ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

СБОРКА В МАШИНОСТРОЕНИИ, ПРИБОРОСТРОЕНИИ

ЖУРНАЛ ВЫХОДИТ ПРИ СОДЕЙСТВИИ МЕЖДУНАРОДНОГО СОЮЗА МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ

ЖУРНАЛ ВХОДИТ В ПЕРЕЧЕНЬ УТВЕРЖДЕННЫХ ВАК РФ ИЗДАНИЙ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИЙ ТРУДОВ СОИСКАТЕЛЕЙ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ

12 2013 (161)

СОДЕРЖАНИЕ

Экономика и организация сборочного производства

Иванов А.А. Оптимизация задачи многостаночного обслуживания промышленным роботом 3

Сборочное оборудование и его элементы

Березин С.Я., Романова Л.С. Патроны для резьбонарезных и сборочных операций со специальными функциями 6

Современные технологии сборки

Гоцеридзе Р.М., Румянцев С.В. Определение параметров неуравновешенности поплавкового чувствительного элемента с магниторезонансным подвесом методом измерения угла фазового сдвига 14

Лукинов А.П., Сыромятин А.Н. Оптимизация и оценка робастности силовых замыканий антропоморфной сборочной оснастки. 19

В помощь конструктору, технологу

Емельяненко А.А., Бабкин С.Г. Технологически эффективный подход к конструированию корпусов приборов связи 30

Саввина Е.А., Прейс В.В. Имитационное моделирование процедур статистического регулирования технологического процесса автоматизированной сборки многоэлементных изделий 34

Подготовка специалистов

Лагунова Ю.А., Калянов А.Е. Применение гидропневмоаккумуляторов в горных машинах. 39

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индексы по каталогу “Роспечать” – **79748**, Объединенному каталогу “Пресса России” – **84967**, каталогу "Почта России" – **60257**) или непосредственно в издательстве

Тел.: (499) 268-38-42; тел./факс: 268-85-26. Факс: (499) 269-48-97.

E-mail: sborka@mashin.ru

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале "Сборка в машиностроении, приборостроении", допускаются только с разрешения редакции и со ссылкой на источник информации.

Председатель редакционного совета

Ф.М. МИТЕНКОВ, *академик РАН*

Редакционный совет

МОСКВА

А.С. ВАСИЛЬЕВ (главный редактор), д.т.н., проф.
А.А. ГУСЕВ, д.т.н., проф.
М.В. ВАРТАНОВ, д.т.н., проф.
А.М. ДАЛЬСКИЙ, д.т.н., проф.
И.Н. ЗИНИНА, к.т.н., доц.
Ю.Л. ИВАНОВ, д.т.н.
Ю.Г. КОЗЫРЕВ, к.т.н.
А.И. КУМЕНКО, д.т.н., проф.
А.В. МЕДАРЬ, к.т.н.
Е.А. МИКРИН, д.т.н., акад. РАН
В.В. ПОРОШИН, д.т.н., проф.
Б.В. ШАНДРОВ, к.т.н., проф.
А.А. ШАТИЛОВ, к.т.н., доц.
А.Г. ХОЛОДКОВА, к.т.н., проф.
Г.А. ЯРКОВ, инж.

Региональные редсоветы

БЕЛГОРОД
Н.А. ПЕЛИПЕНКО, д.т.н.

БРЯНСК
О.А. ГОРЛЕНКО, д.т.н., проф.

ВЛАДИВОСТОК
Ю.Н. КУЛЬЧИН, д.т.н., чл.-кор. РАН
А.А. СУПОНЯ, к.т.н.
В.М. КОРНИЕНКО, к.т.н.

ВОЛГОГРАД
В.Г. КАРАБАНЬ, к.т.н., доц.
М.Г. КРИСТАЛЬ, д.т.н., проф.
В.И. ЛЫСАК, д.т.н., проф., чл.-кор. РАН
В.М. ТРУХАНОВ, д.т.н., проф.

ИЖЕВСК
И.В. АБРАМОВ, д.т.н., проф.
Б.А. ЯКИМОВИЧ, д.т.н., проф.
В.Г. ОСЕТРОВ, д.т.н., проф.

КАЗАНЬ
Р.И. АДГАМОВ, д.т.н., проф.

КОВРОВ
Ю.З. ЖИТНИКОВ, д.т.н., проф.

КОЛОМНА
Ю.Д. АМИРОВ, д.т.н., проф.

