отметить, что степень точности оценок качества технологии должна увеличиваться, и это должно обеспечивать сужение пространства поиска решений в районе оптимума.

Известен тот факт, что при многоуровневой декомпозиции наличие оптимальных решений на уровнях ПП не обеспечивают оптимума общего решения. Следовательно, чтобы не потерять при проектировании и переходе с уровня на уровень близкого к оптимальному общего решения, необходимо на каждом уровне проектирования технологического процесса оставлять несколько решений.

Для учета этого момента следует на основе экспертных оценок назначать интервальные критерии, что автоматически будет формировать некоторое число возможных вариантов.

Определены следующие важнейшие принципы, позволяющие создать СК:

1. Учет главных параметров и их влияния на результаты общего решения.
2. Количественный вид СК. Данное представление системы критериальной оценки гарантированно позволяет увидеть количественную связь параметров общего решения по технологическому процессу и численных величин критериев более высоких иерархических уровней и отражать изменение параметров технологического процесса.
3. Система критериев охватывает все уровни процесса проектирования, главные системные свойства технологического процесса и отражает изменения в производственной системе.
4. Система критериев должна быть системно связанной и отражать иерархию процесса проектирования.
5. Семантическое содержание системы критериальных оценок на всех иерархических уровнях должна отвечать логике и смыслу решаемой технологической задачи.
6. Отбор возможных вариантов с помощью СК должен обеспечивать на уровнях процесса проектирования постепенное уменьшение числа возможных решений.

ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ КРИТЕРИЕВ ОЦЕНКИ РЕШЕНИЙ В САПР ТП

1. На первом уровне ПП – построение схемы ТПр – применяются следующие критерии: технологической себестоимости $C_m \rightarrow \min$; приведенных затрат неполного оперативного времени $t_{on} \rightarrow \min$; максимума производительности процесса резания $K_m \rightarrow \max$. Данные критерии предполагают наличие параметров технологии, проектируемой на низшем уровне, что вызывает длительность итерационных процедур при проектировании ТПр.

К недостаткам такого подхода на первом уровне ПП можно отнести отсутствие взаимосвязи критериев с состоянием технологических подразделений; неявную связь с параметрами, описывающими решение данного уровня.

Основным параметром ТПр, которым можно варьировать на этом уровне, являются маршруты обработки поверхностей (МОП), отражающие определенные особенности спроектированного решения.

Проанализируем два параметра – мощность обобщенного маршрута обработки поверхностей, $M_o = \cup МОП_i = \cup \{ПЕР_j\}_i$, $M_o = \cup МОП_i = \cup \{ПЕР_j\}_i$, где i – обрабатываемые поверхности детали, j – переход обработки, $(ПЕР)_j$; мощность пересечения (общность) методов обработки поверхностей детали, $M_{II} = \cap МОП_i = \cap \{ПЕР_{ji}\}_i$. Проанализируем эти характеристики (M_o и M_{II}) по такому параметру, как вид перехода механообработки.

Определим число элементов в данных множества M_O и M_{II} как N_O и N_{II} , их отношение $K_{II} = N_O / N_{II}$ подвергнем анализу.

Возрастание K_{II} свидетельствует о реализации большего числа различных технологических методов и, соответственно, металлорежущего инструмента; об увеличении затрат на инструмент, остановов.

Сокращение K_{II} говорит о сокращения различных технологических переходов, уменьшении числа установов.

Проанализируем M_O и M_{II} по другому признаку – типу металлорежущего инструмента. Количество элементов – N^I_o и N^I_{II} , их частное определим как коэффициент $K_{II} = N^I_o / N^I_{II}$.

Величина K_{II} пропорционально характеризует число металлорежущего инструмента и денежные затраты на его эксплуатацию.

Введем коэффициент K_{III} , отражающий загрузку оборудования в технологических подразделениях:

$K_{III} = (Z_T / 0,85)^{m_1}$, где Z_T – приведенная загрузка металлорежущих станков, реализующих M_O ; $Z_T = \sum^n Z_{II_i}$, где Z_{II_i} – приведенная загрузка i -го типа станочного оборудования, n – число единиц оборудования данного типа; 0,85 – загрузка металлорежущего оборудования, желательная для производства данного типа (может корректироваться); m_1 – показатель степени.

В свою очередь $Z_{II_i} = (z_i \times p_i) / p$, где z_i – фактическая загрузка i -го типа металлорежущего оборудования; p_i – общее число переходов, выполняемых на i -м типе оборудования; p – общее число переходов, выполняемых на всех типах оборудования.

K_{III} комплексно характеризует загрузку оборудования и работоспособность технологических подразделений. Можно также отметить, что данный коэффициент пропорционально связан с загрузкой рабочих мест и со степенью дифференциации и концентрации технологических процессов.

Рассмотрим произведение K_{II} и $(1 \div K_{III})$, обозначая его коэффициентом K_1^1 :

$$K_1^1 = (\cup MO_{II_i} / MO_{II_i}) \cdot (1 \div K_{III}) = (N_O / N_P) \cdot (1 \div (Z_T / 0,85)^{m_1}).$$

K_1^1 характеризует структуру технологического процесса по технологическим методам и ожидаемое распределение методов по оборудованию и загрузку станков.

Рассмотрим $K_2^1 = K_{II} \cdot (1 - K_{III})$, или $K_2^1 = (N^I_o / N^I_P) \cdot (1 \div (Z_T / 0,85)^{m_1})$.

K_2^1 позволяет комплексно оценить структуру технологического процесса и загрузку оборудования предусмотренными переходами, т.е. имеет синтетический характер, но в большей степени связан с затратами, чем K_1^1 .

Следовательно, критерий $K_1^1 = E_1^1$ целесообразно применять, если целевая функция технологического процесса $Q \rightarrow \max$, а $K_2^1 = E_2^1$ – при $C \rightarrow \min$:

$$K_{1\min} \leq E_1^1 \leq K_{1\max}; \quad K_{2\min} \leq E_2^1 \leq K_{2\max}.$$

Если целевая функция – минимизация технологического цикла $T_u \rightarrow \min$, то предусматривается дифференциация технологического процесса и

параллельно-последовательная обработка. Тогда загрузка технологических подразделений во времени не учитывается ($K_{III} = 1$), а K_1^1 смещен в сторону увеличения; поэтому критерий $E_3^1 = K_{II}$:

$$K_{3\min} \leq E_3^1 \leq K_{3\max}.$$

Значения $K_{1\max}, K_{2\max}, K_{1\min}, K_{2\min}, K_{3\max}, K_{3\min}$ должны устанавливаться на основе опыта работы производственных подразделений и анализа расчетных и фактических параметров их работы. Рекомендуемые значения критериев приведены в табл. 1.

Таблица 1. Интервалы критериев

Детали	$K_{1\min}^1$	$K_{1\max}^1$	$K_{2\min}^1$	$K_{2\max}^1$	$K_{3\min}^1$	$K_{3\max}^1$	m_1
Корпусные детали вращения	1,5	3,6	1,9	3,4	1,8	4,5	0,8
Диски, втулки	1,9	3,8	1,95	3,6	1,9	4,4	0,8
Валы непустотелые	1,7	4,3	1,95	3,9	1,8	4,7	0,8

2. На уровне проектирования маршрута обработки детали используются следующие критерии: максимум производительности технологической операции $Q_{оп} \rightarrow \max$; минимум приведенных затрат $C_{пр.оп} \rightarrow \min$; минимум технологической себестоимости $C_{т.оп} \rightarrow \min$ и станкоемкости $T_{штк} \rightarrow \min$ [4]. Критерии ориентировочны, так как технологические расчеты еще не конкретны.

Введем коэффициент $K_0 = \kappa / q$, где κ – число технологических операций механической обработки в маршруте обработки детали; q – количество этапов механической обработки, предусмотренных решениями на первом уровне ПП. Возрастание K_0 будет означать более дифференцированные операции технологического процесса, снижение – более концентрированные.

Проанализируем формулу $K_d = (L_p / L_d)^{m_2}$, где L_d – величина партии деталей, с которой целесообразна дифференциация ТПр; L_p – величина фактической партии, запускаемой в производство. При возрастании партии изделий L_p следует повышать уровень дифференциации технологии. Справедливо и обратное.

Введем коэффициент K_{III}^2 , учитывая, что уже выяснены группы оборудования в пределах типа:

$K_{III}^2 = (Z_r / 0,85)^{m_1}$, где Z_r – загрузка по группам станочного оборудования в пределах типа; $Z_r = \sum Z_{ггн}$, где $Z_{ггн}$ – обобщенная загрузка i -й группы станков, $Z_{ггн} = (Z_i \cdot p_i) / p$; Z_i – фактическая загрузка i -й группы станков.

Проанализируем следующие зависимости:

1) $K_1^2 = K_0 \cdot (1 \div K_{III}^2)$. Значение K_1^2 отражает структуру спроектированного технологического процесса и состояние технологических подразделений. Следовательно, выражение $K_1^2 = (\kappa / q) \cdot (1 \div (Z_r / 0,85)^{m_1})$ можно реализовать как критерий E_1^2 (верхний индекс означает уровень), когда целевая функция технологического процесса $Q_{оп} \rightarrow \max$ (верхний индекс означает уровень): $K_1^2 \min < E_1^2 < K_1^2 \max$;

2) $K_2^2 = E_2^2 = K_0 \cdot (1 \div (K_{III}^2 \cdot K_d))$. K_d отражает экономический аспект технологии. Тогда, при $K_1^2 \min = K_2^2 \min$ и $K_1^2 \max = K_2^2 \max$ и $L_p \leq L_d$ ($K_d < 1$), соблюдение

неравенства $K_2^2 \min < E_2^2 < K_2^2 \max$ определяет уменьшение K_o , т.е. концентрацию операций. Критерий следует использовать при целевой функции технологического процесса $C \rightarrow \min$.

При целевой функции технологического процесса $T_{ц} \rightarrow \min$, $E_3^2 = K_3^2 = K_o$ и критерий $K_3^2 \min < E_3^2 < K_3^2 \max$, его интервал должен быть смещен в сторону более высоких значений. Значения интервалов для критериев данного уровня показаны в табл. 2.

Таблица 2. Интервалы критериев

Детали	$K_{1\min}^2$	$K_{1\max}^2$	$K_{2\min}^2$	$K_{2\max}^2$	$K_{3\min}^2$	$K_{3\max}^2$	m_1
Корпусные детали	1,4	1,8	1,6	2,1	1,9	2,6	0,85
Втулки, диски	1,2	1,5	1,5	2,3	1,7	2,2	0,85
Валы непустотелые	1,35	1,6	1,4	2,1	1,75	2,4	0,85

Выбор критериев осуществляется в соответствии с принципом справедливой относительной уступки [5], согласно которому «справедливым является такой компромисс, при котором суммарный относительный уровень снижения качества одного или нескольких критериев не превосходит суммарного относительного уровня повышения качества по остальным критериям», и определяется тем, что мы обеспечиваем выравнивание значений локальных критериев.

3. На уровне синтеза структуры технологических операций реализуют критерии:

- 1) неполного штучного времени $t'_{шт}$;
- 2) неполного вспомогательного времени $\sum t'_B$;
- 3) себестоимости всех переходов обработки $\sum C_{пер i}$.

Очевидна попытка нахождения соответствия между производительностью и себестоимостью, однако точное значение критериев получить пока затруднительно. Посмотрим оценку операции с помощью такого критерия, как неполное штучное время, оцениваемое по его изменяемым затратам:

$$t'_{шт} = (\sum l_{pxi} / S_i + \sum l_{xkj} / V_{xkj} + t_{cuk}) V,$$

где l_{pxi} , l_{xkj} – длины рабочих и холостых перемещений режущего инструмента; S_i , V_{xkj} – величина рабочей подачи, скорости холостых подач соответственно, мм/мин; t_{cuk} – время на k -ю смену режущего инструмента; V – вариант структуры технологической операции.

Рассмотрим возможность использования критерия $t'_{шт}$ для различного вида станочного оборудования. Для станков с ручным управлением длины рабочих ходов и очередность смены инструмента сформированы при построении структур операций, а холостые перемещения самостоятельно формируются рабочим, следовательно, общая величина рабочих перемещений будет достаточно точным критерием.

Рассмотрим станки с числовым программным управлением (ЧПУ) по типам. Для токарных станков с ЧПУ важна оценка времени на рабочие перемещения, так как холостые строятся возможно малыми, а их скорости на порядок превышают скорости

рабочих. Затраты времени на смену инструмента незначительны, и ими можно пренебречь.

Для фрезерно-сверлильно-расточных станков с ЧПУ свои особенности. Объемная фрезерная обработка формируется типовыми траекториями, затраты времени на эти переходы для определенной детали приблизительно одинаковы. Поскольку затраты времени на переходы сверления, растачивания, развертывания, нарезания резьб и другие технологические операции зависят от длины резания и для конкретной детали постоянны, рациональность структуры операции определяется затратами времени на переход к обработке между поверхностями. Поэтому авторами предлагается выявленная зависимость [6] для определения изменяющихся составляющих времени на холостые хода $t_{ев}$. Для отражения свойств технологических подразделений, с учетом того, что модель станка определяется на данном уровне, можно ввести критерий $K_{3q} = (Z_q / Z_{mo})^{m3}$, где Z_q – загрузка q станка данной группы; средняя загрузка K станков группы, $Z_{mo} = \sum Z_q / K$. Тогда предложим критерии E^3 . Для универсальных станков с ручным управлением при целевой функции $Q \rightarrow \max$, приняв

$$\forall v, q \left[\sum_{pxiv}^m l_{pxiv} \cdot K_{3q} \right]_{\min} = E_{1\min}^3 \text{ и } \left[\sum_{pxiv}^m l_{pxiv} \cdot K_{3q} \right] = E_1^3,$$

имеем

$$K_1^3 \cdot E_{1\min}^3 \geq E_1^3 \geq E_{1\min}^3,$$

где v – порядковый номер варианта; K_1^3 – коэффициент, можно принять его равным 1,3...1,4.

