

Учреждение образования  
«Барановичский государственный университет»

## *Вестник БарГУ*

Ежеквартальный научно-практический журнал

Издаётся с марта 2013 г.

Выпуск 4, июнь, 2016.

Серия «Технические науки»

---

*Учредитель:* учреждение образования «Барановичский государственный университет».

### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

*Главный редактор журнала* Кочурко Василий Иванович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, академик Белорусской инженерной академии, академик Международной академии технического образования, академик Международной академии наук педагогического образования, академик Академии экономических наук Украины, Заслуженный работник образования Республики Беларусь, ректор учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

*Заместитель главного редактора журнала* Никишова Алла Васильевна, кандидат филологических наук, доцент, проректор по научной работе учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ СЕРИИ

#### Главный редактор серии

Алифанов Александр Викторович, лауреат Государственной премии Республики Беларусь в области науки и техники, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры оборудования и автоматизации производства учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

#### Ответственный секретарь серии

Горбач Юлия Евгеньевна, старший преподаватель кафедры экономики и организации производства инженерного факультета учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

#### Редактор текстов на английском языке

Манкевич Жанна Борисовна, кандидат психологических наук, старший преподаватель кафедры теории и практики английского языка учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

Гавриленя Андрей Константинович (*ответственный за направление «Машиностроение и машиноведение»*), кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой общенаучных дисциплин инженерного факультета учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

Дубень Игорь Викторович (*ответственный за направление «Процессы и машины агроинженерных систем»*), кандидат технических наук, доцент кафедры механизации и энергообеспечения производства инженерного факультета, декан факультета довузовской подготовки учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

Анискович Геннадий Иосифович, кандидат технических наук, доцент, доцент учреждения образования «Белорусский государственный аграрный технический университет» (Минск, Республика Беларусь).

Белый Алексей Владимирович, член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе Государственного научного учреждения «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси» (Минск, Республика Беларусь).

Бетяна Григорий Филиппович, кандидат технических наук, доцент, начальник технологического научно-производственного центра учреждения образования «Белорусский государственный аграрный технический университет» (Минск, Республика Беларусь).

Гордиенко Анатолий Илларионович, академик Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, начальник Центра индукционных технологий Государственного научного учреждения «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси» (Минск, Республика Беларусь).

Девойно Олег Георгиевич, доктор технических наук, профессор, заведующий научно-исследовательской инновационной лабораторией плазменных и лазерных технологий филиала Белорусского национального технического университета «Научно-исследовательская часть» (Минск, Республика Беларусь).

Добышев Анатолий Семёнович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры механизации животноводства и электрификации сельскохозяйственного производства учреждения образования «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия» (Горки, Республика Беларусь).

Дремук Владимир Алексеевич, кандидат технических наук, доцент, декан инженерного факультета учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

Ивашко Виктор Сергеевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технической эксплуатации автомобилей Белорусского национального технического университета (Минск, Республика Беларусь).

Калугин Юрий Константинович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры машиноведения и технической эксплуатации автомобилей учреждения образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы» (Гродно, Республика Беларусь).

Карташевич Анатолий Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой тракторов и автомобилей учреждения образования «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия» (Горки, Республика Беларусь).

Клочков Александр Викторович, доктор технических наук, профессор, профессор учреждения образования «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия» (Горки, Республика Беларусь).

Клубович Владимир Владимирович, доктор технических наук, академик Национальной академии наук Беларуси, профессор, заведующий лабораторией пластичности Белорусского национального технического университета (Минск, Республика Беларусь).

Ласковнѳ Александр Петрович, доктор технических наук, академик Национальной академии наук Беларуси, академик-секретарь отделения физико-технических наук Национальной академии наук Беларуси (Минск, Республика Беларусь).

Нерода Михаил Владимирович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии машиностроения учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

Спиридонов Николай Васильевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии машиностроения Белорусского национального технического университета (Минск, Республика Беларусь).

Томило Вячеслав Анатольевич, доктор технических наук, доцент, директор Государственного научного учреждения «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси» (Минск, Республика Беларусь).

Шелег Валерий Константинович, член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии машиностроения Белорусского национального технического университета (Минск, Республика Беларусь).

*Адрес редакции:*

ул. Войкова, 21, 225404 г. Барановичи.

Телефон: +375 (163) 45 46 28.

E-mail: vestnik\_barsu@tut.by

*Подписные индексы:* 00993 — для индивидуальных подписчиков; 009932 — для организаций.

Свидетельство о регистрации средств массовой информации № 1533 от 30.07. 2012, выданное Министерством информации Республики Беларусь.

*В соответствии с приказом Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь от 21 января 2015 г. № 16 научно-практический журнал «Вестник БарГУ» серия «Технические науки» включён в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим наукам (машиностроение и машиноведение; процессы и машины агроинженерных систем).*

*Научно-практический журнал «Вестник БарГУ» включён в РИНЦ (Российский индекс научного цитирования), лицензионный договор № 06-01/2016.*

*Издатель:* учреждение образования «Барановичский государственный университет».

Выходит на русском, белорусском и английском языках.

Журнал распространяется на территории Республики Беларусь

---

*Заведующий редакционно-издательским отделом* Е. Г. Хохол  
*Технический редактор* В. В. Кукреш  
*Компьютерная вёрстка* В. В. Кукреш  
*Корректор* С. А. Березнюк

Подписано в печать 13.06.2016. Формат 60 × 84 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Бумага ксероксная. Печать цифровая. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 10,70.  
Уч.-изд. л. 5,40. Тираж 75 экз. Заказ .

Цена свободная.

Полиграфическое исполнение: открытое акционерное общество «Красная звезда». Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя и распространителя печатных изданий № 2/7 от 28.10.2013.

Юридический адрес: пер. 1-й Загородный, 3, 220073 Минск.

Почтовый адрес: ул. Советская, 80, 225409 Барановичи.

© БарГУ, 2016

Репозиторий БарГУ

Установа адукацыі  
«Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт»

## *Веснік БарДУ*

### Штоквартальны навукова-практычны часопіс

Выдаецца з сакавіка 2013 г.

Выпуск 4, чэрвень, 2016.

Серыя «Тэхнічныя навукі»

*Заснавальнік:* установа адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт».

*Галоўны рэдактар часопіса* Качурка Васіль Іванавіч, доктар сельскагаспадарчых навук, прафесар, акадэмік Беларускай інжынернай акадэміі, акадэмік Міжнароднай акадэміі тэхнічнай адукацыі, акадэмік Міжнароднай акадэміі навук педагагічнай адукацыі, акадэмік Акадэміі эканамічных навук Украіны, Заслужаны работнік адукацыі Рэспублікі Беларусь, рэктар установы адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт» (Баранавічы, Рэспубліка Беларусь).

*Намеснік галоўнага рэдактара часопіса* Нікішова Ала Васільеўна, кандыдат філалагічных навук, дацэнт, прарэктар па навуковай рабоце ўстановы адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт» (Баранавічы, Рэспубліка Беларусь).

#### РЭДАКЦЫЙНАЯ КАЛЕГІЯ СЕРЫІ

##### Галоўны рэдактар серыі

Аліфанаў Аляксандр Віктаравіч, лаўрэат Дзяржаўнай прэміі Рэспублікі Беларусь у галіне навукі і тэхнікі, доктар тэхнічных навук, прафесар, прафесар кафедры абсталявання і аўтаматызацыі вытворчасці ўстановы адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт» (Баранавічы, Рэспубліка Беларусь).