КОМСОМОЛЬСК-НА-АМУРЕ
Б.Н. МАРЬИН, д.т.н.
В.И. ШПОРТ, д.т.н., проф.
А.М. ШПИЛЕВ, д.т.н., проф.

НАБЕРЕЖНЫЕ ЧЕЛНЫ
С.В. ДМИТРИЕВ, д.т.н., проф.
Р.М. ХИСАМУТДИНОВ, к.т.н.

НИЖНИЙ НОВГОРОД
С.В. ГОЛУБЕВ, инж.

ОМСК
В.Н. КОСТЮКОВ, д.т.н.

ОРЕЛ
Ю.С. СТЕПАНОВ, д.т.н., проф.
Г.А. ХАРЛАМОВ, д.т.н., проф.

ОРЕНБУРГ
А.Н. ПОЛЯКОВ, д.т.н., проф.
А.И. СЕРДЮК, д.т.н., проф.
А.П. ФОТ, д.т.н., проф.

РЫБИНСК
В.Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ, д.т.н., проф.
В.В. НЕПОМИЛУЕВ, д.т.н., проф.
А.Н. СЕМЕНОВ, д.т.н., проф.

САМАРА
М.А. ЕВДОКИМОВ, д.п.н., проф.
Ю.А. ВАШУКОВ, к.т.н., доц.
Г.А. КУЛАКОВ, д.т.н.
В.А. НИКОЛАЕВ, к.т.н., проф.

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
В.Ф. КУЗЬМИН, к.т.н.
Е.В. ШАЛОБАЕВ, к.т.н., проф.

ТОЛЬЯТТИ
А.И. РЫЖКОВ, к.т.н.

ТУЛА
В.В. ПРЕЙС, д.т.н., проф.

ХАБАРОВСК
В.А. ЛАШКО, д.т.н., проф.

Украина

КИЕВ
А.С. ЗЕНКИН, д.т.н., проф.
В.А. МАТВИЕНКО, к.т.н.

ДОНЕЦК
А.Н. МИХАЙЛОВ, д.т.н., проф.

СЕВАСТОПОЛЬ
Е.Л. ПЕРВУХИНА, д.т.н., проф.

Беларусь

МИНСК
В.Л. БАСИНЮК, д.т.н.
М.Л. ХЕЙФЕЦ, д.т.н., проф.

ГОМЕЛЬ
В.Е. СТАРЖИНСКИЙ, д.т.н.

ИЗРАИЛЬ
В.М. БЕДРИН, инж.

ПОЛЬША
П. ЛЕБКОВСКИ, д.т.н.
Е. ЛУНАРСКИ, д.т.н.

Ответственные за подготовку и выпуск номера:

Ю.А. ЧИЧОВ, И.М. ГЛИКМАН

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации ПИ № 77-1747 от 25 февраля 2000 г.

© Издательство “Машиностроение”, “Сборка в машиностроении, приборостроении”, 2013

THE MONTHLY NEWSMAGAZINE FOR SCIENTISTS AND MANUFACTURERS

ASSEMBLING IN MECHANICAL ENGINEERING AND INSTRUMENT-MAKING

THE MAGAZINE IS PUBLISHED UNDER THE PATRONAGE OF INTERNATIONAL UNION OF MECHANICAL ENGINEERS

THE JOURNAL IS AMONG THOSE APPROVED BY AAC RF FOR DISSERTATION PUBLICATION

12 2013 (161)

CONTENTS

Economy and the organization of assembly

Ivanov A.A. The optimization of the problem of multimachine maintenance by industrial robot 3

Production tools and machinery for assembly

Berezin S.Ya., Romanova L.S. Tapes for thread-forming and assembly operations with special functions 6

Modern technologies in assembly

Gotseridse R.M., Rumiantsev S.V. Determination parameters unbalance floating detector element with magnetic-resonance suspension by method of the phase shift measurement 14

Lukinov A.P., Syromyatin A.N. Optimization and robustness rating of force-closure conducted by anthropomorphic assembly equipment 19

Industrial and design engineer's aid

Emelyanenko A.A., Babkin S.G. Technologically efficient approach to the design of communication devices hulls 30

Savvina E.A., Prejs V.V. Imitating modelling of procedures of statistica regulation of technological process of the automated assemblage of multielement products 34

Preparation of experts

Lagunova Yu.A., Kalyanov A.E. Hydro-pneumatic accumulators application in mining machine 39

Journal is distributed on subscription, which can be issued in any post office (index on the catalogue of the "Rospechat" agency – **79748**, the union catalogue "Pressa Rossii" – **84967**, the catalogue "Pochta Rossii" – **60257**) or directly in editorial of the journal.
Ph.: (499) 268-38-42; ph./fax: 268-85-26. Fax: (499) 269-48-97.
http://www.mashin.ru E-mail: sborka@mashin.ru
Labor Red Banner Order Public Corporation "Publishing House "Mashine Building"
107076, Moscow, Stromynsky per. 4
The reference to the Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making Journal during reprint of the materials is mandatory.
Advertisers are responsible for the content of their advertisements.