Когда целевая функция $C \rightarrow \min$, то исходя из предположения, что затраты на амортизацию оборудования и инструмента пропорциональны величинам рабочих перемещений, можно записать выражение для общих затрат Z_{ql} :

$$Z_{ql} = \left(\sum_{pxiv}^m l_{pxiv} \right) \cdot C_{cq} + \sum_{l=1}^n \left(\left(\sum_{pxj}^{p_i} l_{pxj} \right)_l \right) \cdot C_{ul},$$

где C_{cq} – затраты на станко-час работы q -го станка без учета затрат по инструменту; C_{ul} – затраты по l инструменту ($l=1, n$), отнесенные к 1-му часу процесса резания; l_{pxjl} – величина j -го рабочего перемещения l -го инструмента, $j=1, p_i$; $\sum_{l=1}^n \left(\sum_{pxj}^{p_i} l_{pxj} \right)_l = \sum_{pxiv}^m l_{pxiv}$; $m=n \cdot p_i$ – общее число рабочих перемещений инструмента.

Приняв $\forall (q, l (Z_{ql}))_{\min} = E_{2\min}^3$, имеем критерий E_2^3 : рекомендуется принять $K_2^3 = K_1^3$. Если целевая функция $T_{II} \rightarrow \min$, то загрузку станков можно не учитывать.

Введем обозначения $\left(\sum_{pxiv}^m l_{pxiv} \right) = E_3^3$ и $\forall (v) \left(\sum_{pxiv}^m l_{pxiv} \right)_{\min} = E_{3\min}^3$. Будем иметь:

$$K_3^3 \cdot E_{3\min}^3 \geq E_3^3 \geq E_{3\min}^3. \text{ Можно принять } K_3^3 = K_1^3 = K_2^3.$$

Для токарных станков с числовым программным управлением критерии сходны с критериями для станков с ручным управлением:

$$E_{4T}^3 = E_1^3(Q_\phi \rightarrow \max), E_{5T}^3 = E_2^3(C \rightarrow \min), E_{6T}^3 = E_3^3(T_u \rightarrow \min).$$

В работе [6] доказано, что для многооперационных станков целевые функции $Q_{оп} \rightarrow \max$ и $C \rightarrow \min$ формируют схожие по структуре операции, в связи с чем следует применять критерии $E_7^3 = E_8^3 = t'_{ev} \cdot K_q$.

Введя $\forall v, q(t'_{ev} \cdot K_q)_{\min} = E_{7,8\min}^3$, будем иметь

$$K_3^3 \cdot E_{7,8\min}^3 \geq E_{7,8}^3 \geq E_{7,8\min}^3.$$

Если целевая функция $T_{ц} \rightarrow \min$, то $E_9^3 = t'_{ev}$, $E_{9\min}^3 = t'_{ev\min}$, а $K_9^3 \cdot E_{9\min}^3 \geq E_9^3 \geq E_{9\min}^3$.

4. На уровне нахождения структуры и параметров технологических переходов критерии, кроме $T_{ц} \rightarrow \min$, были исследованы в [7–11].

Имеются зависимости Q и C от структуры и параметров выполнения технологического процесса. Для уточнения критерия необходим учет способа организации инструментального хозяйства.

Критерий K_1^4 может быть записан в виде

$$K_1^4 = Q = f(\{l_{pxi}\}, \{\{PP_j\}_i\}, \{C_j\}, t_e) \cdot K_{3q} \rightarrow \max,$$

где $\{\{PP_j\}_i\}$ – множества параметров режимов обработки на i -х переходах; $\{l_{pxi}\}$ – множество величин рабочих перемещений инструмента; $\{C_j\}$ – временные потери, связанные с $\{\{PP_j\}_i\}$; t_e – внецикловые потери, не связанные с $\{\{PP_j\}_i\}$.

Критерий K_2^4 может быть записан в виде

$$K_2^4 = C = f_2(\{l_{pxi}\}, \{\{PP_j\}_i\}, \{C_{cq}\}, C_{ul}) \cdot K_{3q} \rightarrow \min.$$

Если целевая функция $T_{ц} \rightarrow \min$, целесообразно рассмотреть такой критерий, как максимальная производительность резания K_{pi} на i -м рабочем ходе. Следует иметь в виду, что использование критерия предполагает централизованную наладку инструмента, без привлечения основного рабочего. Для любого перехода или рабочего хода $K_3^4 = K_p$, тогда $K_3^4 = \sum((n_i \cdot s_i) / l_{pxi}) \rightarrow \max$, где n_i, s_i – частота вращения шпинделя и подача на оборот соответственно. Если централизованная наладка инструмента не предусмотрена, то в качестве критерия следует установить $K_3^4 = Q \rightarrow \max$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемая методика назначения критериев на уровнях синтеза технологических процессов в САПР ТП учитывает организационные особенности единичного и мелкосерийного производства, в частности загрузки оборудования по группам и типам. Этот факт, с одной стороны, позволяет модифицировать критерии, с другой – стимулирует выравнивание загрузки металлорежущего оборудования и предотвращения «узких мест». Таким образом, реализуется один из предложенных автором [8] подходов в рамках организационно-технологической концепции проектирования технологических процессов – создание предпосылок для оптимального управления на стадии их проектирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Палюх Б.В., Бурдо Г.Б. Оптимизация процедур поиска технологических решений в комплексной САПР ТП – АСУТП // *Вестник Ижевского государственного технического университета*. 2010. № 3 (47). С. 109–112.
2. Бурдо Г.Б. Исследование процедур проектирования технологий в системах автоматизированного проектирования и управления технологическими процессами // *Вестник Ижевского государственного технического университета*. 2010. № 4 (48). С. 109–113.
3. Палюх Б.В., Бурдо Г.Б. Теоретические основы комплексной автоматизированной системы проектирования и управления технологическими процессами в многономенклатурном производстве // *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2010. № 2 (27). С. 44–54.
4. Кондаков А.И. САПР технологических процессов. М.: Академия, 2007. 272 с.
5. Саркисян С.А., Квашнин В.И., Лисичкин В.А. Теория прогнозирования и принятия решений. М.: Высшая школа, 1993. 347 с.
6. Бурдо Г.Б., Рагозин Г.И. Закономерности автоматизированного проектирования технологий в ГПС: *сборник научных трудов*. Тверь: ТГТУ, 1995. С. 41–44.
7. Зарубин В.М., Капустин Н.М., Павлов В.В. Автоматизированная система проектирования технологических процессов механосборочного производства. М.: Машиностроение, 1979. 247 с.
8. Burdo G.B. Improving the technological preparations for manufacturing production // *Russian Engineering Research*. 2017. V. 37. № 1. P. 49–56.
9. Капустин Н.М. Развитие систем автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР ТП) в машиностроении // *Информационные технологии*. 1996. № 5. С. 13–15.
10. Кунву Ли. Основы САПР CAD/CAM/CAE. СПб.: Питер, 2004. 559 с.
11. Гореткина Е.Н. Перспективы развития САПР // *PC WEEKRE*. 2016. № 35. С. 30–32.

Для цитирования: Болотов А.Н., Бурдо Г.Б. Оценка качества решений при проектировании операций механической обработки // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2020. № 4 (8). С. 68–76.

EVALUATING THE QUALITY OF SOLUTIONS IN THE DESIGN OF MACHINING OPERATIONS

A.N. BOLOTOV, Dr. Sc., G.B. BURDO, Dr. Sc.

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,
Russian Federation, e-mail: gbtms@yandex.ru

The paper shows a method for evaluating solutions in the design of technological processes. The method is applicable to the synthesis of technological processes using the method of multivariate decomposition, when the design is performed at several levels. Selecting solutions in accordance with the proposed criteria allows you to drastically reduce the number of viewed options for synthesized solutions, and purposefully manage the design process.

Keywords: machine-building production, decomposition, optimality criteria, target function, technological process, computer-aided design of technological processes.

REFERENCES

1. Palyukh B.V., Burdo G.B. Optimization of procedures for the search for technological solutions in integrated CAD TP – APCS. *Vestnik Izhevskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2010. No. 3 (47), pp. 109–112. (In Russian).
2. Burdo G.B. The study of technology design procedures in computer-aided design and process control systems. *Vestnik Izhevskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2010. No. 4 (48), pp. 109–113. (In Russian).
3. Palyukh B.V., Burdo G.B. Theoretical foundations of an integrated automated system for designing and controlling technological processes in multinomenclature production. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: tekhnicheskiye nauki*. 2010. No. 2 (27), pp. 44–54. (In Russian).
4. Kondakov A.I. SAPR tekhnologicheskikh protsessov. [CAD of technological processes]. Moscow: Akademiya, 2007. 272p.
5. Sargsyan S.A., Kvashnin V.I., Lisichkin V.A. Teoriya prognozirovaniya i prinyatiya resheniy. [The theory of forecasting and decision making]. Moscow: Vysshaya shkola, 1993. 347 p.
6. Burdo G.B., Ragozin G.I. Patterns of computer-aided design of technologies in GPS. *Sbornik nauchnykh trudov TGTU*. Tver, 1995. Pp. 41–44. (In Russian).
7. Zarubin V.M., Kapustin N.M., Pavlov V.V. Avtomatizirovannaya sistema proyektirovaniya tekhnologicheskikh protsessov mekhanosbornochnogo proizvodstva. [Automated system for designing technological processes of mechanical assembly production]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1979. 247 p.
8. Burdo G.B. Improving the technological preparations for manufacturing production. *Russian Engineering Research*. 2017. V. 37. No. 1, pp. 49–56.
9. Kapustin N.M. Development of computer-aided design of technological processes (CAD TP) in mechanical engineering. *Informatsionnye tekhnologii*. 1996. No. 5, pp. 13–15. (In Russian).
10. Kunwu Lee. CAD Basics CAD / CAM / CAE. St. Petersburg: Piter, 2004. 555 p.
11. Goretkina E.N. Prospects for the development of CAD. *RS WEEKRE*. 2016. No. 35, pp. 30–32. (In Russian).

Поступила в редакцию/received: 24.08.2020; после рецензирования/revised: 16.10.2020;
принята/accepted 15.11.2020

Вестник Тверского государственного технического университета.
Серия «Технические науки». № 4 (8), 2020

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В ЭРГАТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Н.М. ПУЗЫРЕВ, канд. техн. наук, Д.В. МАРТЫНОВ, канд. техн. наук,
Н.Б. БАРБАШИНОВА, доцент

Тверской государственной технической университет, 170026, Тверь,
наб. Аф. Никитина, д. 22, e-mail: puzyrevfdpo@rambler.ru

© Пузырев Н.М., Мартынов Д.В., Барбашинова Н.Б., 2020

Создание безопасных условий труда в эргатических системах возможно лишь при учете большого количества элементов, факторов, условий, ограничений, которые взаимосвязаны и составляют сложную систему, без анализа которой невозможно достичь требуемого результата при решении задач по обеспечению или повышению требуемого уровня производственной безопасности при проектировании, создании, эксплуатации, обслуживании технических устройств, задействованных в промышленном производстве. Дается характеристика методов системного анализа, предложены пути решения прикладных задач обеспечения безопасности на производстве с использованием предпочтительных методов анализа.

Ключевые слова: системный анализ, эргатическая система, производственная безопасность, опасный производственный фактор, вредный производственный фактор.

DOI: 10.46573/2658-5030-2020-4-77-84

ВВЕДЕНИЕ

Производственная система, включающая в себя какой-либо технологический процесс, технические устройства, машины, оборудование, одним из элементов которых является человек или группы людей, осуществляющих свою деятельность, называется эргатической системой.

Термин «эргатическая система» впервые был принят в 1960 году на Первом конгрессе Международной федерации по автоматическому управлению с целью обозначения систем, включающих человека, который функционирует в совокупности с комплексом технических средств. Позднее содержание данного понятия расширилось. Под эргатической системой понимают любую работающую с участием человека систему, которая включает оператора (группу операторов), используемые им технические устройства и производственную среду на рабочем месте. Эргатическая система является безопасной, если обеспечена ее защищенность от повреждений, аварий и катастроф, приводящих к нарушениям здоровья и гибели людей, а также ущербу для окружающей среды.

Обеспечение безопасности эргатических систем – приоритетная социально значимая задача для всех видов производственной деятельности и для всех специалистов, участвующих в проектировании, производстве, эксплуатации и обслуживании технических устройств, задействованных в промышленном производстве.

Результатом системных исследований безопасности эргатических систем является, как правило, обоснованный выбор вполне определенного плана действий по созданию и эксплуатации технической системы, отвечающей установленным требованиям безопасности. При этом необходимо обеспечить безопасные условия труда, т.е. исключить воздействие на работающих опасных производственных факторов, а воздействие вредных производственных факторов не должны превышать предельных допустимых значений.

Под опасными здесь понимаются такие производственные факторы, воздействие которых на работающих приводит к травме, острому отравлению либо другому внезапному резкому ухудшению здоровья или смерти. Воздействие на работника вредного фактора может привести к заболеванию, снижению работоспособности, отрицательному влиянию на здоровье потомства.

В зависимости от количественной характеристики (например, уровня излучения, звукового давления, концентрации вещества и других показателей вредности) и продолжительности воздействия вредный производственный фактор может стать опасным, в результате чего может возникнуть профессиональное заболевание.

Для решения задач по созданию безопасных условий труда, обеспечению или повышению уровня безопасности производственных объектов приходится учитывать достаточно большое количество взаимосвязанных элементов, факторов, условий, ограничений, образующих сложную структуру, без системного анализа которой невозможно достичь требуемого результата.

Системный анализ как научный метод познания представляет собой последовательность действий по установлению структурных связей между элементами исследуемых сложных систем, в том числе таких, которые обеспечивают требуемый уровень безопасности технических устройств, технологических процессов, а также безопасность персонала при их эксплуатации. Системный анализ включает в себя совокупность методологических средств, используемых для подготовки и обоснования решений по сложным проблемам, в данном случае по обеспечению производственной безопасности, т.е. состояния, при котором отсутствует недопустимый риск, связанный с причинением вреда жизни или здоровью персонала и окружающей среде.