##### Адказны сакратар серыі

Горбач Юлія Яўгеньеўна, старшы выкладчык кафедры эканомікі і арганізацыі вытворчасці інжынернага факультэта ўстановы адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт» (Баранавічы, Рэспубліка Беларусь).

##### Рэдактар тэкстаў на англійскай мове

Манкевіч Жанна Барысаўна, кандыдат псіхалагічных навук, старшы выкладчык кафедры тэорыі і практыкі англійскай мовы ўстановы адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт» (Баранавічы, Рэспубліка Беларусь).

Гаўрылена Андрэй Канстанцінавіч (*адказны за напрамак «Машынабудаванне і машыназнаўства»*), кандыдат тэхнічных навук, дацэнт, загадчык кафедры агульнанавуковых дысцыплін інжынернага факультэта ўстановы адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт» (Баранавічы, Рэспубліка Беларусь).

Дубень Ігар Віктаравіч (*адказны за напрамак «Працэсы і машыны аграінжынерных сістэм»*), кандыдат тэхнічных навук, дацэнт кафедры механізацыі і энергазабеспячэння вытворчасці інжынернага факультэта, дэкан факультэта давузаўскай падрыхтоўкі ўстановы адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт» (Баранавічы, Рэспубліка Беларусь).

Анісковіч Генадзь Іосіфавіч, кандыдат тэхнічных навук, дацэнт, дацэнт установы адукацыі «Беларускі дзяржаўны аграрны тэхнічны ўніверсітэт» (Мінск, Рэспубліка Беларусь).

Белы Аляксей Уладзіміравіч, член-карэспандэнт Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі, доктар тэхнічных навук, прафесар, намеснік дырэктара па навуковай рабоце Дзяржаўнай навуковай установы «Фізіка-тэхнічны інстытут Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі» (Мінск, Рэспубліка Беларусь).

Бяцэня Рыгор Піліпавіч, кандыдат тэхнічных навук, дацэнт, начальнік тэхналагічнага навукова-практычнага цэнтра ўстановы адукацыі «Беларускі дзяржаўны аграрны тэхнічны ўніверсітэт» (Мінск, Рэспубліка Беларусь).

Гардзіенка Анатолій Іларыёнавіч, акадэмік Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі, доктар тэхнічных навук, прафесар, начальнік Цэнтра індукцыйных тэхналогій Дзяржаўнай навуковай установы «Фізіка-тэхнічны інстытут Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі» (Мінск, Рэспубліка Беларусь).

Дзявойна Алег Георгіевіч, доктар тэхнічных навук, прафесар, загадчык Навукова-даследчай інавацыйнай лабараторыі плазменных і лазерных тэхналогій філіяла Беларускага нацыянальнага тэхнічнага ўніверсітэта «Навукова-даследчая частка» (Мінск, Рэспубліка Беларусь).

Добышаў Анатолій Сямёнавіч, доктар тэхнічных навук, прафесар, прафесар кафедры механізацыі жывёлагадоўлі і электрыфікацыі сельскагаспадарчай вытворчасці ўстановы адукацыі «Беларуская дзяржаўная сельскагаспадарчая акадэмія» (Горкі, Рэспубліка Беларусь).

Драмук Уладзімір Аляксеевіч, кандыдат тэхнічных навук, дацэнт, дэкан інжынернага факультэта ўстановы адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт» (Баранавічы, Рэспубліка Беларусь).

Івашка Віктар Сяргеевіч, доктар тэхнічных навук, прафесар, прафесар кафедры тэхнічнай эксплуатацыі аўтамабіляў Беларускага нацыянальнага тэхнічнага ўніверсітэта (Мінск, Рэспубліка Беларусь).

Калугін Юрый Канстанцінавіч, кандыдат тэхнічных навук, дацэнт, дацэнт кафедры машыназнаўства і тэхнічнай эксплуатацыі аўтамабіляў установы адукацыі «Гродзенскі дзяржаўны ўніверсітэт імя Янкі Купалы» (Гродна, Рэспубліка Беларусь).

Карташэвіч Анатолій Мікалаевіч, доктар тэхнічных навук, прафесар, загадчык кафедры трактараў і аўтамабіляў установы адукацыі «Беларуская дзяржаўная сельскагаспадарчая акадэмія» (Горкі, Рэспубліка Беларусь).

Клачкоў Аляксандр Віктаравіч, доктар тэхнічных навук, прафесар, прафесар установы адукацыі «Беларуская дзяржаўная сельскагаспадарчая акадэмія» (Горкі, Рэспубліка Беларусь).

Клубовіч Уладзімір Уладзіміравіч, доктар тэхнічных навук, прафесар, акадэмік Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі, загадчык лабараторыі пластычнасці Беларускага нацыянальнага тэхнічнага ўніверсітэта (Мінск, Рэспубліка Беларусь).

Ласкаўнёў Аляксандр Пятровіч, доктар тэхнічных навук, акадэмік Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі, акадэмік-сакратар аддзялення фізіка-тэхнічных навук Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі (Мінск, Рэспубліка Беларусь).

Нярода Міхаіл Уладзіміравіч, кандыдат тэхнічных навук, дацэнт, загадчык кафедры тэхналогіі машынабудавання ўстановы адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт» (Баранавічы, Рэспубліка Беларусь).

Спірыдонаў Мікалай Васільевіч, доктар тэхнічных навук, прафесар, прафесар кафедры тэхналогіі машынабудавання Беларускага нацыянальнага тэхнічнага ўніверсітэта (Мінск, Рэспубліка Беларусь).

Таміла Вячаслаў Анатольевіч, доктар тэхнічных навук, дацэнт, дырэктар Дзяржаўнай навуковай установы «Фізіка-тэхнічны інстытут Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі» (Мінск, Рэспубліка Беларусь).

Шэлег Валерый Канстанцінавіч, член-карэспандэнт Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі, доктар тэхнічных навук, прафесар, загадчык кафедры тэхналогіі машынабудавання Беларускага нацыянальнага тэхнічнага ўніверсітэта (Мінск, Рэспубліка Беларусь).

*Адрас рэдакцыі:*

вул. Войкава, 21, 225404, г. Баранавічы.

Тэлефон: +375 163 45 46 28.

E-mail: vestnik\_barsu@tut.by

*Падпісныя індэксы:* 00993 — для індывідуальных падпісчыкаў; 009932 — для арганізацый.

Пасведчанне аб рэгістрацыі сродкаў масавай інфармацыі № 1533 ад 30.07.2012, выдадзенае Міністэрствам інфармацыі Рэспублікі Беларусь.

*У адпаведнасці з загадам Вышэйшай атэстацыйнай камісіі Рэспублікі Беларусь ад 21 студзеня 2015 г. № 16 навукова-практычны часопіс «Веснік БарДУ» серыя «Тэхнічныя навукі» ўключаны ў Пералік навуковых выданняў Рэспублікі Беларусь для апублікавання вынікаў дысертацыйных даследаванняў па тэхнічных навуках (машынабудаванне і машыназнаўства; працэсы і машыны аграінжынерных сістэм).*

*Навукова-практычны часопіс «Веснік БарДУ» ўключаны ў РІНЦ (Расійскі індэкс навуковага цытавання), ліцэнзійны дагавор № 06-01/2016.*

*Выдавец:* установа адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт».