Chair of Editorial Advisory Board –
Member of Russian Academy of Science
F.M. MITENKOV

Editors

MOSCOW

A.S. VASIL'EV (Chief editor)
M.V. VARTANOV
A.M. DALSKY
A.A. GUSEV
I.N. ZININA
Yu.L. IVANOV
Yu.G. KOZYREV
A.I. KUMENKO
A.V. MEDAR'
E.A. MIKRIN
V.V. POROSHIN
B.V. SHANDROV
A.A. SHATILOV
A.G. KHOLODKOVA
G.A. YARKOV

Regional editors

BELGOROD
N.A. PELIPENKO
BRIANSK
O.A. GORLENKO
VLADIVOSTOK
Yu.N. KULSHIN
A.A. SUPONIA
V.M. KORNIENKO
VOLGOGRAD
M.G. KRISTAL
V.G. KARABAN'
V.I. LYSAK
V.M. TRUKHANOV
IZHEVSK
I.V. ABRAMOV
B.A. YAKIMOVICH
V.G. OSETROV
KAZAN
R.I. ADGAMOV
KOVROV
Yu.Z. ZHITNIKOV
KOLOMNA
Yu.D. AMIROV
KOMSOMOLSK-ON-AMUR
B.N. MARJIN
V.I. SCHPORT
A.M. SHPILEV
NABEREZHNYE CHELNY
S.V. DMITRIEV
R.M. KHISAMUTDINOV
NIZHNY NOVGOROD
S.V. GOLUBEV
OMSK
V.N. KOSTIUKOV
OREL
Yu.S. STEPANOV
G.A. KHARLAMOV
ORENBURG
A.N. POLYAKOV
A.I. SERDUK
A.P. FOT
RYBINSK
V.F. BEZIAZYSHNY
V.V. NEPOMILUEV
A.N. SEMENOV
SAMARA
M.A. EVDOKIMOV
Yu.A. VASHUKOV
G.A. KULAKOV
V.A. NIKOLAEV
ST.-PETERSBURG
V.F. KUZMIN
E.V. SHALOBAEV
TULA
V.V. PREYS
TOLIATI
A.I. RYZHKOV
KHABAROVSK
V.A. LASHKO

Ukraine

KIEV
A.S. ZENKIN
V.A. MATVIENKO
DONETSK
A.N. MIKHAILOV
SEVASTOPOL
E.L. PERVUKHINA

Belarus

MINSK
V.L. BASINJUK
M.L. KHEIFETZ
GOMEL
V.E. STARZHINSKI
ISRAEL
V.M. BEDRIN
POLAND
P.LEBKOVSKI
E. LUNARSKI

Executive editors of current issue:
Yu.A. CHICHOV, I.M. GLIKMAN

The journal is registered by RF Ministry of Press, Tele-radio Broadcasting and Mass Communications Media.
Registration certificate ПИ № 77-1747, February 25, 2000 Free price

© "Mashinostroenie Publishers", "Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making", 2013

УДК 658.527.011

А.А. Иванов, *д-р техн. наук (Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева)*
E-mail: ivanov_aa@nntu.nnov

Оптимизация задачи многостаночного обслуживания промышленным роботом

Рассмотрена задача определения оптимального числа единиц технологического оборудования, обслуживаемых одним промышленным роботом, при условии минимизации времени простоев основного и вспомогательного оборудования. Эта задача считается типичной для одноканальной системы массового обслуживания с ожиданием.

The problem of determination of optimal number of units of technological equipment served by the industrial robot subject to minimization of downtime of main and auxiliary equipment. This problem is typical for the one-channel queuing system with waiting.

Ключевые слова: оптимальная система, теория массового обслуживания, система с ожиданием.

Keywords: optimal system, queuing theory, system with waiting.