Системный анализ опирается на комплекс общенаучных, экспериментальных, естественнонаучных, статистических, математических методов. Под системой понимается совокупность элементов и связей между ними [1].

Метод системного анализа заключается в целостном восприятии объекта исследования, его элементов и во всестороннем анализе связей между отдельными элементами в рамках всеобъемлющего целого. Принцип системности предполагает рассмотрение компонентов системы в их взаимосвязи, т.е. в виде целостного набора, или комплекса. Например, возгорание (пожар) как системное явление возможно при наличии как минимум такой совокупности компонентов, как горючее вещество, окислитель и источник воспламенения. Исключение хотя бы одного из названных компонентов разрушает систему. Техногенная авария в виде разлива вредного вещества возможна при наличии таких компонентов, как вредное (опасное) вещество, емкость (объект, устройство для хранения вещества), источник опасного воздействия на вещество и (или) на емкость.

Любая реальная производственная система, любой технологический процесс могут быть представлены в виде некоего образа, называемого *моделью системы*. Под

моделями понимают отображения всех характеристик, параметров систем, выполненные таким образом, чтобы они показывали их взаимосвязь. Моделирование неизбежно сопровождается некоторым упрощением и формализацией взаимосвязей в системе. Формализация может быть осуществлена в виде логических, причинно-следственных и/или математических (функциональных) отношений. При этом под *компонентами* (элементами, составными частями) системы понимаются не только материальные объекты, но и связи между ними.

ЦЕЛИ И МЕТОДЫ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Цель системного анализа производственной безопасности заключается в том, чтобы на его основе можно было выявить причины нежелательных событий, таких как возникновение аварийных ситуаций, воздействие на человека опасных и вредных производственных факторов. На основании анализа и сделанных выводов разрабатываются системы, способы, устройства защиты, предупредительные, организационные и иные мероприятия. Они предназначены для исключения, снижения вероятности появления или уменьшения до допустимых уровней воздействия вредного и/или опасного производственного фактора.

Применительно к обеспечению производственной безопасности можно использовать различные методы системного анализа. К числу методик *индуктивного* анализа относятся анализ надежности технических систем, анализ отказов и их последствий, анализ человеческого фактора при рассмотрении операций, ошибок и др.

При *дедуктивном* анализе используется метод так называемого *дерева отказов*. В этом случае причины и опасности образуют иерархические, цепные структуры или системы. Графическое изображение таких зависимостей напоминает ветвящееся дерево [2]. Построение деревьев отказов наиболее предпочтительно при выявлении причин таких нежелательных событий, как производственные аварии, пожары, дорожно-транспортные происшествия, разливы или выбросы вредных веществ и др. Для проведения дедуктивного анализа можно использовать, например, «Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов» РД 03-418-012 как нормативный документ Ростехнадзора, который не содержит правовых норм и носит нормативно-технический характер.

Симплекс-метод (как разновидность системного анализа сложных систем) представляет собой итеративный процесс направленного решения системы уравнений по шагам, который начинается с опорного решения и в поисках лучшего варианта движется по угловым точкам области допустимого решения, улучшающих значение целевой функции до тех пор, пока она не достигнет оптимального значения [3]. Техническая реализация симплексного метода связана с решением систем линейных уравнений, для чего используется метод Гаусса, разработаны табличные формы и правила преобразования симплексных таблиц.

При системном анализе сложных систем, каковыми являются многие задачи повышения уровня производственной безопасности, имеются трудности в создании достоверных моделей их функционирования. При этом в ряде случаев невозможно провести надежное теоретическое обоснование систем линейных уравнений и неравенств, из-за чего применение симплекс-метода вызывает определенные сложности.

В таких случаях используется метод *экспертных оценок*. В качестве экспертов выступают специалисты в конкретных областях знаний, которые могут указать более предпочтительные варианты решений. Для обеспечения объективности оценки существуют различные способы получения экспертной информации, например парные и множественные сравнения, ранжирование, классификация. Экспертам предъявляется один или несколько компонентов системы, и они должны указать предпочтительные из этих элементов. При их ранжировании множество объектов следует упорядочить по предпочтениям. Эксперт может дать количественную оценку предпочтения. Анализ и обработку экспертной информации можно проводить с помощью математических методов.

Все перечисленные выше методы системного анализа могут применяться независимо друг от друга, но в ряде случаев наибольший эффект достигается их сочетанием. Их можно использовать на стадиях проектирования машин, оборудования, технологических процессов и производств, в процессе эксплуатации с целью повышения уровня безопасности в соответствии с меняющимися условиями и нормативно-правовыми требованиями, при модернизации производства как для всего предприятия, так и для отдельных технологических процессов и технических устройств.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим элементы системного анализа применительно к задаче снижения уровня звукового давления на сварщика в цехе сварки объемных металлических конструкций, предназначенных для строительно-дорожной техники. Под системой здесь понимается совокупность элементов и связей между ними, которые перечислены ниже.

Шум является вредным общебиологическим фактором, так как действует на весь организм человека через его нервную систему. Проявление вредного воздействия шума на организм человека весьма разнообразно.

Объективное действие шума выражается в виде ослабления внимания, повышения кровяного давления, снижения остроты слуха, учащенного дыхания и пульса, снижения работоспособности, нарушения координации движения. Субъективное действие шума проявляется в виде головокружения, головной боли, бессонницы, общей слабости. Изменения, возникающие под действием шума в организме человека, классифицируют как шумовые болезни. Длительное воздействие производственного шума на работника приводит к резкой потере слуха, тугоухости или к глухоте. Сопутствующие этому утомление, ослабление внимания, памяти являются причиной возникновения травмоопасной обстановки на рабочем месте.

При решении задачи борьбы с шумом на рабочем месте сварщика элементами системы как совокупности элементов и их связей являются:

1) *нормативно-правовая документация*, регламентирующая допустимые уровни звукового давления на рабочем месте сварщика:

предельные уровни шума (для постоянных шумов);

уровни звука в децибелах, которые используются для ориентировочной оценки постоянного и непостоянного шума без учета частотных характеристик;

2) *источники звукового давления*, воздействующие на сварщика:

электрод сварочного аппарата;

отражательные поверхности конструкций цеха, участка;

- отражательные поверхности звукоизолирующих перегородок;
резонирующая поверхность обрабатываемой металлической конструкции;
- 3) *количественные характеристики шума, звукового давления:*
спектральные характеристики шума;
уровень шума;
- 4) *защищаемый объект* – сварщик ручной сварки;
- 5) *способы и средства достижения результатов:*
- а) способы защиты:
шумопоглощение;
шумоизоляция;
- б) устройства защиты:
специальные шумопоглощающие экраны;
шумопоглощающие покрытия пола, стен, потолка, перегородок, поверхностей свариваемой конструкции;
шумоизолирующие экраны;
средства индивидуальной защиты сварщика (наушники, звукопоглощающий шлем, спецодежда);
- в) замена, модернизация сварочного оборудования:
отказ от сварки, замена технологии сварки другим видом технологии соединения деталей;
подбор режима сварки для снижения уровня звукового давления, издаваемого сварочной дугой;
установка шумопоглощающего наконечника на электрод;
- г) организационные мероприятия – сокращение длительности воздействия звукового давления на организм работающего (перерывы в работе, сокращенный рабочий день);
- б) *оценка эргономичности* принимаемых технических решений;
- 7) *оценка экологической безопасности* принимаемых вариантов решений задачи;
- 8) *оценка экономической эффективности* принимаемых вариантов решения задачи;
- 9) *оценка достаточности принимаемых мер* и адекватности получаемых результатов.

Нормативными документами, устанавливающими допустимые (предельные) уровни воздействия на защищаемый объект, являются государственные и межгосударственные стандарты, технические регламенты, нормы и правила. Они регламентируют количественную оценку опасных и вредных производственных факторов.

Например, санитарные нормы и правила (СанПиН) устанавливают предельно допустимые уровни звукового давления, уровни звука и эквивалентные уровни звука для основных, наиболее типичных видов трудовой деятельности.

Количественные характеристики опасного производственного фактора характеризуются, как правило, размером материального ущерба при реализации опасности, числом пострадавших, трудовыми потерями. Количественную оценку вредного производственного фактора оценивают по таким показателям, как уровень воздействия (предельно допустимые концентрации, предельно допустимые уровни и др.). Вредный

производственный фактор оценивают также по экономическим затратам на снижение или полное устранение его влияния (например, это затраты на приобретение средств пылегазоочистки, обезвреживания, обеззараживания и их эксплуатацию, на средства индивидуальной и коллективной защиты, затраты на профилактику профессиональных заболеваний).

В случае системного анализа сложной системы, какой является задача совершенствования защиты от шума на рабочем месте сварщика, имеются, как отмечалось выше, трудности в создании достоверной модели ее функционирования, когда невозможно провести надежное теоретическое обоснование зависимостей и граничных условий. В этом случае целесообразно применять метод *экспертных оценок* принятия решений.

Информация о потенциальных возможностях снижения уровня звукового воздействия накапливается в процессе эксплуатации подобных систем, устройств, при поиске способов и средств шумопоглощения, шумоизоляции, других приемов и средств. При этом оцениваются и выявляются наиболее эффективные из них в различных аспектах – технологических, экологических, экономических, эргономических, анализируется, обосновывается и осуществляется выбор возможных решений на основе разработанных целевых показателей с учетом ресурсов, результатов оценки рисков и согласования с заинтересованными сторонами.

Практика показывает, что, например, на машиностроительных предприятиях, где ведется металлообработка, большинство материалов, из которых изготовлены объекты шумоизоляции, поглощают менее 2 % падающей на их поверхность звуковой энергии, отражая 98 % обратно в помещение. Средства индивидуальной защиты позволяют снизить уровень шума не более чем на 10...45 дБ, причем наиболее значительное глушение шума наблюдается в области высоких частот. При низких частотах такие средства неэффективны. Ушные вкладыши обеспечивают снижение шума в высокочастотных октавных полосах на 5...30 дБ. Отраженный звук увеличивает уровень шума на рабочем месте на 5...15 дБ в зависимости от свойств поверхности, отражающей звук, расстояния от него, частотных характеристик. С помощью звукопоглощающих облицовок и конструкций можно обеспечить снижение шума в помещении на 8...10 дБ. Существует и ряд других целевых показателей, характеризующих выбор и обоснование решения задачи [4].

Применение *метода экспертных оценок* для решения задачи по снижению уровня звукового давления необходимо прежде всего потому, что в процессе принятия решений приходится осуществлять выбор в ситуациях неопределенности, которая обусловлена наличием факторов, не поддающихся строгой количественной оценке. В этом случае все процедуры и методы направлены именно на поиск альтернативных вариантов решения проблемы, выявление масштабов неопределенности по каждому из них и сопоставление вариантов по тем или иным критериям эффективности.

Привлекаемые для этого эксперты подготавливают или рекомендуют существующие варианты решения, руководствуясь сформулированными и представленными выше элементами системы, совокупностью элементов и их связей. При этом количественные показатели, параметры отдельных элементов, входящих в систему, их граничные условия принимаются на основе экспериментальных или лабораторных исследований процесса либо используются уже известные показатели

аналогичных систем шумопоглощения, шумоизоляции, средств индивидуальной и коллективной защиты. Принятие окончательных вариантов решения поставленной задачи относится к компетенции соответствующего эксперта, должностного лица или нескольких ответственных лиц.

При выборе окончательных вариантов можно использовать *морфологический анализ* [5]. В его основе лежит упорядочение процесса выдвижения и рассмотрения различных вариантов решения задачи. Суть метода состоит в том, что в системе выделяют несколько существенных (структурных или функциональных) признаков. Каждый из них может характеризовать какой-либо параметр или свойство системы, от которых зависит решение проблемы. По каждому выделенному признаку составляют список его различных вариантов-альтернатив. Признаки с альтернативами располагают в таблицу – «морфологический ящик». Перебирая всевозможные сочетания этих альтернатив, можно выявить наиболее предпочтительные или новые варианты решения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При решении задач обеспечения или повышения уровня производственной безопасности в эргатических системах при эксплуатации машин, оборудования приходится учитывать большое число элементов, факторов, условий, ограничений, составляющих достаточно сложную систему. Применение методов системного анализа позволяет наиболее полно и объективно оценить совокупность элементов и связей между ними. Предложено использование методов системного анализа в случаях аварийных ситуаций. На примере решения прикладной задачи по снижению уровня звукового воздействия на персонал в сварочном производстве указана совокупность элементов, которые необходимо учитывать. Обосновано применение различных методов системного анализа, в том числе метода экспертных оценок с применением морфологического метода, что позволяет наиболее объективно и полно оценить опасные и вредные производственные факторы, влияющие на уровень производственной безопасности в эргатических системах, и разработать мероприятия по снижению уровня их воздействия на персонал.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белов П.Г. Системный анализ и моделирование опасных процессов в техно-сфере. М.: Академия, 2003. 512 с.
2. Пузырев Н.М., Любимова Н.С. Производственная безопасность: учебное пособие. Ч. 1. Тверь: ТГТУ, 2008. 218 с.
3. Таха Х.А. Введение в исследование операций. М.: Вильямс, 2005. 912 с.
4. Юдин Е.Я., Борисов Л.А., Горенштейн И.В. Борьба с шумом на производстве: справочник / под ред. Е.Я. Юдина. М.: Машиностроение, 1985. 400 с.
5. Мухин В.И. Исследование систем управления: учебник. М.: Экзамен, 2003. 384 с.

Для цитирования: Пузырев Н.М., Мартынов Д.В., Барбашинова Н.Б. Системный анализ при решении задач производственной безопасности в эргатических системах // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2020. № 4 (8). С. 77–84.