Выходзіць на рускай, беларускай і англійскай мовах.

Часопіс распаўсюджваецца на тэрыторыі Рэспублікі Беларусь.

---

*Загадчык рэдакцыйна-выдавецкага аддзела* А. Г. Хахол

*Тэхнічны рэдактар* В. У. Кукраш

*Камп'ютарная вёрстка* В. У. Кукраш

*Карэктар* С. А. Березнюк

Падпісана да друку 13.06.2016. Фармат 60 × 84 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Папера ксераксная. Друк лічбавы. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 10,70. Ул.-выд. арк. 5,40. Тыраж 75 экз. Заказ .

Кошт свабодны.

Паліграфічнае выкананне: адкрытае акцыянернае таварыства «Чырвоная зорка». Пасведчанне аб дзяржаўнай рэгістрацыі выдаўца, вытворцы, распаўсюджвальніка друкаваных выданняў № 2/7 ад 28.11.2013.

Юрыдычны адрас: завул. 1-ы Загарадны, 3, 220073 Мінск.

Паштовы адрас: вул. Савецкая, 80, 225409 Баранавічы.

Educational Institution  
“Baranovichi State University”

## *BarSU Herald*

**A quarterly scientific and practical journal**

Published since March 2013

Issue 4, June, 2016.

Series “Engineering”

---

*Promoter:* Educational Institution “Baranovichi State University”.

### **EDITORIAL BOARD**

*Editor in Chief:* Vasily Ivanovich Kochurko, Rector of Baranovichi State University, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Academician of the Belarusian Academy of Engineering, Academician of the International Academy of Technical Education, Academician of the International Academy of Pedagogical Education, Academician of the Academy of Economic Sciences of the Ukraine, Honored Worker of Education of the Republic of Belarus (Baranovichi, the Republic of Belarus).

*Deputy Chief Editor:* Alla Vasilyevna Nikishova, Ph. D. in Philology, Vice-rector for Scientific Work of Baranovichi State University, Associate Professor (Baranovichi, the Republic of Belarus).

### **THE EDITORIAL BOARD OF THE EDITION**

#### **Editor of the issue**

Aleksandr V. Alifanov, State-Prize Winner of the Republic of Belarus in the Science and Technology Field, Professor of the Equipment and Manufacturing Automation Chair of Engineering Department, Baranovichi State University, Doctor of Technical Sciences (Baranovichi, the Republic of Belarus).

#### **Executive secretary of the issue**

Juliya E. Gorbach, Senior lecturer of the Economic Organization of Production Chair of Engineering Department, Baranovichi State University (Baranovichi, the Republic of Belarus).

#### **Editor of English texts**

Zhanna B. Mankevich, Senior lecturer of the English Language Theory and Practice Chair of Slavic and Germanic Languages Department, Baranovichi State University, Ph. D. in Psychology (Baranovichi, the Republic of Belarus).

Andrei K. Gavrilena (*in charge of the heading “Machine Building and Engineering Science”*), Head of the Scientific Disciplines Chair of Mechanization and Energy Production Department, Baranovichi State University, Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor (Baranovichi, the Republic of Belarus).

Igor V. Duben (*in charge of the heading “Processes and Machines of Agroengineering Systems”*), Dean of the Pre-University Training Department, Baranovichi State University, Ph. D. in Technical Sciences (Baranovichi, the Republic of Belarus).

Gennady I. Aniskovich, Associate Professor of the Belarusian State Agrarian Technical University, Ph. D. in Technical Sciences (Minsk, the Republic of Belarus).

Alexey V. Bely, Deputy Director for Scientific Work of the State Scientific Institution “The Physical-Technical Institute, the National Academy of Sciences”, A. M. of the National Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor (Minsk, the Republic of Belarus).

Grigory F. Betenya, Head of the Technology Research and Production Center of the Belarusian State Agrarian Technical University, Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor (Minsk, the Republic of Belarus).

Anatoly I. Gordienko, Head of the Induction Technology Center of the State Research Institution “The Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences”, Doctor of Technical Sciences, Professor (Minsk, the Republic of Belarus).

Oleg G. Devoino, Head of the Research Laboratory of Innovative Plasma and Laser Technology of the Belarusian National Technical University branch “Research Section”, Doctor of Technical Sciences, Professor (Minsk, the Republic of Belarus).

Anatoly S. Dobyshev, Professor of the Animal Husbandry Mechanization and Electrification of Agricultural Production Chair of “The Belarusian State Agricultural Academy”, Doctor of Technical Sciences, Professor (Gorki, the Republic of Belarus).

Vladimir A. Dremuk, Head of Engineering Department of Baranovichi State University, Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor (Baranovichi, the Republic of Belarus).

Viktor S. Ivashko, Professor of the Automobile Technical Maintenance Chair of the Belarusian National Technical University, Doctor of Technical Sciences, Professor (Minsk, the Republic of Belarus).

Yury K. Kalugin, Associate Professor of the Engineering Science and Automobile Technical Maintenance Chair of "Grodno State University of Ya. Kupala", Ph. D. in Technical Sciences (Grodno, the Republic of Belarus).

Anatoly N. Kartashevich, Head of the Tractors and Vehicles Chair of the Belarusian State Agricultural Academy, Doctor of Technical Sciences, Professor (Gorki, the Republic of Belarus).

Alexandr V. Klochkov, Professor, Professor of the Belarusian State Agricultural Academy, Doctor of Technical Sciences (Gorki, the Republic of Belarus).

Vladimir V. Klubovich, Head of the Plasticity Laboratory of the Belarusian National Technical University, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Technical Sciences, Professor (Minsk, the Republic of Belarus).

Alexandr P. Laskovnyov, Academician-secretary of the Physics and Technical Sciences Department of the National Academy of Sciences of Belarus, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Technical Sciences (Minsk, the Republic of Belarus).

Michail V. Neroda, Head of the Mechanical Engineering Chair of Baranovichi State University, Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor (Baranovichi, the Republic of Belarus).

Nicholai V. Spiridonov, Professor of the Mechanical Engineering Chair of the Belarusian National Technical University, Doctor of Technical Sciences, Professor (Minsk, the Republic of Belarus).

Vyacheslav A. Tomilo, Director of the State Scientific Institution "The Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus", Doctor of Technical Sciences, Associate Professor (Minsk, the Republic of Belarus).

Valery K. Sheleh, Head of the Mechanical Engineering Chair of the Belarusian National Technical University, A. M. of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Technical Sciences, Professor (Minsk, the Republic of Belarus).

*Editorial address:*

Voikov Str. 21, 225404, Baranovichi.

Phone: +375 163 45 46 28.

E-mail: vestnik@barsu.by

*Subscription indices:* 00993 — for individual subscribers; 009932 — for companies.

The certificate of the registration of mass media № 1533 of 30.07. 2012 issued by the Ministry of Information of Belarus.

*In accordance with the order of the board of the Higher Attestation Commission of the Republic of Belarus on January 21, 2015 № 16 the scientific and practical journal "Bulletin of BarSU" the series "Engineering" was included on the list of the scientific publications of the Republic of Belarus for publishing the results of dissertation research in engineering sciences (mechanical engineering and machines, processes and machines of agroengineering systems).*

*Scientific and practical journal Vestnik BarSU is included into RSCI (Russian Science Citation Index), license agreement № 06-01/2016.*

*Published:* Educational Institution "Baranovichi State University".