Для одноканальной системы массового обслуживания (СМО) с ожиданием актуальной является задача определения оптимального числа n единиц технологического оборудования (ТО), обслуживаемых одним промышленным роботом (ПР), при условии минимизации времени простоев основного и вспомогательного оборудования [1, 2].

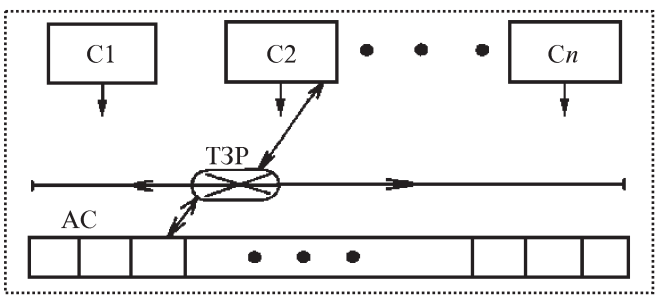

Рис. 1. Схема многостаночного обслуживания на автоматическом участке механообработки одним роботом:
С1–С*n* – станки с ЧПУ; ТЗР – транспортно-загрузочный робот; АС – автоматический склад

В структуру автоматического участка механической обработки заготовок входят: n станков с числовым программным управлением (С), один транспортно-загрузочный робот (ТЗР) и участковый накопитель в виде автоматического склада (АС) для заготовок и деталей (рис. 1).

Согласно циклограмме ТЗР за время $T_ц$ последовательно обслуживает станки от С1 до Сn и возвращается к С1 (рис. 2).

При многостаночном обслуживании возможны три ситуации.

I. *Простои ТО и ТЗР равны нулю (идеальная ситуация).*

В этом случае штучное время обработки заготовки $t_{шт}$ на одном станке равно времени обслуживания роботом $(n-1)$ станков (с учетом, что один станок уже обслуживается):

$$t_{шт} = (n-1)\,t_{об},$$

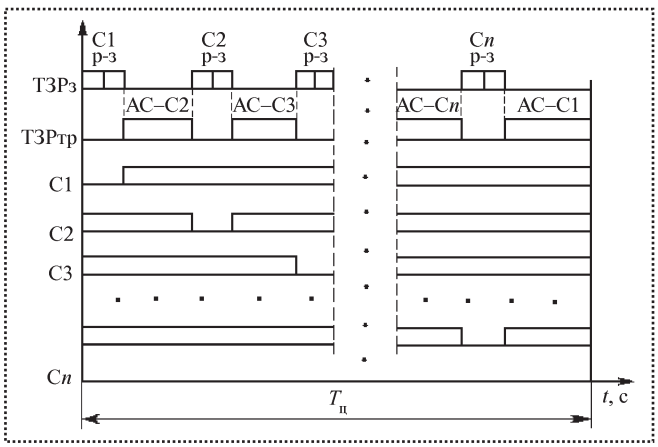

Рис. 2. Циклограмма последовательного обслуживания станков одним роботом

где $t_{об}$ – время обслуживания роботом одного станка.

Из этой ситуации находим оптимальное число единиц ТО:

$$n_{опт} = \frac{t_{шт}}{t_{об}} + 1.$$

II. *Время обработки $t_{шт}$ больше времени обслуживания:*

$$t_{шт} > (n-1)\, t_{об}.$$

Простои станков равны нулю ($\Delta t_с = 0$), а простои ТЗР составляют

$$\Delta t_р = t_{шт} - (n-1)\, t_{об}.$$

III. *Время обработки $t_{шт}$ меньше времени обслуживания:*

$$t_{шт} < (n-1)\, t_{об}.$$

Простои ТЗР равны нулю ($\Delta t_р = 0$), а простои станков составляют

$$\Delta t_с = (n-1)\, t_{об} - t_{шт}.$$

По результатам моделирования одноканальной СМО строят график простоев оборудования для различных значений $\alpha = \frac{\lambda}{\mu}$ (или $\alpha = \frac{t_{об}}{t_{шт}}$) при заданном $t_{об} = \text{const}$ и переменным $t_{шт} = \text{var}$, где α – относительная интенсивность потока заявок на обслуживание; λ – интенсивность поступления заявок; μ – интенсивность обслуживания заявки.