SYSTEM ANALYSIS IN SOLVING THE PROBLEMS OF PRODUCTION SAFETY IN ERGATIC SYSTEMS

N.M. PUZYREV, Cand. Sc., D.V. MARTYNOV, Cand. Sc.,
N.B. BARBASHINOVA, Lecturer

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb.,
170026, Tver, Russian Federation, e-mail: puzyrevfdpo@rambler.ru

Creating safe working conditions in ergatic systems is possible only when taking into account a large number of elements, factors, conditions, restrictions that make up a complex interconnected system, without analysis of which it is impossible to achieve the desired result in solving problems of ensuring or increasing the required level of industrial safety during design, creation, operation, maintenance of technical devices involved in industrial production. The characteristic of system analysis methods is given, ways of solving applied problems of ensuring safety at work using the preferred methods of analysis are proposed.

Keywords: system analysis, ergatic system, industrial safety, hazardous production factor, harmful production factor.

REFERENCES

1. Belov P.G. Sistemnyy analiz i modelirovaniye opasnykh protsessov v tekhnosfere [System analysis and modeling of hazardous processes in the technosphere]. Moscow: Akademiya, 2003. 512 p.
2. Puzyrev N.M., Lyubimova N.S. Proizvodstvennaya bezopasnost': uchebnoye posobiye. Ch. 1. [Industrial Safety: a textbook. Part 1]. Tver: TvGTU, 2008. 218 p.
3. Taha H.A. Vvedeniye v issledovaniye operatsiy. [Introduction to operations research]. Moscow: Vilyams, 2005. 912 p.
4. Yudin E.Ya., Borisov L.A., Gorenstein I.V. Borba s shumom na proizvodstve: spravochnik [The fight against noise in production: a guide] / ed. E.Ya. Yudin. Moscow: Mashinostroyeniye, 1985. 400 p.
5. Mukhin V.I. Issledovaniye sistem upravleniya: uchebnik. [The study of control systems: a textbook]. Moscow: Ekzamen, 2003. 384 p.

Поступила в редакцию/received: 26.06.2020; после рецензирования/revised: 16.10.2020;
принята/accepted 15.11.2020

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ УГРОЗ БЕЗОПАСНОСТИ ИНФОРМАЦИИ В АСУ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

С.Г. КРАСНОВ, адъюнкт

Военная академия воздушно-космической обороны
имени Маршала Советского Союза Г.К. Жукова,
170003, Тверь, ул. Жигарева, д. 50, e-mail: garvel568@yandex.ru

© Краснов С.Г., 2020

Рассматривается классификация угроз безопасности информации. Приведены наиболее вероятные угрозы, которые могут быть применены противником к автоматизированным системам управления военного назначения, а также рассмотрены возможные последствия.

Ключевые слова: информационная безопасность, угрозы безопасности информации, АСУ военного назначения, защита информации, несанкционированный доступ, несанкционированные воздействия, компьютерные атаки.

DOI: 10.46573/2658-5030-2020-4-85-96

ВВЕДЕНИЕ

Непрерывное совершенствование информационных технологий, повышение их роли и значимости, расширение сферы применения автоматизированных систем управления военного и специального назначения (АСУ ВиСН) в процессе управления государством и его Вооруженными силами требуют постоянного внимания к вопросам обеспечения их информационной безопасности.

Обеспечение информационной безопасности АСУ представляет собой комплексную проблему, которая решается в рамках нормативного и правового регулирования применения АСУ, совершенствования методов и средств их разработки, развития системы оценки соответствия требованиям информационной безопасности, обеспечения соответствующих организационно-технических условий безопасности эксплуатации, включая управление системой обеспечения безопасности обрабатываемой информации.

В настоящее время в мире (в том числе в России) разработано множество стандартов, рекомендаций и других нормативных документов, содержащих как методологии управления рисками, так и основные подходы к этому процессу. В соответствии с этими стандартами основой для проведения анализа рисков информационной безопасности и важнейшей стороной определения требований к системе защиты является формирование модели потенциального нарушителя, а также идентификация, анализ и классификация угроз с последующей оценкой степени вероятности их реализации.

Вместе с тем в настоящее время активно развивается широкий спектр новых методов и технологий информационного воздействия как на отдельные элементы вычислительной техники (ВТ), так и на АСУ органов государственного и военного управления с целью получения несанкционированного доступа к информационным ресурсам и нарушения их функциональной устойчивости. Разрабатываются новые информационные технологии для проведения информационных атак на АСУ ВиСН,

постоянно совершенствуются существующие и появляются новые способы и средства проведения атак, а число компьютерных инцидентов ежегодно увеличивается.

Автоматизированная система управления военного и специального назначения рассматривается в качестве одного из приоритетных объектов комплексного деструктивного воздействия, направленного на достижение информационного превосходства и нарушение (затруднение) управления [1], поэтому решение проблемы обеспечения безопасности АС включает в себя определение, анализ и классификацию возможных угроз безопасности АС.

Целью работы является анализ угроз информационной безопасности, характерных для АСУ военного назначения, для определения требований к системе защиты информации и, как следствие, для подготовки и принятия обоснованных решений по защите информации в АСУ военного назначения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Одним из важнейших аспектов обеспечения информационной безопасности является анализ и классификация потенциальных угроз. Перечень актуальных угроз, оценка вероятности их реализации, а также составление модели и характеристика нарушителя служат основой для проведения анализа рисков и формулирования требований к каждой системе информационной безопасности.

Существует огромное количество определений понятия «угрозы безопасности информации», поэтому для исследования будем пользоваться определением, представленным в [2].

Перечень угроз безопасности информации содержит сотни позиций. Кроме выявления угроз, целесообразно проведение анализа этих угроз путем их классификации по ряду признаков, каждый из которых отражает одно из обобщенных требований к системе защиты. Угрозы, соответствующие каждому признаку классификации, позволяют детализировать отражаемое этим признаком требование. Общая классификация угроз представлена на рисунке [3].



Классификация угроз безопасности информации

Поскольку основным классификационным признаком угроз безопасности выступает их направленность, то в соответствии с этим выделяют угрозы нарушения конфиденциальности, целостности и доступности информации.

Угрозы нарушения доступности направлены на создание таких ситуаций, когда действия злоумышленника либо снижают работоспособность информационной системы, либо блокируют доступ к некоторым ресурсам.

К угрозам нарушения доступности в современных образцах военной и специальной техники (ВСТ) относятся:

- повторение или замедление элементов протокола;
- подавление обмена в телекоммуникационных сетях;
- моделирование ложной тождественности узла вычислительной сети или связи для передачи данных;
- использование ошибок или недокументированных возможностей служб и протоколов передачи данных для инициирования отказа в обслуживании;
- перерасход вычислительных или телекоммуникационных ресурсов.

Угрозы нарушения целостности направлены на изменение или искажение информации, что приводит к нарушению ее качества или полному уничтожению.

К угрозам нарушения целостности информации относятся:

- несанкционированная модификация либо удаление программ или данных;
- вставка, изменение или удаление данных в элементах протокола в процессе обмена между абонентами вычислительной сети;
- потеря данных в результате сбоев, нарушения работоспособности элементов вычислительной сети или некомпетентных действий субъектов доступа.

Сертифицированные средства защиты удаленного доступа – межсетевые экраны – в настоящее время обеспечивают защиту на физическом, канальном, сетевом, транспортном уровнях. Противодействие информационным воздействиям противника функциями межсетевого экрана на сеансовом, представительном и прикладном уровнях не предусматривается, что представляет существенную опасность нарушения устойчивости функционирования АСУ военного назначения. В связи с этим при построении системы комплексной защиты информации необходимо предусматривать меры защиты сетевых программ и протоколов передачи данных на всех уровнях модели ISO/OSI согласно стандарту ISO/IEC 17799 [4].

Угрозы нарушения конфиденциальности направлены на разглашение конфиденциальной информации. В случае реализации этих угроз информация становится доступной лицам, которые не должны иметь к ней доступа. С точки зрения компьютерной безопасности нарушение конфиденциальности имеет место всякий раз, когда получен несанкционированный доступ (НСД) к некоторой закрытой информации.

К угрозам нарушения конфиденциальности информации относятся:

- несанкционированное чтение или копирование информации, в том числе остаточной или технологической, на любом из этапов ее обработки;
- несанкционированный импорт или экспорт конфиденциальной информации;
- передача информации между элементами вычислительной сети, относящимся к разным классам защищенности [8].

При этом в качестве объекта угрозы рассматривается как оперативная информация, обрабатываемая в интересах конечных пользователей, так и технологическая, используемая для организации функционирования комплекса средств обработки информации и комплекса средств защиты информации.

Применительно к условиям информационного противоборства термин «защита информации от НСД» включает в себя все аспекты обеспечения безопасности информации:

- защиту от несанкционированного чтения или копирования (обеспечение конфиденциальности);
- защиту от несанкционированного изменения или удаления (обеспечение целостности);
- защиту от несанкционированного блокирования (обеспечение доступности).

Основной формой информационного воздействия нарушителя на ресурсы вычислительной сети являются компьютерные атаки (КА), представляющие собой упорядоченные во времени действия по преодолению системы защиты и нарушению безопасности информации, реализуемые посредством программ с потенциально опасными (деструктивными) функциями. К числу таких функций относятся:

- сокрытие признаков своего присутствия в программно-аппаратной или вычислительной сети;

- осуществление сбора данных о параметрах вычислительной сети и о системе ее защиты;

- самодублирование или перенос своих фрагментов в другие области оперативной или внешней памяти;

- ассоциирование с другими программами в вычислительном окружении;

- искажение или разрушение кода программ в оперативной памяти;

- сохранение фрагментов информации из оперативной памяти в некоторой области внешней памяти (локальной или удаленной);

- искажение, блокирование или подмена выводимого во внешнюю память или в каналы связи массива информации, образующейся при выполнении прикладных программ;

- подавление информационного обмена в телекоммуникационных сетях;

- искажение или фальсификация информации при обмене по каналам телекоммуникационных сетей;

- нейтрализация или нарушение работы тестовых программ и системы защиты [5].

В случае успеха КА реализуются одна или несколько угроз безопасности функционирования вычислительной сети, т.е. потенциально возможное событие, процесс или явление, которые посредством воздействия на информацию или другие компоненты вычислительной сети могут прямо или косвенно привести к нарушению безопасности информации.

В зависимости от расположения источника угрозы выделяют внутренние и внешние угрозы безопасности. Основным источником внутренних угроз являются квалифицированные специалисты в области разработки и эксплуатации программного обеспечения (ПО) и технических средств, знакомые со спецификой решаемых в АС задач, структурой, основными функциями и принципами работы программно-аппаратных средств защиты информации, имеющие возможность использования штатного оборудования и технических средств сети.

В зависимости от конкретных условий функционирования и особенностей вычислительной системы в качестве внутренних угроз могут выступать:

- авторизованные субъекты доступа – администратор вычислительной сети, администратор баз данных, администратор безопасности, пользователи, программисты, разработчики;

- вспомогательный технический и обслуживающий персонал – служба охраны, жизнеобеспечения и др.

Источники внешних угроз:

- деятельность международных террористических организаций [6];

- деятельность космических, воздушных, морских и наземных технических и иных средств разведки иностранных государств [6];

- хакеры или недобросовестные поставщики телекоммуникационных услуг [7];

- деятельность иностранных политических, экономических, военных, разведывательных и информационных структур, направленная против интересов страны в информационной сфере [6].

Все существующие на сегодняшний день угрозы безопасности информации АСУ можно разделить на естественные и искусственные. Естественные угрозы безопасности – это угрозы, вызванные физическим воздействием на АСУ и ее элементы стихийных природных явлений, не зависящих от человека. Более широк и опасен круг вызванных человеческой деятельностью искусственных угроз информации в АСУ, среди которых, исходя из мотивов, можно выделить непреднамеренные и преднамеренные. Источником первых могут быть ошибки в ПО, выход из строя аппаратных средств, неправильные действия пользователей или администратора сети и т.п. Преднамеренные угрозы, в отличие от непреднамеренных, преследуют цель нанесения ущерба пользователям (абонентам) сети и в свою очередь подразделяются на активные и пассивные. Пассивные угрозы, как правило, направлены на несанкционированное использование информационных ресурсов и не оказывают при этом влияния на функционирование АСУ. Пассивной угрозой может являться, например, попытка получения информации, циркулирующей в каналах передачи данных, посредством прослушивания последних. Активные угрозы имеют цель нарушения нормального воздействия на ее аппаратные, программные и информационные ресурсы. Так, применительно к современным АСУ военного назначения информационное противоборство представляет собой особую форму конфликта с активным воздействием противника и пассивным поведением системы защиты АСУ. В подобных условиях обеспечения безопасности функционирования АСУ предполагает защиту обрабатываемой в ней информации от НСД, а также защиту информации самой АСУ от несанкционированного воздействия (НСВ) со стороны противника, направленного на нарушение ее функционирования.

Защита информации от НСВ – это защита информации, направленная на предотвращение воздействий на защищаемую информацию с нарушением установленных прав и правил на изменение информации и НСД, приводящих к разрушению, уничтожению, искажению, сбою в работе, незаконному перехвату и копированию, блокированию доступа к информации, а также к утрате, уничтожению или сбою функционирования носителя информации [9].

В отдельный класс угроз следует выделить события, которые в зависимости от условий могут нарушить любую из составляющих безопасности информации:

проектирование архитектуры системы, технологии обработки данных, разработка прикладных программ с возможностями, представляющими опасность для работоспособности системы и безопасности информации;

несанкционированное включение в состав комплексов средств обработки информации и средств защиты информации новых элементов или изменение режимов их работы;

доступ к ресурсам вычислительной сети без использования штатных средств вычислительной техники (СВТ) либо выполнение программ или действий в обход системы защиты;

подбор, перехват или разглашение (компрометация) параметров аутентификации или ключей шифрования (дешифрования);

несанкционированный запуск программ;

использование нестойких параметров аутентификации или ключей шифрования либо их несвоевременная смена;

навязывание ранее переданного или ложного сообщения, отрицание факта его передачи или приема;

некомпетентное использование, настройка или администрирование комплексов средств обработки информации и средств защиты информации;

сбои и отказы в работе комплексов средств обработки информации и средств защиты информации.

Анализ угроз информационной безопасности функционирования образцов вооружения, ВСТ в условиях информационной войны [10] позволяет сделать вывод, что в зависимости от текущего уровня защищенности информации от НСВ стратегии нарушителя по преодолению системы защиты будут изменяться.