Issued in Russian, Belarusian and English.

The journal is distributed on the territory of the Republic of Belarus.

---

*Managing editor* E. G. Hohol

*Technical editor* V. V. Kukresh

*Desktop Publishing* V. V. Kukresh

*Proofreader* S. A. Bereznyuk

Signed print 13.06.2016. Format 60 × 84 1/8. Paper xerox. Digital printing. Headset Times. Conv. pr. s. l. 10.70. Acc.-pub. s. l. 5.40. Circulation of 75 copies. Order

Free price.

Printing performance: Open Joint Stock Company "Red Star". Certificate of the state registration of the publisher, the manufacturer and the distributor of publications № 2/7 since 28.10.2013.

Legal address: 3, 1 Zagorodni Pereulok, 220073 Minsk.

Postal address: 80 Sovietskaya Str., 225409 Baranovichy.

## СОДЕРЖАНИЕ

### ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

#### Машиностроение и машиноведение

<b>Алифанов А. В., Горецкий Г. П., Милюкова А. М., Лях А. А., Шишмолин В. Н.</b> Исследование влияния режимов магнитно-импульсной обработки на микротвёрдость и микроструктуру образцов сталей, применяемых для изготовления рубильных ножей . . . . .	11
<b>Бакулин Б. А., Калугин Ю. К.</b> Анализ химического состава и физико-механических свойств материалов для изготовления деталей батанного механизма ткацкого станка . . . . .	22
<b>Жоглик И. Н.</b> Эмиссия моноэнергетических ионов $V^{2+}$ , $Ti^{2+}$ , $Zr^{2+}$ в вакуумном электродуговом разряде . . . . .	29
<b>Здор Г. Н.</b> Экспериментальные исследования прессования вытяжных матриц совместным действием статических и динамических нагрузок высокой интенсивности . . . . .	35
<b>Ищенко М. В.</b> Износ конвейерной ленты в условиях абразивной химически активной среды калийного предприятия . . . . .	44
<b>Маркевич М. И., Чапманов А. М., Малышко А. Н., Солодуха В. А., Соловьев Я. А., Сарычев О. Э., Щербакова Е. Н.</b> Формирование и исследование диодов Шоттки на основе силицидов платины и никеля . . . . .	48
<b>Михайлов М. И.</b> Анализ нагрузочного резервирования сборных внутренних фрез . . . . .	55
<b>Ракицкий А. А.</b> Исследование усталостной прочности деталей машин с термонапылёнными порошковыми покрытиями в условиях циклического растяжения/сжатия . . . . .	62

#### Процессы и машины агроинженерных систем

<b>Бегеня Г. Ф., Анискович Г. И., Кривцов А. В., Рогожинский С. Н.</b> Инновационная технология упрочнения дисков роторов и оснований башмаков режущего аппарата косилок . . . . .	68
<b>Богданович П. Н., Михайлов М. И., Михайлов К. М.</b> Исследование влияния электрофрикционного упрочнения ножей режущего барабана кормоуборочного комбайна на их износостойкость . . . . .	77

## ЗМЕСТ

### ТЭХНІЧНЫЯ НАВУКІ

#### Машынабудаванне і машыназнаўства

<b>Аліфанаў А. В., Гарэцкі Г. П., Мілюкова Г. М., Лях А. А., Шышмолін В. Н.</b> Даследаванне ўплыву рэжымаў магнітна-імпульснай апрацоўкі на мікрацвёрдасць і мікраструктуру ўзораў сталяў, якія прымяняюцца для вырабу рубільных нажоў . . . . .	11
<b>Бакулін Б. А., Калугін Ю. К.</b> Аналіз хімічнага складу і фізіка-механічных уласцівасцяў матэрыялаў для вырабу дэталей батаннага механізма ткацкага станка . . . . .	22
<b>Жоглік І. М.</b> Эмісія монаэнергетычных йонаў $V^{2+}$ , $Ti^{2+}$ , $Zr^{2+}$ у вакуумным электрадугавым разрадзе . . . . .	29
<b>Здор Г. М.</b> Эксперыментальныя даследаванні прэсавання выцяжных матрыц сумесным дзеяннем статычных і дынамічных нагрузкаў высокай інтэнсіўнасці . . . . .	35
<b>Ішчанка М. В.</b> Зношванне канвеернай стужкі ва ўмовах абразіўнага хімічна актыўнага асяроддзя калійнага прадпрыемства . . . . .	44
<b>Маркевіч М. І., Чапланаў А. М., Малышка А. М., Саладуха В. А., Салаўёў Я. А., Сарычаў А. Э., Шчарбакова А. М.</b> Фарміраванне і даследаванне дыёдаў Шоткі на аснове сіліцыдаў плаціны і нікеля . . . . .	48
<b>Міхайлаў М. І.</b> Аналіз нагрузачнага рэзервавання зборных унутраных фрэз . . . . .	55
<b>Ракіцкі А. А.</b> Даследаванне стомленаснай трываласці дэталей машын з тэрманапыленымі парашковымі пакрыццямі ва ўмовах цыклічнага расцяжэння/сціскання . . . . .	62

#### Працэсы і машыны аграінжынерных сістэм

<b>Бяценья Р. Ф., Анісковіч Г. І., Крыўцоў А. В., Рагажынскі С. М.</b> Інавацыйная тэхналогія ўмацавання дыскаў ротараў і асноў башмакоў рэжучага апарата касілак . . . . .	68
<b>Багдановіч П. М., Міхайлаў М. І., Міхайлаў К. М.</b> Даследаванне ўплыву электрафрыкцыйнага ўмацавання нажоў рэжучага барабана кормаўборачнага камбайна на іх зносаўстойлівасць . . . . .	77

## CONTENTS

### TECHNICAL SCIENCES

#### Machine Building and Engineering Science

<b>Alifanov A. V., Goretsky G. P., Milyukova A. M., Lyakh A. A., Shishmolin V. N.</b> Research of influence of magnetic-pulse treatment modes on microhardness and microstructure steel samples used for chipper knives manufacture . . . . .	11
<b>Bakulin B. A., Kalugin Ju. K.</b> Analysis of chemical composition and physical-mechanical properties of materials for loom bata mechanism parts production . . . . .	22
<b>Zhohlik I. N.</b> Emission of monoenergetic flow of $V^{2+}$ , $Ti^{2+}$ , $ZR^{2+}$ ions in vacuum electroarc discharge . . . . .	29
<b>Zdor G. N.</b> Experimental study of exhaust pressing matrix via the combined action of static and dynamic loads of high intensity . . . . .	35
<b>Ishchenko M. V.</b> The conveyor belt wear in an abrasive and chemically active environment of the potash plant . . . . .	44
<b>Markevich M. I., Chaplanov A. M., Malyshko A. N., Solodukha V. A., Solovyev Ya. A., Sarichev O. E., Shcherbakova E. N.</b> Formation and investigation of Schottky diodes based on platinum and nickel silicide . . . . .	48
<b>Mikhailov M. I.</b> Analysis of prefabricated internal cutters load backup . . . . .	55
<b>Rakitsky A. A.</b> Investigation of fatigue strength of machine components with thermal spray coatings under cyclic push/pull conditions . . . . .	62

#### Processes and Machines of Agroengineering Systems

<b>Betenya G. F., Aniskovich G. I., Krivtsov A. V., Rogozhinsky S. N.</b> Innovative technology for rotor discs and mower cutterbar shoe base strengthening . . . . .	68
<b>Bogdanovich P. N., Mikhailov M. I., Mikhailov K. M.</b> Research of influence of electrofriction hardening of forage harvester cutting drum knives on their wear resistance . . . . .	77

УДК 621.9

**М. И. Михайлов**

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»,  
Министерство образования Республики Беларусь, пр. Октября, 48, 246746 Гомель, +375 (232) 47 91 61, Mihailov@gstu.by

## АНАЛИЗ НАГРУЗОЧНОГО РЕЗЕРВИРОВАНИЯ СБОРНЫХ ВНУТРЕННИХ ФРЕЗ

Исследовано напряжённо-деформированное состояние сборных внутренних фрез. Рассмотрена эффективность нагрузочного резервирования для различных вариантов работоспособного состояния.