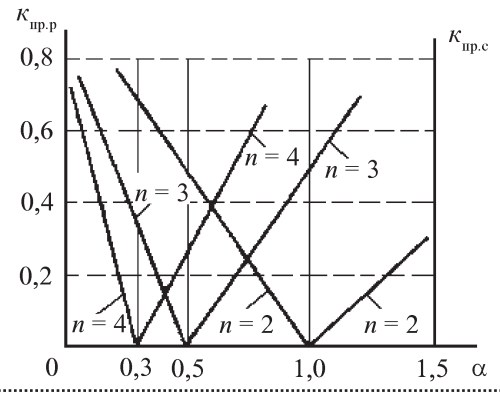

Рис. 3. График простоев ТО и ТЗР, построенный по результатам моделирования одноканальной СМО с ожиданием

Коэффициент простоя станков

$$k_{пр.с} = \frac{\Delta t_с}{t_{шт} + \Delta t_с},$$

а коэффициент простоя ТЗР

$$k_{пр.р} = \frac{\Delta t_р}{t_{об} + \Delta t_р}.$$

Приведем пример построения графика простоев для заданных значений α = 0,33; 0,5; 1,0; 1,5 и $t_{об}$ = 15 мин (рис. 3). Всем точкам на оси абсцисс α соответствуют нулевые простои оборудования, так как в этих точках выдерживается расчетное время $t_{шт}$.

1. Определим $t_{шт}$ для α = 0,33:

$$t_{шт} = \frac{t_{об}}{\alpha} = 15/0{,}33 = 45 \text{ мин}.$$

Оптимальное число обслуживаемых станков

$$n_{опт} = 45/15 + 1 = 4.$$

Простои станков и ТЗР

$$\Delta t_с = (4-1)\cdot 15 - 45 = 0; \quad \Delta t_р = 45 - (4-1)\cdot 15 = 0.$$

Соответственно коэффициенты простоев: $k_{пр.с}$ = 0 и $k_{пр.р}$ = 0.

Чтобы сохранить нулевые простои оборудования при меньшем времени $t_{шт}$ = 30 мин (соответственно α = 0,5), необходимо обслуживать n = 3 станка.

Если при этом сохранить $n_{опт}$ = 4, то возникнут простои станков, равные

$$\Delta t_с = (4-1)\cdot 15 - 30 = 15 \text{ мин}.$$

Коэффициент простоя станков будет равен

$$k_{пр.с} = 15/(30+15) = 0{,}33.$$

При $t_{шт} = 75$ мин (соответственно $\alpha = 0,2$) необходимо обслуживать $n = 5$ станков. Если при этом сохранить $n_{опт} = 4$, то возникнут простои ТЗР, равные $\Delta t_р = 75 - (4-1)\cdot 15 = 30$ мин. Коэффициент простоя ТЗР будет равен

$$k_{пр.р} = 30 / (3 \cdot 15 + 30) = 0,4.$$

2. Определим $t_{шт}$ для $\alpha = 0,5$:

$$t_{шт} = 15 / 0,5 = 30 \text{ мин}.$$

Оптимальное число обслуживаемых станков

$$N_{опт} = 30 / 15 + 1 = 3.$$

При меньшем $t_{шт} = 15$ мин и $\alpha = 1$ получим:

$$n = 2;\ \Delta t_с = (3-1)\cdot 15 - 15 = 15 \text{ мин};$$
$$k_{пр.с} = 15/(15+15) = 0,5.$$

При большем $t_{шт} = 45$ мин и $\alpha = 0,33$ получим:

$$n = 4;\ \Delta t_р = 45 - (3-1)\cdot 15 = 15 \text{ мин};$$
$$k_{пр.р} = 15/(2 \cdot 15 + 15) = 0,33.$$

3. Определим $t_{шт}$ для $\alpha = 1$:

$$t_{шт} = 15/1 = 15 \text{ мин}.$$

Оптимальное число обслуживаемых станков

$$N_{опт} = 15/15 + 1 = 2.$$

При меньшем $t_{шт} = 10$ мин и $\alpha = 1,5$ получим:

$$n = 1;\quad \Delta t_с = (2-1)\cdot 15 - 10 = 5 \text{ мин};$$
$$k_{пр.с} = 5/(10+5) = 0,33.$$

При большем $t_{шт} = 30$ мин и $\alpha = 0,5$ получим:

$$n = 3;\quad \Delta t_р = 30 - (2-1)\cdot 15 = 15 \text{ мин};$$
$$k_{пр.р} = 15/(1 \cdot 15 + 15) = 0,5.$$

4. Определим $t_{шт}$ для $\alpha = 1,5$:

$$t_{шт} = 15/1,5 = 10 \text{ мин}.$$

Оптимальное число обслуживаемых станков

$$N_{опт} = 10/15 + 1 = 1,66.$$

Так как ТЗР не может обслуживать 1,66 станка, то реально принимаем

$$N_{опт} \approx 1 \text{ станок}.$$

Это означает, что в этих условиях каждый станок автоматического участка должен быть оснащен индивидуальным загрузочным роботом.