Реализация противником (нарушителем) вышеперечисленных угроз (даже частичная) может привести к нарушению (снижению эффективности) функционирования соединения ПВО и нанести ущерб, который может быть сопоставим с ущербом от применения возможным противником современных ударных средств поражения и даже превосходить его. Их действие направлено практически против всех структурных компонентов современных систем управления, а их источники могут располагаться как в самой АСУ, так и вне ее, в том числе быть удаленными на значительное расстояние.

В качестве уязвимых мест для НСД к информации, циркулирующей в АСУ военного назначения, и реализации угроз могут выступать:

свободные порты в коммуникационном оборудовании;

сетевые интерфейсы;

незащищенные стеки протоколов передачи данных;

ошибочно реализованные функции общего и специального программного обеспечения и другие нарушения.

Для формирования перечня угроз безопасности используем Банк данных угроз безопасности информации (далее – Банк данных угроз), созданный ФСТЭК России. В настоящее время АСУ военного назначения используют различные системы, преимущественно импортного производства, поэтому содержимое Банка данных угроз позволяет определить наиболее специфичные для данных АСУ угрозы. Данная информация позволяет при оценке рисков информационной безопасности учитывать тот факт, что каждая конкретная угроза воздействует на определенные типы объектов АСУ. Перечень таких угроз представлен в табл. 1.

Таблица 1. Угрозы безопасности информации

Угроза	Описание	Источник	Объект воздействия
1	2	3	4
Угроза изменения компонентов информационной (автоматизированной) системы	Заключается в возможности получения нарушителем доступа к сети, файлам путем несанкционированного изменения состава программных или аппаратных средств системы, что в дальнейшем позволит осуществлять несанкционированные действия. Реализация данной угрозы возможна при условии успешного получения нарушителем необходимых полномочий в системе	Внутренний нарушитель с низким потенциалом	Информационная система. Автоматизированное рабочее место

1	2	3	4
Угроза использования информации идентификации/аутентификации, заданной по умолчанию	Заключается в возможности прохождения нарушителем процедуры авторизации на основе идентификационной и аутентификационной информации, соответствующей учетной записи «по умолчанию». Реализация возможна при наличии у нарушителя сведений о производителе/модели объекта защиты и об идентификационной и аутентификационной информации	Внешний нарушитель с низким потенциалом; внешний нарушитель со средним потенциалом	Средства защиты информации, системное ПО, программно-аппаратные средства со встроенными функциями защиты
Угроза использования слабостей протоколов сетевого/локального обмена данными	Заключается в возможности осуществления нарушителем несанкционированного доступа к передаваемой в системе защиты информации за счет деструктивного воздействия на протоколы сетевого/локального обмена данными путем нарушения правил использования таких протоколов. Реализация возможна в случае наличия слабостей в протоколах сетевого/локального обмена данными	Внутренний нарушитель с низким потенциалом; внешний нарушитель с низким потенциалом	Системное ПО, сетевой трафик, сетевое ПО
Угроза несанкционированного создания учетной записи пользователя	Заключается в возможности создания дополнительной учетной записи пользователя в собственных неправомерных целях. Реализация возможна при наличии прав на запуск специализированных программ для редактирования файлов, содержащих сведения о пользователях	Внутренний нарушитель с низким потенциалом; внешний нарушитель с низким потенциалом	Системное ПО
Угроза обхода некорректно настроенных механизмов аутентификации	Заключается в возможности получения нарушителем привилегий в системе без прохождения процедуры аутентификации. Реализация возможна при условии наличия ошибок в заданных значениях параметров настройки механизмов аутентификации	Внутренний нарушитель с низким потенциалом; внешний нарушитель с низким потенциалом	Системное ПО, сетевое ПО
Угроза подмены действий пользователя путем обмана	Заключается в возможности выполнения нарушителем неправомерных действий в системе от имени другого пользователя с помощью методов социальной инженерии. Реализация возможна при наличии у дискредитируемого пользователя нужных прав	Внешний нарушитель со средним потенциалом	Прикладное ПО; сетевое ПО

1	2	3	4
Угроза удаления аутентификационной информации	Заключается в возможности отказа легитимным пользователям в доступе к информационным ресурсам	Внутренний нарушитель с низким потенциалом; внешний нарушитель с низким потенциалом	Системное ПО, учетные данные пользователя
Угроза обхода многофакторной аутентификации	Заключается в возможности обхода многофакторной аутентификации путем внедрения вредоносного кода в систему и компоненты, участвующие в процедуре многофакторной аутентификации	Внешний нарушитель с высоким потенциалом	Системное ПО, учетные данные пользователя

Полученный перечень угроз не является окончательным и в дальнейшем будет уточняться и дополняться (за счет использования всевозможных сочетаний базовых атрибутов угроз, которые будут определять возможную угрозу безопасности) при построении модели угроз.

Помимо определения перечня угроз, необходимо знать, какие последствия повлечет за собой их реализация. В Банке данных угроз в качестве последствий от реализации угроз рассматривается нарушение тех или иных свойств безопасности информации (конфиденциальности, доступности, целостности). Применительно к АСУ военного назначения наиболее критичными являются нарушения, влекущие за собой негативные последствия для функционирования системы управления в целом. Для того чтобы определить возможные последствия каждой угрозы, следует опираться на информацию о функциональном назначении объекта воздействия угрозы или подсистемы, в которую он входит. Это важно, так как последствия от одной и той же угрозы, реализованной в отношении разных компонентов системы управления, могут различаться в зависимости от критичности выполняемых функций каждого компонента.

Возможные последствия нарушения функционирования АСУ военного назначения в результате реализации угроз информационной безопасности представлены в табл. 2.

Таблица 2. Возможные последствия нарушения функционирования АСУ

Объект воздействия	Последствия
1	2
Пункты управления	Нарушение выполнения (снижение качества выполнения) планов работ по объектам управления. <i>Способы воздействия:</i> программно-аппаратные воздействия на средства локальных вычислительных сетей (ЛВС), разрабатываемые по технологии «Intranet» и IP телефонии; ввод ложных данных; сбор некачественной (ложной) информации; несанкционированные подключения внешних абонентов к серверам баз данных; воздействия компьютерных вирусов; проявление НДВ и НСВ

1	2
Объекты управления	Комплексное нарушение процессов управления и штатное функционирование АСУ, потеря актуальной управляющей информации. <i>Способы воздействия:</i> программно-аппаратные воздействия ЛВС, искажение данных, несанкционированные подключения внешних абонентов к пунктам управления, разрыв соединения между абонентами, воздействия компьютерных вирусов
Потребители информации	Не выполняются целевые задачи информационного обеспечения и вследствие этого снижение эффективности управления. <i>Способы воздействия:</i> косвенные воздействия на АСУ. В случае несанкционированного подключения к средствам обработки информации создаются дополнительные предпосылки для реализации КА, воздействия компьютерных вирусов, проявления НДВ и НСВ
Территориально-распределенные вычислительные сети, ЛВС	Нарушение информационно-логического взаимодействия абонентов, функций мониторинга сети, электронной почты и протоколов передачи данных. <i>Способы воздействия:</i> искажение, блокирование, уничтожение пакетов данных, нарушение адресации и порядка администрирования сети, настройка ложной маршрутизации пакетов данных при недостаточной защите удаленного доступа межсетевыми экранами; отсутствие средств предупреждения и обнаружения КА, возможностей НСВ на информацию и проявления НДВ, проникновения компьютерных вирусов
Сетевые операционные системы	Нарушение информационно-вычислительного процесса в КТС АСУ и прав доступа к информационным ресурсам операционной системы (ОС). <i>Способы воздействия:</i> программно-аппаратные воздействия на системные файлы и регистры ОС; несанкционированные перезапуски «зависание» ОС, взлом программ разграничения доступа операторов к информации при недостаточно эффективной работе встроенных средств защиты от НСВ и администрирования ОС, программного межсетевого экрана, антивирусных средств, проявления НДВ (датчика ОС – при установке средств противодействия информационным угрозам)
Система управления базами данных (СУБД) и базы данных (БД)	Нарушение целостности и доступности данных в результате искажения информационных таблиц и правил доступа к информационным ресурсам СУБД. <i>Способы воздействия:</i> ввод ложных данных, искажение алгоритмов обработки транзакций, нарушение структуры интерфейсов и целостности БД, создание условий для противоречивости предоставляемых данных вследствие воздействия атак, НСВ на информацию, наличие уязвимых мест в средствах защиты СУБД, БД и НДВ в ее программах при отсутствии средств противодействия КА в серверах сбора информации

1	2
Специальное программное обеспечение (СПО), комплексы расчетных программ	Нарушение точности и достоверности данных, необходимых для выполнения арифметическо-логических операций в КТС и прав доступа к СПО; невыполнение (несвоевременное выполнение) требуемого объема вычислительных операций. <i>Способы воздействия:</i> ввод ложных данных, блокирование, остановка выполнения программ, искажение входных данных и результатов расчета, инициализация ложных событий реконфигурации КВИС при наличии в ПО ошибок и НДВ

При анализе возможных последствий необходимо учитывать, что некоторые угрозы не приводят к каким-либо последствиям, но они могут повлечь реализацию других угроз, которые уже напрямую влияют на работоспособность системы в целом и выполнение поставленной задачи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ угроз информационной безопасности показывает, что потенциальные угрозы информации в современных АСУ военного назначения отличаются многообразием и сложностью структуры. Их действие направлено практически против всех структурных компонентов современных систем управления, а их источники могут располагаться как в самой АСУ, так и вне ее, в том числе на значительном расстоянии.

Для определения ущерба информации должны быть разработаны соответствующие методы и модели, учитывающие степень опасности всех угроз в их совокупности при существующих технологиях построения и функционирования АСУ военного назначения. Постоянное совершенствование существующих и появление новых угроз информационной безопасности приводит к невозможности рассмотрения каждой угрозы в отдельности, поэтому необходима их классификация. Оценка степени опасности угроз может быть выполнена на основе разработки моделей возможных действий нарушителя по их реализации.

Таким образом, в условиях реализации противником информационных угроз существует реальная опасность нарушения функционирования элементов АСУ. Это может привести к невыполнению возложенных на данную автоматизированную систему задач и, как следствие, к потере управления подчиненными силами и средствами, что в конечном счете может негативно повлиять на эффективность выполнения боевой задачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бородакий Ю.В., Добродеев А.Ю., Нащекин П.А., Бутусов И.В. О подходах к реализации централизованной системы управления информационной безопасностью АСУ военного и специального назначения // *Вопросы кибербезопасности*. 2014. № 2 (3). С. 2–9.
2. ГОСТ Р 53114-2008. Защита информации. Обеспечение информационной безопасности в организации. Основные термины и определения. М.: Стандартинформ, 2009. 16 с.

3. Галатенко В.А. Основы информационной безопасности: курс лекций, учебное пособие / под ред. В.Б. Бетелина. М.: Интернет-университет информационных технологий, 2006. 208 с.
4. ISO/IEC 17799:2005 Information technology – Security techniques – Code of practice for information security management. Berlin: Deutsches Institut für Normung, 2005. 129 p.
5. Барнс К., Боутс Т., Ллойд Д. [и др.]. Защита от хакеров беспроводных сетей / пер. с англ. А.В. Семенова. М.: Компания АйТи, ДМК Пресс, 2005. 476 с.
6. Доктрина информационной безопасности Российской Федерации: Указ Президента Российской Федерации от 9 сентября 2000 г. № 1895. URL: <https://base.garant.ru/182535/> (дата обращения: 29.08.2020).
7. Ахмад Д.М., Дубравский И., Флинн Х. [и др.]. Защита от хакеров корпоративных сетей. М.: Компания АйТи, ДМК Пресс, 2005. 864 с.
8. Митюшов Д.Г., Перепелица С.В. Анализ современных средств и методов защиты информационных ресурсов АСУ ВКО от НСВ // Научно-методический сборник № 41. Тверь: ВА ВКО, 2011.
9. ГОСТ Р 50922-96. Защита информации. Основные термины и определения. М.: Госстандарт России, 1996. 8 с.
10. Мельников В.В. Безопасность информации в автоматизированных системах. М.: Финансы и статистика, 2003. 368 с.

Для цитирования: Краснов С.Г. Анализ современных угроз безопасности информации в АСУ военного назначения // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2020. № 4 (8). С. 85–96.

ANALYSIS OF MODERN THREATS TO INFORMATION SECURITY IN A MILITARY AUTOMATED CONTROL SYSTEM

S.G. KRASNOV, Adjunct

Military Academy of Aerospace Defense named after Marshal of the Soviet Union
G.K. Zhukov, 50, Zhigareva st., 170003, Tver, Russian Federation,
e-mail: garvel568@yandex.ru

It is considered the classification of threats to information security, presents the most likely threats that can be applied by the enemy to automated control systems for military purposes, and the possible consequences that can occur in this case.

Keywords: information security, threats to information security, military automated control systems, information protection, unauthorized access, unauthorized impacts, computer attacks.

REFERENCES

1. Borodakiy Yu.V., Dobrodeev A.Yu., Nасhekin P.A., Butusov I.V. On approaches to the implementation of a centralized system of information security management ACS military and special purpose. *Voprosy kiberbezopasnosti*. 2014. № 2 (3), pp. 2–9. (In Russian).
2. GOST R 53114-2008. Information protection. Ensuring information security in the organization. Basic terms and definitions. Moscow: Standardinform, 2009. 16 p.

3. Galatenko V.A. Osnovy informatsionnoy bezopasnosti: kurs lektsiy, uchebnoye posobiye / pod red. V.B. Betelina. [Information security basics: a course of lectures, a textbook; ed. V.B. Betelina]. Moscow: Internet-universitet informatsionnykh tekhnologiy, 2006. 208 p.

4. ISO/IEC 17799:2005 Information technology – Security techniques – Code of practice for information security management, Berlin: Deutsches Institut für Normung. 2005. 129 p.