**Ключевые слова:** металлорежущий инструмент; внутренние фрезы; надёжность; резервирование.

Табл. 1. Рис. 1. Библиогр.: 7 назв.

**M. I. Mikhailov**

Institution of Education "Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoi", the Ministry of education  
of the Republic of Belarus, 48, October ave., 246746 Gomel, Republic of Belarus, +375 (232) 47 91 61, Mihailov@gstu.by

## ANALYSIS OF PREFABRICATED INTERNAL CUTTERS LOAD BACKUP

The article deals with the results of the study of prefabricated internal cutters stressed-strain state. Efficiency of load backup for different operation conditions is considered.

**Key words:** metal cutting tools; internal cutters; reliability; reservation.

Table 1. Fig. 1. Ref.: 7 titles.

**Введение.** Переориентация промышленности на выпуск широкого ассортимента продукции малыми сериями (партиями), в совокупности с постоянным снижением трудовых ресурсов европейских государств, привела к изменению использованных ранее форм организации производства и применяемого оборудования, т. е. к переходу от автоматизированных систем на основе аналогового управления к системам с числовым программным управлением (ЧПУ).

Известно также, что в структуре времени обработки деталей на основе традиционных технологий доля основного времени составляет только около 30%, а оставшаяся часть приходится на вспомогательное и подготовительно-заключительное время [1].

Анализ литературы по обработке поверхностей [2] позволяет заключить, что все авторы выделяют схемы резания, которые классифицируют в основном для обработки протягиванием. Такой подход ограничивает возможности создания новых методов обработки и методику моделирования инструментов.

Приёмы, связанные с работой металлорежущего инструмента, занимают в сумме 4,7% времени работы оператора токарных станков и 3,9% — оператора многоцелевых станков. Эти приёмы, как правило, занимают мало времени, но их требуется выполнять очень часто. Например, на токарном станке с ЧПУ коррекция размеров производится примерно 8 раз в смену, удаление стружки с инструмента и детали — 24 раза в смену [3].

Восстановление работоспособности режущего инструмента не требует больших затрат времени (обычно не более 4% общего фонда времени), однако постоянное присутствие оператора в этом случае обязательно, что снижает эффективность работы как гибких производственных модулей (ГПМ), так и гибких производственных систем (ГПС).

Целью данных исследований является повышение надёжности работы системы инструментального обеспечения станков с ЧПУ.

**Основная часть.** Разработка и развитие методологии теории режущих инструментов требуют, прежде всего, построения единой системы координации всех элементов этих объектов, без которой невозможно компьютерное моделирование технологических систем обработки резанием и режущих инструментов при эффективном использовании для этой цели современных средств вычислительной техники.

Такую координацию необходимо выполнять на различном уровне и поэтапно. На первом этапе следует провести оценку напряжённо-деформированного состояния, а на втором — структурный анализ нагрузочной надёжности.

При рассмотрении сборной внутренней фрезы как системы режущих элементов, в которой отказ одного из них не приводит к полному отказу фрезы, с точки зрения надёжности фреза представляет собой резервированную систему [4].

Для фрезерной головки с шестью зубьями подачу на зуб  $S_z$  принимали равной 0,337 мм / зуб, а силы резания  $C_p$  рассчитывали по зависимости

$$P_z = \frac{10C_p t^x s_z n_u}{D^q n_z^u},$$

где  $t, s_z, n_u$  — глубина резания, подача на зуб, частота вращения заготовки соответственно;  
 $D, n_z$  — диаметр и частота вращения фрезы.

Значение коэффициента  $C_p$  и показателей степеней  $x, y, u, q, w$  находили по справочнику [5]:

$C_p$  равно 825;  $x$  — 1,0;  $y$  — 0,75;  $u$  — 1,1;  $q$  — 1,3;  $w$  — 0,2.

$$P_z = \frac{10 \cdot 825 \cdot 5^1 \cdot 0,337^{0,75}}{65^{1,3} \cdot 1800^{0,2}} = 1\,792;$$

$$P_x = P_z \cdot 0,5 = 1\,792 \cdot 0,5 = 896;$$

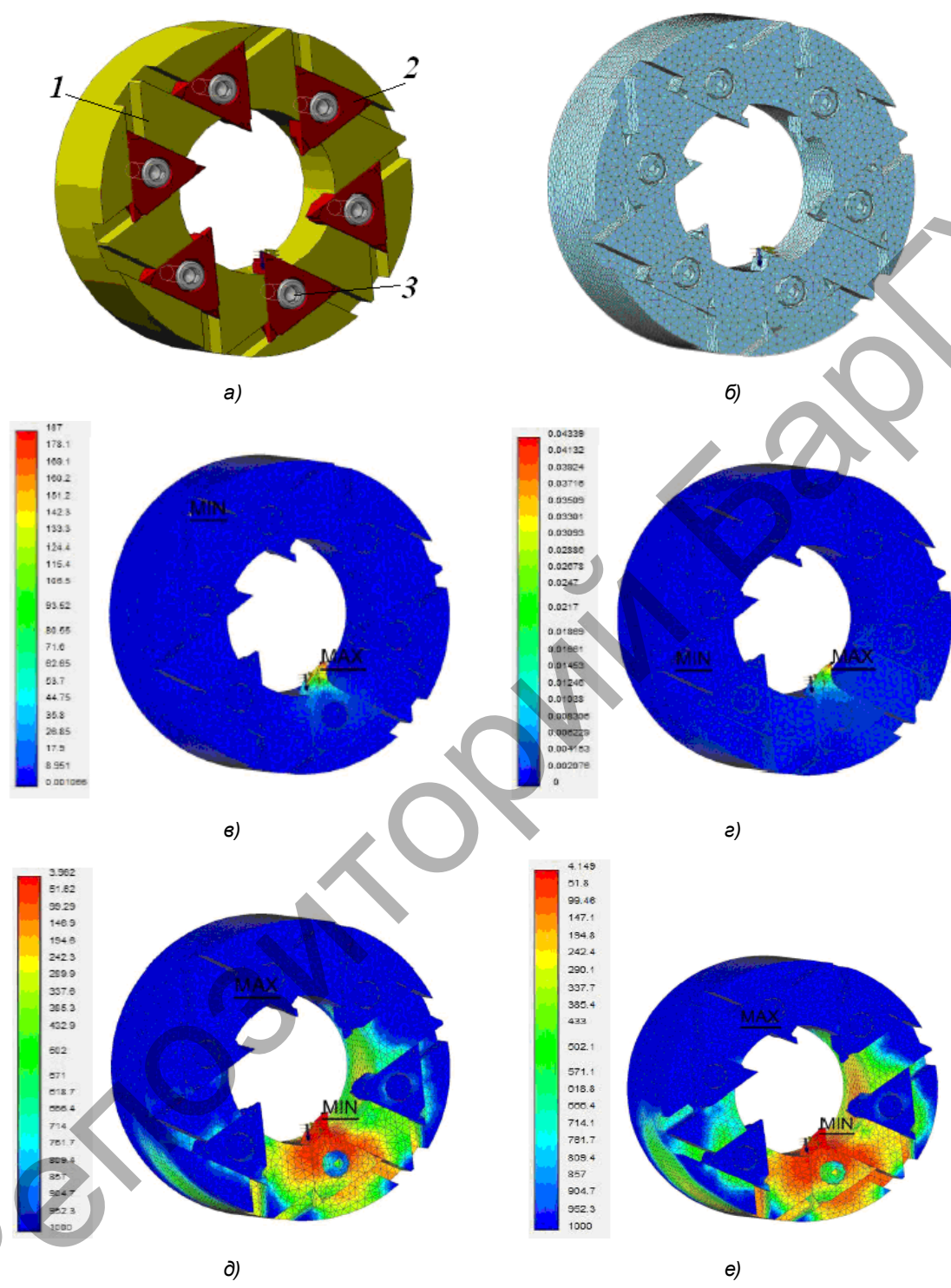
$$P_y = P_z \cdot 0,3 = 1\,792 \cdot 0,3 = 537,6.$$