5. Barns K., Bouts T., Lloyd D. et al. Zashchita ot khakerov besprovodnykh setey / per. s angl. A.V. Semenova. [Protection against hackers of wireless networks. Per. from English. A.V. Semenov]. Moscow: Kompaniya AyTi, DMK Press, 2005. 476 p.

6. Doctrine of information security of the Russian Federation: Decree of the President of the Russian Federation dated September 09, 2000 No. 1895. URL: <https://base.garant.ru/182535/> (data accessed: 29.08.2020). (In Russian).

7. Akhmad D.M., Dubravskiy I., Flinn KH. [et al.]. Zashchita ot khakerov korporativnykh setey. [Protection from hackers of corporate networks]. Moscow: Kompaniya AyTi, DMK Press. 2005. 864 p.

8. Mityushov D.G., Perepelitsa S.V. Analysis of modern means and methods of protecting information resources of ACS VKO from NSV. *Nauchno-metodicheskiy sbornik № 41*. Tver: VA VKO. 2011. (In Russian).

9. GOST R 50922-96. The protection of information. Basic terms and definitions. Moscow: Gosstandart Rossii, 1996. 8 p.

10. Melnikov V.V. Bezopasnost informatsii v avtomatizirovannykh sistemakh. [Security of information in automated systems]. Moscow: Finansy i statistika, 2003. 368 p.

Поступила в редакцию/received: 02.07.2020; после рецензирования/ revised: 25.08.2020;
принята/accepted 17.09.2020

МОДЕЛЬ БЕЗОПАСНОСТИ С «ЧАСОВЫМ» МЕХАНИЗМОМ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ

Ю.В. ПОЛЯНСКАЯ¹, инженер, А.В. МОРОЗОВ², д-р. техн. наук,
С.Г. КРАСНОВ³, адъюнкт

¹ Войсковая часть 21555, 214006, Смоленск, ул. Фрунзе, д. 47,
e-mail: glafira007@rambler.ru

² Военный инновационный технополис «ЭРА», 353456, Краснодарский край,
Анапа, Пионерский пр., д. 28, e-mail: glafira2190@mail.ru

³ Военная академия воздушно-космической обороны
имени Маршала Советского Союза Г.К. Жукова,
170003, Тверь, ул. Жигарева, д. 50, e-mail: garvel568@yandex.ru

© Полянская Ю.В., Морозов А.В., Краснов С.Г., 2020

Основным направлением новой доктрины безопасности должна стать разработка эффективных моделей безопасности, адекватных современной степени развития программных и аппаратных средств, а также возможность гибкого управления безопасностью в зависимости от выдвигаемых требований, допустимого риска и расхода ресурсов. Задачей подсистемы контроля целостности ядра является обеспечение безопасности системы в процессе ее функционирования и обнаружение некорректного вмешательства субъектов системы в ее работу. В основе подсистем контроля целостности системы лежат две основные составляющие: статическая и динамическая. Частота срабатывания подсистемы контроля целостности ядра определяет интервал времени T , в котором система будет находиться в состоянии «утечки информации» в случае нарушения целостности системы. Существует два подхода к определению данного интервала времени: первый подход, вследствие наличия в системе подсистемы контроля целостности ядра, обеспечивает минимизацию потерь производительности системы, второй обеспечивает более высокий уровень безопасности при возможных потерях производительности системы.

Ключевые слова: модель безопасности, подсистема контроля целостности ядра, статистическая подсистема, динамическая подсистема, период срабатывания подсистемы.

DOI: 10.46573/2658-5030-2020-4-97-102

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день можно констатировать существенный разрыв между теоретическими моделями безопасности и современной парадигмой информационных технологий. Это приводит к несоответствию между моделями безопасности и их воплощением в программные реализации и выявлению недостатков современной научной базы обеспечения безопасности.

Такое положение обусловлено отсутствием общей теории защиты информации, комплексных моделей вычислительных систем, которые описывают механизм действий злоумышленников и разрушают программные средства (РПС) в реальных системах, а также отсутствием систем, позволяющих эффективно моделировать стойкость к атакам со стороны злоумышленников и РПС. Кроме того, в сфере безопасности нет даже общепринятой терминологии. Теория и практика существуют в разных плоскостях.

В результате практически все системы защиты основаны на анализе результатов успешно состоявшейся атаки.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Несмотря на то что прогресс в области развития средств вычислительной техники, программного обеспечения и сетевых технологий служит стимулом к развитию средств обеспечения безопасности, требуется во многом пересмотреть существующую научную парадигму информационной безопасности. Основным положением нового взгляда на безопасность должна являться разработка эффективных моделей безопасности, адекватных современному уровню развития программных и аппаратных средств, а также обеспечение возможности гибкого управления безопасностью в зависимости от выдвигаемых требований, допустимого риска и расхода ресурсов.

В 1987 г. Дэвид Кларк и Дэвид Уилсон представили модель целостности, которая существенно отличалась от уровнеориентированных моделей безопасности Белла и Лападула, а также от модели Биба. Впервые в своих положениях они обратились к термину «часовая процедура».

«Часовым» называется любой механизм или процедура, разработанная для снижения воздействия нежелательных событий до того, как они произошли. Это значит, что «часовые» процедуры являются предупредительным средством в том смысле, что они устанавливаются до того, как происходят события, от которых они обеспечивают защиту [2].

Задачей подсистемы контроля целостности ядра является обеспечение безопасности системы во время ее функционирования и обнаружение некорректного вмешательства субъектов системы в ее работу. В основу подсистем контроля целостности системы положены две главные составляющие: статическая (*подсистема обеспечения целостности ядра системы*) и динамическая (*подсистема контроля целостности ядра системы*).

В основе статической составляющей подсистемы контроля целостности ядра лежит модель целостности информации (например, модель Биба). Ядро системы должно находиться на самом привилегированном уровне безопасности, и к нему должен быть запрещен доступ по записи со стороны всех менее привилегированных субъектов системы. Реализация подсистемы обеспечения целостности информации должна опираться на аппаратную поддержку вычислительной системы.

В общем случае задачей подсистемы контроля целостности системы является динамический анализ целостности ядра системы с целью обнаружения возможных вмешательств в работу ядра системы со стороны менее привилегированных ее субъектов.

Подсистема контроля целостности ядра безопасности системы характеризуется двумя параметрами: множеством объектов, целостность которых подлежит контролю, и частотой срабатывания подсистемы контроля целостности. Рассмотрим влияние данных параметров на безопасность и производительность системы.

Влияние множества контролируемых объектов системы на ее производительность можно выразить следующим образом. Допустим, в цикле T проверяется целостность M объектов. Для $\forall m_i \in M$ существует параметр t_i , определяющий время, затрачиваемое системой на проверку целостности объекта m_i . Параметр t_i определяет сложность алгоритма проверки целостности объекта m_i системы и выражается в количестве тактов, в течение которых процессор проверяет целостность объекта m_i . При увеличении значения данного параметра, с одной стороны, повышается

надежность контроля целостности объекта m_i , а с другой – возрастает время, затрачиваемое на контроль целостности системы, и, как следствие, падает ее производительность.

Тогда однократная проверка системой целостности объектов ядра займет время

$$T_1 = \sum_{i=0}^M t_i. \quad (1)$$

Частота срабатывания подсистемы контроля целостности ядра определяет время, в течение которого система будет находиться в состоянии «утечки информации» в случае нарушения целостности системы. Иными словами, если подсистема контроля целостности работает один раз за временной промежуток T , то при нарушении целостности ядра система будет находиться в состоянии утечки информации в течение временного промежутка $[0, T]$. К определению интервала времени T возможны два подхода.

Первый подход характерен минимизацией потери производительности системы благодаря наличию подсистемы контроля целостности ядра. При этом подсистема контроля целостности ядра срабатывает в том случае, если субъекты системы не используют процессорное время в течение промежутка времени T . При этом частота срабатывания подсистемы контроля целостности ядра нерегулярна, так как она имеет низкий приоритет по сравнению с остальными субъектами системы, но при этом не происходит потери производительности системы.

Второй подход обеспечивает более высокий уровень безопасности при возможных потерях производительности системы. В данной ситуации подсистема контроля целостности ядра имеет высокий приоритет и срабатывает независимо от условий функционирования системы один раз за период времени T . Нижней границей, определяющей значение T , является выражение, определяющее максимально возможное время, которое система может провести в состоянии утечки информации. Это время вычисляется исходя из вероятности преодоления подсистемы контроля целостности. Будем считать подсистему контроля целостности нарушенной в том случае, когда субъект нарушитель смог изменить алгоритм подсистемы контроля целостности. Для этого ему необходимо преодолеть подсистему обеспечения целостности. Таким образом, для стопроцентного детектирования появления канала утечки информации, возникающего вследствие нарушения целостности системы, необходимо, чтобы подсистема контроля целостности срабатывала за временной интервал, не превышающий минимальное время, необходимое для преодоления субъектом-нарушителем подсистемы обеспечения целостности и модификации подсистемы контроля целостности.

Для определения времени, необходимого для изменения алгоритма контроля целостности, необходимо для синтезированной системы контроля и обеспечения целостности построить граф, отражающий все возможные пути преодоления подсистемы обеспечения целостности и модификации подсистемы контроля целостности [1]. Пример данного графа приведен на рисунке. Узлами данного графа являются компоненты подсистемы обеспечения целостности, а конечной вершиной каждого пути на данном графе – подсистема контроля целостности. Характеристикой каждого узла графа служит время, необходимое для преодоления данного компонента подсистемы обеспечения целостности, а также вероятность преодоления данного компонента, в предположении, что предыдущий компонент данного пути преодолен. Для первого элемента каждого пути данная вероятность полагается равной единице.

Тогда нижнюю границу периода срабатывания подсистемы контроля целостности информации можно записать как

$$T_2 \leq \min(T_{p1}, T_{p2}, \dots, T_{pn}), \quad (2)$$

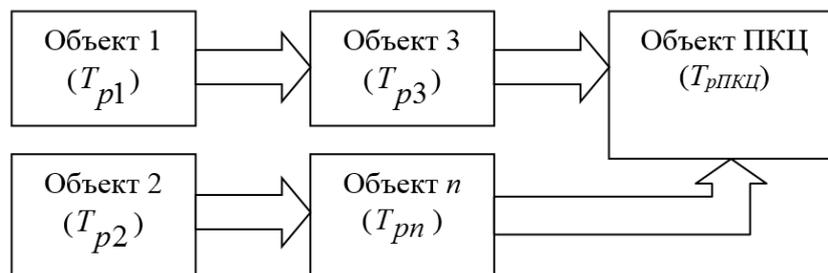
где T – время преодоления системы, соответствующее пути m на графе;

$$T_{pm} = \sum_i \frac{T_{pim}}{P_{i,i-1}}, \quad (3)$$

где T_{pim} – время преодоления подсистемы i , принадлежащей пути m ; $P_{i,i-1}$ – вероятность преодоления подсистемы i при условии преодоления подсистемы $i - 1$.

Для первого элемента в пути, ведущем к преодолению подсистемы контроля целостности, $P = 1$, т.е. предполагается, что данное звено в системе некорректно. При выполнении условия (2) преодолеть подсистему контроля целостности не удастся [3].

На рисунке показаны возможные пути нарушения подсистемы целостности информации (здесь ПКЦ – подсистема контроля целостности, а $T_{pПКЦ}$ – время разрушения подсистемы контроля целостности).



Пути нарушения подсистемы целостности информации

На данном рисунке показано два пути нарушения подсистемы контроля целостности. Для пути 1 суммарное время нарушения подсистемы контроля целостности $T_{нар1} = T_{p1} + T_{p3} + T_{pПКЦ}$. Для пути 2 суммарное время нарушения подсистемы контроля целостности $T_{нар2} = T_{p2} + T_{pn} + T_{pПКЦ}$. Таким образом, период функционирования подсистемы контроля целостности должен удовлетворять условию

$$T \leq \min(T_{нар1}, T_{нар2}).$$

Выражение (2) определяет нижнюю границу возможного значения периода функционирования подсистемы контроля целостности.

С целью повышения производительности системы должно выполняться условие $T \rightarrow \max$, т.е. чем реже выполняется контроль целостности ядра системы, тем меньше потеря производительности. Из данного выражения может быть вычислена верхняя граница T -периода срабатывания подсистемы контроля целостности информации:

$$T_4 \geq \sum_i^N \frac{t_i}{P-1}. \quad (4)$$

Таким образом, период срабатывания подсистемы контроля целостности для второго подхода может быть выбран исходя из выражений (2) и (4). Если значение периода срабатывания, полученное из выражения (2), больше, чем значение, полученное из (4), то удастся спроектировать систему с заданной потерей производительности и с гарантией контроля целостности. Если значение, полученное из выражения (2), меньше или равно значению, полученному из (4), то спроектирована система с заданной потерей производительности и подсистема контроля целостности не будет преодолена с вероятностью

$$P = \frac{T_4 - T_2}{T_4}, \quad (5)$$

где T_4 – период срабатывания подсистемы контроля целостности, вычисленный исходя из уравнения (4); T_2 – период срабатывания подсистемы контроля целостности, вычисленный исходя из выражения (2).

При $T_2 > T_4$ для достижения приемлемых безопасности и потери производительности следует изменить алгоритмы контроля целостности системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведение защитных действий до причинения какого-либо вреда имеет ряд особенностей:

1. Интеграция в процессе проектирования. Поскольку «часовые» должны находиться в работоспособном состоянии до возникновения угрозы, то их следует идентифицировать и установить в систему на стадии разработки и проектирования.

2. Противостояние угрозам. Если определенную угрозу нельзя допустить ни в коем случае, то метод «часовых» подходит как нельзя лучше, поскольку в такой ситуации принятие мер защиты после произошедшего нежелательного события не имеет смысла.

3. Нерациональное расходование ресурсов. Важным аспектом работы «часовых», который необходимо принимать во внимание, является оценка дополнительного времени и ресурсов, затрачиваемых на предотвращение событий, которые и так не могут произойти. Вычислительные системы не критического применения могут и не нуждаться в «часовых», использование которых в подобном случае представляет собой неоправданную трату ресурсов.

4. Сложности в оценке повышения безопасности. Еще одна проблема при использовании «часовых» связана с тем, что не всегда можно установить, действительно ли «часовой» работает. Конечно, это выполнимо в случаях, когда неудачные попытки нападения могут быть зафиксированы. Однако в тех случаях, когда нельзя определить, что данный «часовой» действительно предотвратил потенциальную атаку, оценить его эффективность довольно сложно. Можно применять статистические или вероятностные методы (например, использование системы с установленным и не установленным «часовым»), но при этом все равно будет оставаться некоторая степень неопределенности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барзилович Е.Ю. Модели технического обслуживания сложных систем. М.: Высшая школа, 1982. 231 с.
2. Зегжда П.Д., Зегжда Д.П., Корт С.С. Теоретические основы информационной безопасности. СПб.: ВГТУ, 1998. 70 с.
3. Корпеев Д.О., Бондаренко Р.А., Яковлев Д.С. Методы однократной случайной выборки и последовательного случайного контроля защищенности информации

в компьютерных системах и пути повышения их эффективности // *Информация и безопасность*. 2010. № 3. С. 351–358.

Для цитирования: Полянская Ю.В., Морозов А.В., Краснов С.Г. Модель безопасности с «часовым» механизмом системы защиты информации // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2020. № 4 (8). С. 97–102.

SECURITY MODEL WITH THE "TIMING" MECHANISM OF THE INFORMATION SECURITY SYSTEM

Yu.V. POLYANSKAYA¹, Engineer, A.V. MOROZOV², Dr. Sc., S.G. KRASNOV³, Adjunct

¹ Military unit 21555, 47, Frunze st., 214006, Smolensk, Russian Federation,
e-mail: glafira007@rambler.ru

² Military innovation technopolis "ERA" 28, Pionersky st., 353456, Krasnodar territory,
Anapa, Russian Federation, e-mail: glafira2190@mail.ru

³ Military Academy of Aerospace Defense named after Marshal of the Soviet Union
G.K. Zhukov, 50, Zhigareva st., 170003, Tver, Russian Federation,
e-mail: garvel568@yandex.ru

The main point of the new approach to security should be the development of effective security models that are adequate to the current level of development of software and hardware, as well as the possibility of flexible security management depending on the requirements, acceptable risk and resource consumption. The task of the kernel integrity control subsystem is to ensure the security of the system during its operation and detect incorrect interference of system subjects in its operation. The system integrity control subsystems are based on two main components: static and dynamic. The frequency of the kernel integrity control subsystem actuation determines the time that the system will be in the "information leak" state in the event of a violation of the system integrity. There are two approaches to determining the time interval T : the first approach is characterized by minimizing the loss of system performance due to the presence of the kernel integrity control subsystem in the system, the second approach is characterized by the fact that it provides a higher level of security in case of possible losses of system performance.

Keywords: security model, kernel integrity control subsystem, statistical subsystem, dynamic subsystem, the subsystem response period.

REFERENCES

1. Barzilovich E.Yu. *Modeli tekhnicheskogo obsluzhivaniya slozhnykh sistem*. [Models of technical maintenance of complex systems]. Moscow: Vysshaya shkola, 1982. 231 p.
2. Zegzhda P.D., Zegzhda D.P., Kort S.S. *Teoreticheskiye osnovy informatsionnoy bezopasnosti* [Theoretical foundations of information security]. St-Petersburg: VGTU, 1998. 70 p.
3. Karpeev D.O., Bondarenko R.A., Yakovlev D.S. Methods of single random sampling and sequential random control of information security in computer systems and ways to improve their efficiency *Informatsiya i bezopasnost*. 2010, No. 3, pp. 351–358. (In Russian).

Поступила в редакцию/received: 02.07.2020; после рецензирования/revised: 28.08.2020;
принята/accepted 15.09.2020

*Вестник Тверского государственного технического университета.
Серия «Технические науки». № 4 (8), 2020*

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ВЫСШЕГО ВОЕННОГО УЧЕБНОГО ЗАВЕДЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ТРЕНАЖЕРНОЙ ПОДГОТОВКИ

В.А. МОРЕНКОВ, канд. воен. наук, И.С. ЖИХАРЕВ, адъюнкт

Военная академия воздушно-космической обороны имени Маршала Советского
Союза Г.К. Жукова, 170003, Тверь, ул. Жигарева, д. 50, e-mail: ruslink83@mail.ru

© Моренков В.А., Жихарев И.С., 2020

Проведен анализ образовательной деятельности в высших военных учебных заведениях, показано влияние информационных технологий на развитие автоматизированного управления в армии. Выявлены проблемы, влияющие на уровень практической подготовки обучающихся, на комплексы средств автоматизации, и намечены пути их преодоления за счет применения информационных технологий, реализуемых в образовательной деятельности вузов и войсках.

Ключевые слова: комплекс средств автоматизации, информационные технологии, тренажер, практический уровень подготовки.

DOI: 10.46573/2658-5030-2020-4-103-109

ВВЕДЕНИЕ

Подходит к концу первая четверть XXI века, можно с уверенностью сказать, что информационные технологии – это реальность, в которой осуществляют свою деятельность все высшие военные учебные заведения Министерства обороны Российской Федерации (МО РФ).

Последние десятилетия армия как неотъемлемая часть общества претерпела колоссальные изменения в результате перманентного ее реформирования. При этом нельзя не заметить позитивных перемен в жизни современной российской армии. Одним из таких изменений является внедрение информационных технологий во все сферы деятельности армии.

Следствием этого стало принятие на вооружение качественно новых средств вооруженной борьбы, что привело к изменениям ее количественно-качественных показателей, пересмотру взглядов на структуру и модели функционирования армии как боевой системы, а также на обеспечивающие ее системы разведки, управления, поражения, профессионального образования и др. Вместе с тем требуется адекватное улучшение результатов подготовки различных профессиональных групп людей, включая военных специалистов, повышение уровня их образования [1].

Цель настоящего исследования – выявить недостатки в образовательной деятельности вузов, препятствующие достижению необходимого уровня практической подготовки обучающихся к применению современных комплексов средств автоматизации (КСА).

Недостаточная подготовленность обучающихся к работе с существующими КСА и принятие на вооружение перспективных образцов КСА являются основными побуждающими мотивами к пристальному изучению особенностей образовательной деятельности высшего военного учебного заведения в целом и, в частности, методики подготовки специалистов для работы на КСА.

Необходимо выявить причины как недостаточно эффективного обучения практической работе на КСА в вузе, так и недостаточно высокого уровня подготовки к применению КСА в войсках.

Актуальность данной проблемы повышается в свете поступления на вооружение перспективных образцов, отличающихся двумя аспектами – многократно возросшим количеством автоматизируемых задач и на порядок возросшим количеством информации, которую необходимо учитывать и обрабатывать в современных условиях работы.

МАТЕРИАЛЫ

Основным видом деятельности военно-учебных заведений является образовательная деятельность по реализации основных профессиональных образовательных программ. Высшие военно-учебные заведения реализуют основные профессиональные образовательные программы (ОПОП) – образовательные программы высшего образования и среднего профессионального образования. В военно-учебных заведениях к числу обучающихся по основным профессиональным образовательным программам относятся адъюнкты, слушатели и курсанты.

Военно-учебные заведения самостоятельно разрабатывают ОПОП в соответствии с федеральными государственными образовательными стандартами (ФГОС) и квалификационными требованиями (КТ) [2]. За основу подготовки обучающихся в соответствии с ФГОС высшего профессионального образования третьего поколения принят компетентностный подход. Под компетенциями понимается устойчивый и повторяющийся элемент содержания компетентности.

В ОПОП определяются:

планируемые результаты освоения основных профессиональных образовательных программ – компетенции обучающихся, установленные ФГОС и КТ, и дополнительно компетенции обучающихся, установленные военно-учебным заведением;

планируемые результаты обучения по каждой дисциплине и практической подготовке – знания, умения, навыки и (или) опыт деятельности, характеризующие этапы формирования компетенций и обеспечивающие достижение планируемых результатов освоения основных профессиональных образовательных программ [2].

В соответствии с ФГОС почти треть учебного времени отводится на практическую подготовку. В вузах данная подготовка охватывает образцы вооружения и военной техники (ВВТ), представленные в виде КСА тактического, оперативно-тактического, оперативного и стратегического уровней управления Воздушно-космическими силами (ВКС) [3].

Стоит отметить, что эффективное управление войсками и боевыми средствами в современных условиях немислимо без применения КСА в единой автоматизированной системе управления (ЕАСУ), т.е. на всех уровнях управления ВКС. Данный способ управления называется автоматизированным способом управления войсками (силами). Автоматизированный способ управления, реализуемый военными специалистами с необходимым уровнем подготовки, позволяет в два раза повысить эффективность ведения боевых действий по сравнению с неавтоматизированным способом управления войсками (силами) [4].

Применительно к вузам возникает проблема совершенствования методики подготовки обучающихся на КСА, так как существующий уровень подготовки

не соответствует необходимому для эффективного применения КСА уровню подготовки.

Данная проблема выявлена в результате анализа:

текущей успеваемости и итоговой аттестации слушателей и курсантов за пять лет;

отзывов на выпускников из войск за три года;

результатов тактических учений на полигонах за шесть лет [5];

результатов проведения командно-штабных учений [6].

Актуальность выявленной проблемы не вызывает сомнения и требует детального изучения, а также принятия мер по ее устранению.

Данные обстоятельства предопределяют необходимость совершенствования образовательной деятельности в вузов для практической подготовки обучающихся.

Совершенствование практической подготовки слушателей и курсантов предполагает:

поиск новых форм, методов и средств обучения;

оптимизацию структуры занятия, рациональное использование учебного времени и ресурсов комплексов средств автоматизации;

повышение эффективности системы объективного контроля и оценки деятельности обучающихся;

улучшение учебно-материальной базы;

расширение возможностей тренажерно-имитационной аппаратуры.

Каждое из указанных направлений требует пристального рассмотрения в свете указанной выше проблемы. При этом хотелось бы выделить последнее из вышеперечисленных направлений, которое напрямую влияет на уровень подготовки обучающихся, и указать пути преодоления выявленных противоречий, которые в настоящее время не устранены.

Противоречие же заключается в том, что существующее время, отводимое на практическую подготовку обучающихся, не обеспечено нормативным временем на самостоятельную работу, которое должно быть выделено в соответствии с руководящими документами [2].

Стоит отметить, что практическая подготовка на занятиях и самостоятельная работа (СР) в свободное от занятий время возможны только на учебных командных пунктах (УКП), оснащенных КСА из состава ЕАСУ.

Согласно [2] СР является частью учебной деятельности обучающихся по освоению основной профессиональной образовательной программы и организуется в целях закрепления и углубления полученных знаний и навыков, поиска и приобретения новых знаний, а также выполнения учебных заданий, подготовки к предстоящим занятиям, зачетам и экзаменам.

Время для СР отводится расписанием дня из расчета не менее трех часов ежедневно [2]. Данное время должно составлять не менее пятидесяти процентов учебного времени, которое дополнительно выделяется для подготовки обучающихся.

Для оценки временных показателей (общего и среднего времени занятости УКП; общего и среднего времени, отводимого на обучение практическим действиям; общего и среднего времени, выделяемого для самостоятельной работы) был проведен анализ расписаний занятий и учебных планов обучения в вузе за три года.

Например, среднее время, отводимое на обучение практическим действиям, в 2018–2019 учебном году за месяц составило 183 часа занятий на УКП. Соответственно

время, отводимое на СР, должно было быть не менее 91,5 часа, фактически же для практической подготовки обучающихся было выделено только 17,9 часа СР, что более чем в пять раз меньше предусмотренного руководящими документами.

Итак, имея данные по загруженности (средней занятости) УКП в год (месяц), можно сделать следующие выводы:

в среднем за год для занятий СР обучающимся практическим действиям на КСА необходимо не менее 91,5 часа в месяц, а выделяется, по причине занятости УКП, только 17,9 часа;

фактически на СР отведено 17,9 часа, что составляет около 20 % от минимально необходимого времени в соответствии с руководящими документами.

Наиболее целесообразным направлением устранения выявленного дефицита времени практической подготовки и, как следствие, повышения уровня практической подготовки обучающихся является использование в вузе тренажерных классов для соответствующих КСА.

Казалось бы, естественный путь решения возникшей проблемы – заказ необходимых тренажеров у изготовителей КСА и организация тренажерного обучения [7], однако более чем двадцатилетний опыт эксплуатации КСА в войсках и вузах не привел к созданию промышленностью ни одного тренажера для оперативного и оперативно-тактического уровня управления ВКС. Причинами этого являются финансовый вопрос (недостаток финансирования) и преодоление организациями-разработчиками промышленности трудностей, связанных с реформированием структуры ВС РФ.

Путь устранения выявленной проблемы намечен, и ее необходимо решать силами вузов с привлечением разработчиков тренажерной техники, тем более что в ближайшие несколько лет ВКС готовятся принять целый парк перспективных КСА нового поколения.

Тренажер – техническое средство профессиональной подготовки обучаемого, предназначенное для формирования и совершенствования у обучаемых профессиональных навыков и умений, необходимых им для управления материальным объектом путем многократного выполнения действий, имитирующих управление реальным объектом. Тренажер должен иметь три необходимые части:

конструктивную (точную копию рабочего места оператора);
программную (адекватную модель оборудования и процессов);
дидактическую (рабочее место инструктора с программой оценки и контроля действий оператора, прочими не менее важными сервисными программами).

Существующий парк тренажеров ВКС представляет собой набор программно-технических комплексов, встроенных непосредственно в соответствующие боевые образцы ВВТ. Как следствие, возникает необходимость включения образцов ВВТ при проведении тренировки, что является затратным мероприятием. Кроме того, встроенные тренажеры не всегда позволяют проводить все виды тренировок в требуемых режимах работы и с оценкой уровня практической подготовленности обучающихся.