Приведём результаты расчётов, представим, кроме 3D-моделей каждого конструктивного варианта и конечно-элементных сеток (рисунок 1, а и б), картины распределения эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{экв}}$ , равного 187,0398 МПа (см. рисунок 1, в), и перемещений  $\delta$ , равного 0,043392 мм (по оси  $Z$  —  $\delta_z$ , составляющего 0,03861 мм, по оси  $Y$  —  $\delta_y$ , равного 0,003962 мм, по оси  $X$  —  $\delta_x$ , составляющего 0,01928 мм (см. рисунок 1, г)), а также картины распределений запасов прочности  $K_{\text{мин}}$ , равного 3,962 (см. рисунок 1, д), по напряжениям текучести  $K_{\text{мин}}$ , равного 4,14939 (см. рисунок 1, е).

В результатах расчёта представлены суммарное максимальное перемещение  $\delta$ , а также максимальные перемещения вдоль осей  $Z$  ( $\delta_z$ );  $Y$  ( $\delta_y$ ) и  $X$  ( $\delta_x$ ), и, кроме того, рассчитанные значения максимального эквивалентного напряжения ( $\sigma_{\text{экв}}$ ), минимальных коэффициентов запаса текучести и прочности.

Анализ полученных расчётов даёт возможность заключить, что рекомендуемые режимы резания позволяют реализовать нагрузочное резервирование. В этом случае при отказе первой режущей пластины её нагрузку при резании воспринимает следующая за ней режущая пластина. При этом надёжность фрезы в целом снижается, т. е. уменьшается вероятность безотказной работы. Для внутренней резьбонарезной фрезы, имеющей шесть зубьев, вероятность надёжности фрезы в целом определяется соотношением

$$\begin{aligned} & [P_1(t) + Q_1(t)][P_2(t) + Q_2(t)][P_3(t) + Q_3(t)][P_4(t) + Q_4(t)][P_5(t) + Q_5(t)] \times \\ & \times [P_6(t) + Q_6(t)] = 1, \end{aligned}$$



1, 2, 3 — номер детали

Рисунок 1. — Модель и результаты расчётов

где  $P_1(t), P_2(t), P_3(t), P_4(t), P_5(t)$  и  $P_6(t)$  — вероятность безотказной работы первого, второго, третьего, четвёртого, пятого и шестого зуба фрезы соответственно;

$Q_1(t), Q_2(t), Q_3(t), Q_4(t), Q_5(t)$  и  $Q_6(t)$  — вероятность отказа каждого зуба.

Если нагрузка в процессе обработки соответствует предельной по критерию прочности, то вероятность безотказности фрезы будет определяться по выражению

$$P_{\text{фр}} = P_1(t)P_2(t)P_3(t)P_4(t)P_5(t)P_6(t).$$

При экспоненциальном законе распределения времени безотказной работы каждого зуба фрезы получаем следующие данные:

$$P_{\text{фр}} = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6)t},$$

где  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6$  — интенсивности отказов зубьев фрезы соответственно.

Тогда средний период стойкости фрезы можно определить по выражению

$$\bar{T}_{\text{фр}} = \int_0^{\infty} P_{\text{фр}} dt = \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6}.$$

Если  $\lambda_i \equiv \lambda$ , то

$$P_{\text{фр}} = e^{-6\lambda t}; \quad \bar{T}_{\text{фр}} = \frac{1}{6\lambda}.$$

Если нагрузка в процессе обработки меньше в два раза предельной по критерию прочности, то работоспособное состояние характеризуется пятью зубьями.

В этом случае вероятность безотказности фрезы будет определяться по выражению

$$P_{\text{ф}}(t) = \sum P_j(t)P_k(t)P_l(t)P_m(t)P_n(t) - 5 \prod_{i=1}^6 P_i(t).$$

при  $j = 1 \dots 6$ ;  $k = 2 \dots 6, 1$ ;  $l = 3 \dots 6, 1, 2$ ;  $m = 4, 5, 6, 1, 2, 3$ ;  $n = 5, 6, 1 \dots 4$ .

При экспоненциальном законе распределения времени безотказной работы каждого зуба фрезы получаем выражение

$$P_{\text{фр}} = e^{-(\lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6)t} + e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_6)t} + e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6)t} + \\ + e^{-(\lambda_1 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6)t} + e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_5 + \lambda_6)t} + e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6)t} - \\ - 5e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6)t},$$

где  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6$  — интенсивности отказов зубьев фрезы соответственно.

В более компактной форме выражение имеет следующий вид:

$$P = \sum e^{-(\lambda_j + \lambda_k + \lambda_l + \lambda_m + \lambda_n)t} - 5e^{-\sum_{i=1}^6 \lambda_i t}$$

при  $j = 1 \dots 6$ ;  $k = 2 \dots 6, 1$ ;  $l = 3 \dots 6, 1, 2$ ;  $m = 4, 5, 6, 1, 2, 3$ ;  $n = 5, 6, 1 \dots 4$ .

Тогда средний период стойкости фрезы определяется по выражению

$$\bar{T}_{\text{фр}} = \int_0^{\infty} P_{\text{фр}} dt = \sum \frac{1}{\lambda_j + \lambda_k + \lambda_l + \lambda_m + \lambda_n} - 5 \frac{1}{\sum_{i=1}^6 \lambda_i}.$$

Если  $\lambda_i \equiv \lambda$ , то

$$P_{\text{фр}} = 6e^{-5\lambda t} - 5e^{-6\lambda t}; \quad \bar{T}_{\text{фр}} = \frac{11}{30\lambda}.$$

Если нагрузка в процессе обработки меньше в три раза предельной по критерию прочности, то работоспособное состояние характеризуется четырьмя зубьями.