Таким образом, современный тренажерный комплекс должен обеспечивать:
возможность проведения всех видов тренировок (индивидуальной, автономной, комплексной) обучающихся без использования реальных образцов вооружения;
возможность проведения всех видов тренировок обучающихся с отработкой всех способов ведения боевых действий по единому замыслу;
возможность автоматизированного формирования (выбора) вариантов учебно-тренировочных заданий (УТЗ) в соответствии с замыслом тренировки;

формирование вариантов УТЗ с учетом возможности имитации ударов средств воздушного нападения в любом тактическом построении с подыгрышем всех типов воздушных объектов (целей) и способов их боевого применения;

возможность оперативного вмешательства в процесс отработки УТЗ путем изменения состава воздушных объектов (целей), маршрутов полета и способов преодоления системы противовоздушной обороны;

высокую степень адекватности имитируемой информационной модели реальной, воплощенной в боевых образцах ВВТ;

возможность подыгрыша не задействованных в тренировке средств и образцов ВВТ;

документирование результатов тренировки и оценку профессиональной подготовленности обучающихся [8].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Одним из эффективных способов совершенствования методики подготовки обучающихся на КСА в вузах будет создание современных тренажерных классов и организация на их базе тренажерной подготовки. Данное мероприятие позволит значительно улучшить образовательную деятельность вузов в целом.

Повышение уровня подготовки обучающихся для работы на существующих КСА в вузах возможно за счет увеличения времени практической подготовки (СР), что в сложившихся условиях невозможно без организации тренажерной подготовки.

Однако в обозримом будущем, если рассматривать План развития ВС РФ до 2025 года, принятых мер окажется недостаточно в связи с тем, что обучение работе на перспективных образцах КСА по существующей методике будет проблематичным, так как перспективный парк КСА значительно отличается от существующего.

Для формирования новых дисциплин под перспективные КСА предлагается использовать формализованный подход к учебно-методическим материалам (учебному плану, тематическому плану и пр.) [9], что позволит качественно сформировать дисциплины под перспективные образцы, учитывая новые требования к образовательной деятельности вузов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В итоге хотелось бы напомнить слова адмирала Степана Осиповича Макарова «Помни войну!» [10] и подчеркнуть их актуальность. Военные конфликты первой четверти XXI века, как и тенденция к переходу государств от массовых армий к профессиональным, свидетельствуют о повышении роли информационных технологий, а их эффективное применение невозможно без высокого уровня подготовки военных специалистов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Самойлов В.Д. Совершенствование системы высшего образования офицеров Вооруженных Сил Российской Федерации: дис. ... д-ра пед. наук. М., 2002. 534 с.

2. Приказ министра обороны РФ от 15 сентября 2014 г. № 670 «О мерах по реализации отдельных положений статьи 81 Федерального закона от 29 декабря 2012 г. № 273-ФЗ "Об образовании в Российской Федерации"». URL: https://doc.mil.ru/documents/quick_search/npa.htm (дата обращения: 19.06.2020).

3. Моренков В.А. Поколения и возможные направления развития автоматизированной системы управления истребительной авиацией // *Военная мысль*. 2019. № 10. С. 65–73.
4. Долгов А.И. Особенности применения автоматизированных систем управления // *Сборник статей конференции ВКА ПВО*. Тверь: ВКА ПВО, 1993. С. 311.
5. Зосиев В.В. Совокупность методов подготовки боевых расчетов соединения ПВО на основе единой тренажерной системы: дис. ... канд. наук. 2019. 304 с.
6. Чуркин И.П. Доклад ЗНА // *Сборник статей конференции ВА ВКО*. Тверь: ВА ВКО, 2017. С. 224.
7. Шапарь В.Б., Россоха В.Е., Шапарь О.В. Новейший психологический словарь. Ростов-на-Дону: Феникс, 2009. 806 с.
8. Арепин Ю.И., Момот Н.Б., Долгий В.А., Коваленко А.И. Создание автономного тренажера для подразделений радиотехнических войск / *Программные продукты и системы*. 2013. № 2. С. 78–81.
9. Харитонов И.М. Алгоритм формирования учебного плана с применением методики формализованного представления учебной дисциплины (на примере дисциплины «моделирование систем») // *Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика*. 2011. № 2. С. 178–185.
10. Шишов А.В. Адмирал Макаров. Помни войну. М.: АСТ, 2004. 104 с.

Для цитирования: Моренков В.А., Жихарев И.С. Совершенствование образовательной деятельности высшего военного учебного заведения на основе информационных технологий тренажерной подготовки // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2020. № 4 (8). С. 103–109.

IMPROVEMENT OF EDUCATIONAL ACTIVITIES FOR THE HIGHER MILITARY EDUCATION INSTITUTION ON THE BASIS OF INFORMATION TECHNOLOGIES OF SIMULATOR TRAINING

V.A. MORENKOV, Cand. Sc., I.S. ZHIKHAREV, Adjunct

Military Academy of Aerospace Defense named after Marshal of the Soviet Union G.K.
Zhukov, 50, Zhigareva st., 170003, Tver, Russian Federation,
e-mail: ruslink83@mail.ru

The analysis of educational activities in higher military educational institutions is carried out; the influence of information technologies on the development of automated control in the army is shown. The problems, affecting the level of students' practical training on automation systems, are identified, the ways to overcome them with the use of information technologies implemented in the educational activities of higher educational institutions and troops are outlined.

Keywords: automation solutions complex, information technology, simulator, practical level of training.

REFERENCES

1. Samoilov V.D. Improving the system of higher education of officers of the Armed Forces of the Russian Federation. Diss. doctor of pedagogical sciences. Moscow, 2002. 534 p. (In Russian).
2. Order of the Minister of Defense of the Russian Federation of September 15, 2014 N 670 "On measures to implement certain provisions of Article 81 of the federal law of December 29, 2012. N 273-ФЗ "On education in the Russian Federation". URL: https://doc.mil.ru/documents/quick_search/npa.htm (data accessed: 19.06.2020). (In Russian).
3. Morenkov V.A. Generations and possible directions of development of an automated control system for fighter aircraft. *Voyennaya mysl*. 2019. No. 10, pp. 65–73. (In Russian).
4. Dolgov A.I. Features of the use of automated control systems. *Sbornik statey konferentsii VKA PVO*. Tver: VKA PVO, 1993. P. 311. (In Russian).
5. Zosiev V.V. A set of methods for preparing combat calculations of an air defense compound based on a single training system. Diss. cand. sciences, 2019. 304 p. (In Russian).
6. Churkin I.P. Report ZNA. *Sbornik statey konferentsii VA VKO*. Tver: VA VKO, 2017, pp. 224. (In Russian).
7. Shapar V.B., Rossokha V.E., Shapar O.V. *Noveyshiyy psikhologicheskiy slovar*. [The latest psychological dictionary]. Rostov-on-Don: Feniks, 2009. 806 p.
8. Arepin Yu.I., Momot N.B., Dolgiy V.A., Kovalenko A.I. Creation of an autonomous simulator for units of the radio engineering troops. *Programmnyye produkty i sistemy*. 2013. No. 2, pp. 78–81. (In Russian).
9. Kharitonov I.M. The curriculum formation algorithm using the methodology of the formalized presentation of the discipline (on the example of the discipline "system modeling"). *Vestnik AGTU. Seriya: Upravleniye, vychislitelaya tekhnika i informatika*. 2011. No. 2, pp. 178–185. (In Russian).
10. Shishov A.V. *Admiral Makarov. Pomni voynu* [Admiral Makarov. Remember the war]. Moscow: ACT, 2004. 104 p.

Поступила в редакцию/received: 30.06.2020; после рецензирования/revised: 11.08.2020;
принята/accepted 15.09.2020

ВЕСТНИК ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. СЕРИЯ «ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ»

Оформление статей. Правила для авторов

Редакция журнала просит авторов, направляющих свои статьи для опубликования, руководствоваться изложенными ниже правилами и соблюдать нормы действующего законодательства о защите авторских прав (глава 70 «Авторское право» Гражданского кодекса Российской Федерации, часть IV), придерживаться общепринятых этических норм в соответствии с Декларацией о публикационной этике и непремлемых практиках, одобренной решением Бюро Научно-издательского совета РАН от 18 сентября 2012 г.

Общие положения

К рассмотрению для опубликования в журнале принимаются статьи, содержащие результаты оригинальных теоретических и экспериментальных научных исследований, не опубликованные ранее и не переданные в редакции других журналов. Статьи должны отвечать тематике основных разделов журнала: машиностроение и машиноведение; транспортное, горное и строительное машиностроение; информатика, вычислительная техника и управление.

В список авторов статей включаются только те лица, которые внесли значительный вклад в исследовательскую работу, не более 5 специалистов от одной организации. Участники подготовительных или вспомогательных работ отмечаются в примечаниях

к соответствующим разделам основного текста или в разделе благодарностей.

Все принятые к рассмотрению статьи проходят независимое рецензирование и в случае необходимости направляются авторам на исправление, доработку. Решение о публикации принимает редколлегия журнала по результатам рассмотрения окончательного варианта статьи с учетом рекомендаций рецензента.

Необходимо также представить: рекомендацию организации, в которой статья подготовлена (направление от иностранного учреждения предоставляется в случае, если этого требуют его правила), экспертное заключение на статью о возможности открытого опубликования (для авторов из Российской Федерации) или авторскую справку (для сотрудников ТвГТУ).

Авторы должны заключить лицензионный договор с Тверским государственным техническим университетом о предоставлении права использования произведения. Форма договора представлена на сайте ТвГТУ (<http://www.tstu.ver.ru>) в разделе «Вестник Тверского государственного технического университета».

Материалы статьи: файл с названием *ФИОавтора.docx* (указывается фамилия первого автора) с текстом статьи, копия экспертного заключения *ФИОавтора заключение.pdf* и копия лицензионного договора, подписанного со стороны авторов, – *ФИОавтора договор.pdf* – высылаются по адресу электронной почты vestnik_tstu_tekh@mail.ru.

Плата за публикацию статьи с авторов не взимается.

Оформление текста рукописи

Текст статьи должен быть набран в редакторе Microsoft Word. Параметры страницы: поля по 25 мм с каждой стороны. Шрифт: Times New Roman, кегль 12 для всего текста. Междустрочный интервал одинарный. Абзацный отступ 1,25 устанавливается для всего текста. Отступ снимается для ориентированных «по центру» заголовка и подзаголовков, для таблиц и рисунков.

Единицы физических величин должны быть приведены в Международной системе единиц (СИ).

Все употребляемые автором обозначения, за исключением общепринятых констант (e , π и т.п.), а также аббревиатуры должны быть расшифрованы при их первом написании в тексте.

Для набора формул следует использовать встроенный редактор формул. Формулы, внедренные как изображение, не допускаются!

Все таблицы и рисунки должны быть пронумерованы и иметь название, на них обязательно должна быть ссылка в тексте статьи. Размеры шрифтов на рисунках и графиках не должны значительно отличаться от размера шрифта основного текста.

Иллюстративный материал (фотографии, схемы и т.п.) необходимо сохранять в формате *.tif, *.jpg с разрешением не ниже 300 dpi (предпочтительно 600 dpi).

Таблицы должны быть составлены лаконично, однотипные таблицы строятся одинаково. Цифровые данные следует округлять в соответствии с точностью эксперимента. Сведения в таблицах и на рисунках не должны повторяться. Таблицы, представленные в виде изображений или в формате PDF, не принимаются.

Рукопись статьи должна включать в указанной ниже последовательности: индекс УДК, название, фамилию и инициалы каждого автора с указанием ученой степени, название организации по месту работы каждого автора с указанием почтового и электронного адресов, аннотацию объемом 600–800 знаков и 5–10 ключевых слов; основное содержание статьи (текст, рисунки, таблицы, формулы), список используемой литературы.

Название статьи, фамилии и инициалы авторов, названия организаций и их адреса, аннотация с ключевыми словами, список используемой литературы должны дублироваться на английском языке.

Статья должна быть структурирована, то есть разбита на разделы (например, Введение, Материалы и методика эксперимента, Полученные результаты, Заключение, Литература).

Литература к статье обязательна и должна содержать все цитируемые и упоминаемые в тексте работы. В списке литературы источники нумеруются арабскими цифрами с точкой без скобок. В тексте номер ссылки заключается в квадратные скобки.

При цитировании следует ссылаться преимущественно на статьи из журналов, которые включены в Перечень научных изданий, рекомендованных ВАК РФ для опубликования трудов соискателей ученых степеней. Не рекомендуется ссылаться на рекламные буклеты, тезисы докладов и другие нерцензируемые издания. Нельзя ссылаться на неопубликованные работы (отчеты по НИОКР, служебные документы, материалы с ограниченным грифом).

В списке литературы следует указывать не менее 15–20 первоисточников, при этом доля ссылок на собственные работы автора (авторов) не должна превышать 30 %, публикации последних 5–10 лет должны составлять не менее 30 %.

Основной список литературы необходимо дублировать на английском языке в разделе “References” следующим образом: фамилии и инициалы авторов латинским шрифтом, транслитерация латинскими буквами русского названия публикации и перевод названия на английский язык, транслитерация названия российского журнала, год издания, том, номер, страницы.

Представленные статьи могут быть отклонены редколлегией по причинам несоблюдения настоящих правил, несоответствия тематической направленности журнала и современному уровню исследований, а также при небрежном оформлении.

**ВЕСТНИК
ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

Серия «Технические науки»

**Научный рецензируемый журнал
№ 4 (8), 2020**

**Print ISSN 2658-5030
Online ISSN 2687-0029**

Редактор М.Б. Юдина
Корректор Я.А. Петрова

Подписано в печать 10.12.2020

Дата выхода в свет 30.12.2020

Формат 60 x 84/8

Физ. печ. л. 14

Тираж 500 экз.

Усл. печ. л. 13,02

Цена свободная

Заказ № 336

Бумага писчая

Уч.-изд. л. 12,18

С – 112

Редакционно-издательский центр
Тверского государственного технического университета
170026, Тверь, наб. Афанасия Никитина, 22
Отпечатано в ООО «Наукоемкие технологии»
Центр инженерной печати
170024, Тверь, ул. Академическая, д. 14