Вероятность безотказности фрезы будет определяться по выражению

$$P_{\text{фр}} = P_1(t)P_2(t)P_3(t)P_4(t)P_5(t)P_6(t) + Q_1(t)P_2(t)P_3(t)P_4(t)P_5(t)P_6(t) + Q_2(t)P_1(t)P_3(t)P_4(t)P_5(t)P_6(t) + Q_3(t)P_1(t)P_2(t)P_4(t)P_5(t)P_6(t) + Q_4(t)P_1(t)P_2(t)P_3(t)P_5(t)P_6(t) + Q_5(t)P_1(t)P_2(t)P_3(t)P_4(t)P_6(t) + Q_6(t)P_1(t)P_2(t)P_3(t)P_4(t)P_5(t) + Q_1(t)Q_2(t)P_3(t)P_4(t)P_5(t)P_6(t) + Q_1(t)Q_3(t)P_2(t)P_4(t)P_5(t)P_6(t) + Q_1(t)Q_4(t)P_2(t)P_3(t)P_5(t)P_6(t) + Q_1(t)Q_5(t)P_2(t)P_3(t)P_4(t)P_6(t) + Q_1(t)Q_6(t)P_2(t)P_3(t)P_4(t)P_5(t) + Q_2(t)Q_3(t)P_1(t)P_4(t)P_5(t)P_6(t) + Q_2(t)Q_4(t)P_1(t)P_3(t)P_5(t)P_6(t) + Q_2(t)Q_5(t)P_1(t)P_3(t)P_4(t)P_6(t) + Q_2(t)Q_6(t)P_1(t)P_3(t)P_4(t)P_5(t) + Q_3(t)Q_4(t)P_1(t)P_2(t)P_5(t)P_6(t) + Q_3(t)Q_5(t)P_1(t)P_2(t)P_4(t)P_6(t) + Q_3(t)Q_6(t)P_1(t)P_2(t)P_4(t)P_5(t) + Q_4(t)Q_5(t)P_1(t)P_2(t)P_3(t)P_6(t) + Q_4(t)Q_6(t)P_1(t)P_2(t)P_3(t)P_5(t) + Q_5(t)Q_6(t)P_1(t)P_2(t)P_3(t)P_4(t),$$

где  $P_1(t)P_2(t)P_3(t)P_4(t)P_5(t)P_6(t)$  — вероятность безотказной работы всех зубьев фрезы;

$Q_1(t)Q_2(t)Q_3(t)Q_4(t)Q_5(t)Q_6(t)$  — вероятность отказа зубьев;

$Q_1(t)P_2(t)P_3(t)P_4(t)P_5(t)P_6(t)$  — вероятность отказа одного зуба при безотказной работе второго, третьего, четвёртого, пятого и шестого зубьев.

В более компактной форме вероятность безотказности фрезы выражается следующим образом:

$$P_{\text{фр}}(t) = \sum [P_i(t)P_r(t)P_s(t)P_u(t)] - \sum [P_j(t)P_k(t)P_l(t)P_m(t)P_n(t)] + 10 \prod_{b=1}^6 P_b(t)$$

при  $i = 1 \dots 6, 1 \dots 6, 1, 2, 3$ ;  $r = 2 \dots 6, 1 \dots 6, 1 \dots 4$ ;  $s = 3 \dots 6, 1 \dots 4, 6, 1 \dots 6$ ;  $u = 4, 5, 6, 1, 2, 3, 5, 6, 1 \dots 6, 1$ ;  $j = 1 \dots 6, 1 \dots 6, 1 \dots 6, 1 \dots 6$ ;  $k = 2 \dots 6, 1 \dots 6, 1 \dots 6, 1 \dots 6, 2$ ;  $l = 3 \dots 6, 1 \dots 6, 1 \dots 6, 1 \dots 6, 1, 2$ ;  $m = 4, 5, 6, 1 \dots 6, 1 \dots 6, 1 \dots 6, 1, 2, 3$ ;  $n = 5, 6, 1 \dots 6, 1 \dots 6, 1 \dots 6, 1 \dots 4$ .

При экспоненциальном законе распределения времени безотказной работы каждого зуба фрезы получаем

$$P = \sum e^{-(\lambda_i + \lambda_r + \lambda_s + \lambda_u)t} - \sum e^{-(\lambda_j + \lambda_k + \lambda_l + \lambda_m + \lambda_n)t} + 10e^{-\sum_{i=1}^6 \lambda_i t}.$$

Тогда средний период стойкости фрезы определяется из выражения

$$\bar{T}_{\text{ср}} = \sum \left( \frac{1}{\lambda_i + \lambda_r + \lambda_s + \lambda_u} \right) - \sum \left( \frac{1}{\lambda_j + \lambda_k + \lambda_l + \lambda_m + \lambda_n} \right) + \frac{10}{\sum_{i=1}^6 \lambda_i}.$$

Если  $\lambda_i \equiv \lambda$ , то

$$P_{\text{фр}} = 15e^{-4\lambda t} - 24e^{-5\lambda t} + 10e^{-6\lambda t}; \quad \bar{T}_{\text{фр}} = \frac{37}{60\lambda}.$$

Если нагрузка в процессе обработки меньше в четыре раза предельной по критерию прочности, то работоспособное состояние характеризуется тремя зубьями.

Вероятность безотказности фрезы будет определяться по выражению

$$P_{\text{фр}}(t) = \sum [P_i(t)P_r(t)P_s(t)] - 3 \sum [P_j(t)P_k(t)P_l(t)P_m(t)] + \\ + 6 \sum [P_n(t)P_u(t)P_s(t)P_g(t)P_c(t)] - 10 \prod_{q=1}^6 P_q(t)$$

при  $i = 1 \dots 6, 1 \dots 6, 1 \dots 6, 1, 2$ ;  $r = 2 \dots 6, 1 \dots 6, 1, 3 \dots 6, 1 \dots 4$ ;  $s = 3 \dots 6, 1, 2, 4 \dots 6, 1 \dots 6, 1 \dots 3, 5, 6$ ;  $j = 1 \dots 6, 1 \dots 6, 1 \dots 3$ ;  $k = 2 \dots 6, 1 \dots 6, 1 \dots 4$ ;  $l = 3 \dots 6, 1 \dots 6, 1, 2, 4 \dots 6$ ;  $m = 4 \dots 6, 1 \dots 3, 5, 6, 1 \dots 6, 1$ ;  $n = 1 \dots 6$ ;  $u = 2 \dots 6, 1$ ;  $s = 3 \dots 6, 1, 2$ ;  $g = 4 \dots 6, 1 \dots 3$ ;  $c = 5, 6, 1 \dots 4$ .

При экспоненциальном законе распределения времени безотказной работы каждого зуба фрезы получаем

$$P_{\text{фр}} = \sum e^{-(\lambda_i + \lambda_r + \lambda_s)t} - 3 \sum e^{-(\lambda_j + \lambda_k + \lambda_l + \lambda_m)t} + 6 \sum e^{-(\lambda_n + \lambda_u + \lambda_s + \lambda_g + \lambda_c)t} - 10 \sum_{q=1}^6 e^{-\lambda_q t}$$

Тогда средний период стойкости фрезы определяется по выражению

$$T_{\text{ср}} = \sum \frac{1}{\lambda_i + \lambda_r + \lambda_s} - 3 \sum \frac{1}{\lambda_j + \lambda_k + \lambda_l + \lambda_m} + 6 \sum \frac{1}{\lambda_n + \lambda_u + \lambda_s + \lambda_g + \lambda_c} - 10 \frac{1}{\sum_{q=1}^6 \lambda_q}$$

Если  $\lambda_i \equiv \lambda$ , то

$$P_{\text{фр}} = 20e^{-3\lambda t} - 45e^{-4\lambda t} + 36e^{-5\lambda t} - 10e^{-6\lambda t}; \quad \bar{T}_{\text{фр}} = \frac{57}{60\lambda}$$

Если работоспособное состояние сохраняется при отказе четырёх не рядом стоящих зубьев, применяется формула

$$P_{\text{фр}}(t) = P_2(t)P_4(t)P_6(t) + \sum [P_i(t)P_j(t)] - \sum [P_k(t)P_l(t)P_m(t)P_n(t)] + \\ + [P_o(t)P_r(t)P_s(t)P_n(t)P_f(t)]$$

при  $i = 1 \dots 3$ ;  $j = 4 \dots 6$ ;  $k = 1 \dots 6$ ;  $l = 2 \dots 4, 6, 6, 2$ ;  $m = 4 \dots 6, 1 \dots 3$ ;  $n = 5, 6, 1, 2, 4, 4$ ;  $o = 1, 2, 2$ ;  $r = 2 \dots 4$ ;  $s = 3 \dots 5$ ;  $u = 4 \dots 6$ ;  $f = 6, 6, 1$ .

При экспоненциальном законе распределения времени безотказной работы каждого зуба фрезы получаем данные по формуле

$$P = e^{-(\lambda_2 + \lambda_4 + \lambda_6)t} + \sum e^{-(\lambda_i + \lambda_j)t} - \sum e^{-(\lambda_k + \lambda_l + \lambda_m + \lambda_n)t} + \sum e^{-(\lambda_o + \lambda_r + \lambda_s + \lambda_u + \lambda_f)t}$$

при  $i = 1 \dots 3$ ;  $j = 4 \dots 6$ ;  $k = 1 \dots 6$ ;  $l = 2 \dots 4, 6, 6, 2$ ;  $m = 4 \dots 6, 1 \dots 3$ ;  $n = 5, 6, 1, 2, 4, 4$ ;  $o = 1, 2, 2$ ;  $r = 2 \dots 4$ ;  $s = 3 \dots 5$ ;  $u = 4 \dots 6$ ;  $f = 6, 6, 1$ .

Тогда средний период стойкости фрезы определяется по формуле

$$T_{\text{ср}} = \sum \frac{1}{\lambda_2 + \lambda_4 + \lambda_6} + \sum \frac{1}{\lambda_j + \lambda_i} - \sum \frac{1}{\lambda_k + \lambda_l + \lambda_m + \lambda_n} + \sum \frac{1}{\lambda_o + \lambda_r + \lambda_s + \lambda_u + \lambda_f}$$

Если  $\lambda_i \equiv \lambda$ , то

$$P_{\text{фр}} = e^{-3\lambda t} - 6e^{-4\lambda t} + 3e^{-5\lambda t} + 3e^{-2\lambda t}; \quad \bar{T}_{\text{фр}} = \frac{14}{15\lambda}$$

Т а б л и ц а 1. — Результаты расчёта

Работоспособное состояние	Расчётные зависимости	Вероятность безотказной работы		
		λt		
		0,5	0,75	1,0
При рабочем состоянии всех зубьев	$P_{фр} = e^{-6λt}$	0,04973	0,01109	0,00247
При рабочем состоянии пяти зубьев	$P_{фр} = 6e^{-5λt} - 5e^{-6λt}$	0,24337	0,08543	0,02797
При рабочем состоянии четырёх зубьев	$P_{фр} = 15e^{-4λt} - 24e^{-5λt} + 10e^{-6λt}$	0,55759	0,29318	0,1376
При рабочем состоянии трёх зубьев	$P_{фр} = 20e^{-3λt} - 45e^{-4λt} + 36e^{-5λt} - 10e^{-6λt}$	0,8295	0,60279	0,389
При рабочем состоянии двух не рядом стоящих зубьев	$P_{фр} = e^{-3λt} - 6e^{-4λt} + 3e^{-5λt} + 3e^{-2λt}$	0,76083	0,54633	0,36581

Для определения стратегии замены отказавших режущих элементов фрез введём понятие кратности резервирования  $k$ :

$$k = \frac{Z - Z_m}{Z_m},$$

где  $Z$  — число зубьев фрезы;

$Z_m$  — число отказавших зубьев.

В зависимости от необходимого уровня надёжности фрезы выбирается стратегия замены её режущих элементов. Повышение надёжности путём замены одного отказавшего зуба приводит к недоиспользованию ресурса фрезы, повышению суммарных затрат (таблица 1).

Анализ результатов (см. таблицу 1) позволяет заключить, что с увеличением интенсивности отказов инструмента (при условии рабочего состояния всех зубьев) в отношении 1:1,5:2 надёжность его снижается в соотношении 1:4,48:20,12.

**Заключение.** Исследовано напряжённо-деформированное состояние сборных внутренних фрез, позволяющее реализовать нагрузочное резервирование и повысить надёжность инструмента. Рассмотрена эффективность нагрузочного резервирования для различных вариантов работоспособного состояния. Выведены формулы для определения вероятности безотказной работы фрезы в случае отказа одного, двух, трёх и четырёх зубьев, а также для случая безотказной работы всех зубьев.

#### Список цитируемых источников

1. Инструмент для станков с ЧПУ, многоцелевых станков и ГПС / И.Л. Фадюшин [и др.]. М. : Машиностроение, 1990. 272 с. ; Сборный твердосплавный инструмент / Г.Л. Хаега [и др.] ; под общ. ред. Г.Л. Хаега. М. : Машиностроение, 1989. 256 с. ; Нодельман М.О. Идентификация периодичности смены режущего инструмента // Вестник машиностроения. 1989. № 7. С. 46—48 ; Маслов А.Ф. Конструкции и эксплуатация прогрессивного инструмента. М. : ИТО, 2006. 169 с. ; Автоматизация выбора режущего инструмента для станков с ЧПУ / В.И. Аверченков [и др.]. Брянск : БГТУ, 2010. 148 с.
2. Инструмент для станков с ЧПУ, многоцелевых станков и ГПС / И.Л. Фадюшин [и др.]. М. : Машиностроение, 1990. 272 с. ; Сборный твердосплавный инструмент / Г.Л. Хаега [и др.] ; под общ. ред. Г.Л. Хаега. М. : Машиностроение, 1989. 256 с. ; Нодельман М.О. Идентификация периодичности смены режущего инструмента // Вестник машиностроения. 1989. № 7. С. 46—48 ; Маслов А.Ф. Конструкции и эксплуатация прогрессивного инструмента. М. : ИТО, 2006. 169 с. ; Автоматизация выбора режущего инструмента для станков с ЧПУ / В.И. Аверченков [и др.]. Брянск : БГТУ, 2010. 148 с. ; Шатуров Г.Ф., Мрочек Ж.А. Прогрессивные процессы механической обработки поверхностей. Минск : Технопринт, 2001. 460 с.
3. Инструмент для станков с ЧПУ, многоцелевых станков и ГПС / И.Л. Фадюшин [и др.]. М. : Машиностроение, 1990. 272 с.
4. Маслов А.Ф. Конструкции и эксплуатация прогрессивного инструмента. М. : ИТО, 2006. 169 с.
5. Справочник технолога-машиностроителя в 2 т. / под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. М. : Машиностроение, 1986. Т. 2. 496 с.

Поступила в редакцию 31.05.2016.