Вывод

Оптимальное число единиц $n_{опт}$ технологического оборудования, обслуживаемого одним роботом, определяется из условия, когда простои станков и ТЗР равны нулю. Для ситуации с $\alpha > 1$ каждый станок автоматического участка должен быть оснащен индивидуальным ТЗР.

Библиографический список

1. **Иванов А.А.** Автоматизация технологических процессов и производств: учеб. пособие. М.: Форум, 2011. 224 с.

2. **Иванов А.А.** Теоретические основы процессов манипулирования объектами обработки и сборки. Нижн. Новгород: НГТУ, 2009. 257 с.

УДК 621.9.06

С.Я. Березин, *д-р техн. наук (Забайкальский государственный университет, г. Чита),*
Л.С. Романова, *канд. техн. наук (Забайкальский государственный гуманитарно-педагогический университет им. Н.Г. Чернышевского)*
E-mail: Kurlser@yandex.ru

Патроны для резьбонарезных и сборочных операций со специальными функциями*

Рассмотрены конструкции патронов, применяемых в производственной и исследовательской практике для достижения целей, не связанных с традиционными функциями стандартной вспомогательной оснастки, ориентированной на обработку резьбы и завинчивание крепежных изделий.

The types of the chucks applied in manufacturing and research practice to achievement of the objectives, not connected with traditional functions of the standard supplementary equipment directed to tapping on processing of a carving and screwing up of fasteners are considered.

Ключевые слова: резьбонарезание, сборка, завинчивание, патрон, вспомогательная оснастка, шпиндель, метчик, крепежная деталь, копирование.

Keywords: thread-forming, assembly, screwing, tape, supplementary equipment, spindle, screw tap, fastener, copying.

6. Патроны для компенсации подрезающего осевого усилия при работе метчиков

В работе [1] были приведены результаты исследований осевых сил, возникающих в период внедрения заходной части метчика и приводящих к подрезанию профиля начальных ниток резьбы. Подрезанию также способствует нескомпенсированность осевых активных и реактивных усилий, несовпадение подачи и шага нарезаемой резьбы.

Необходимо заметить, что принудительная подача при нарезании на станках с ЧПУ не дает гарантии качества начальных ниток из-за осевой податливости элементов патрона и крепления метчика. Поэтому, в отдельных случаях, применение специальных компенсирующих патронов весьма эффективно.

Существуют устройства, в которых метчик поджимается к заготовке пружиной, создающей осевое усилие при врезании. Это компенсирует рассогласование подачи с шагом резьбы. Однако этот метод недостаточно эффективен в силу того, что осевая сила изменяет свое значение по мере врезания и зависит от разных факторов: колебания твердости материала, износа инструмента, формы заходной части и т.д.

Для обеспечения оптимального усилия врезания устанавливают функциональную связь осевого усилия с переменной окружающей силой, действующей при нарезании резьбы. Такая связь проявляется в конструкциях патронной оснастки с кулачковыми устройствами. Схема работы подобного патрона приведена на рис. 10, *а*.

Метчик *1* закреплен в держателе *2*, несущем кулачок *3*, который своим скосом контактирует с толкателем *4*, закрепленным на торце корпуса *5*. Цилиндрический хвостовик *6* свободно базируется в отверстии корпуса *5*. Последний установлен в инструментальном шпинделе, сообщающем осевую подачу.

При контакте метчика с заготовкой возникает окружная сила резания P_z, поворачивающая держатель *2*. При этом кулачок *3* скользит своим скосом по толкателю *4*, а держатель, поворачиваясь, смещается вдоль оси.

От взаимодействия кулачка *3* с толкателем *4* возникает окружная сила $P_т$, уравновешивающая силу P_z, и осевая сила $P_о$, противодействующая осевой силе резания P_x. В течение всего периода врезания кулачок *3* скользит по толкателю *4*, благодаря чему сохраняется постоянным отношение сил $P_о$ и $P_т$, определяемое конструктивными размерами патрона.

По окончании врезания поводок *7* касается поверхности Б, после чего держатель *2* продолжает выдвигаться из корпуса, не создавая осевой силы

* Окончание. Начало статьи в № 6 за 2013 г.

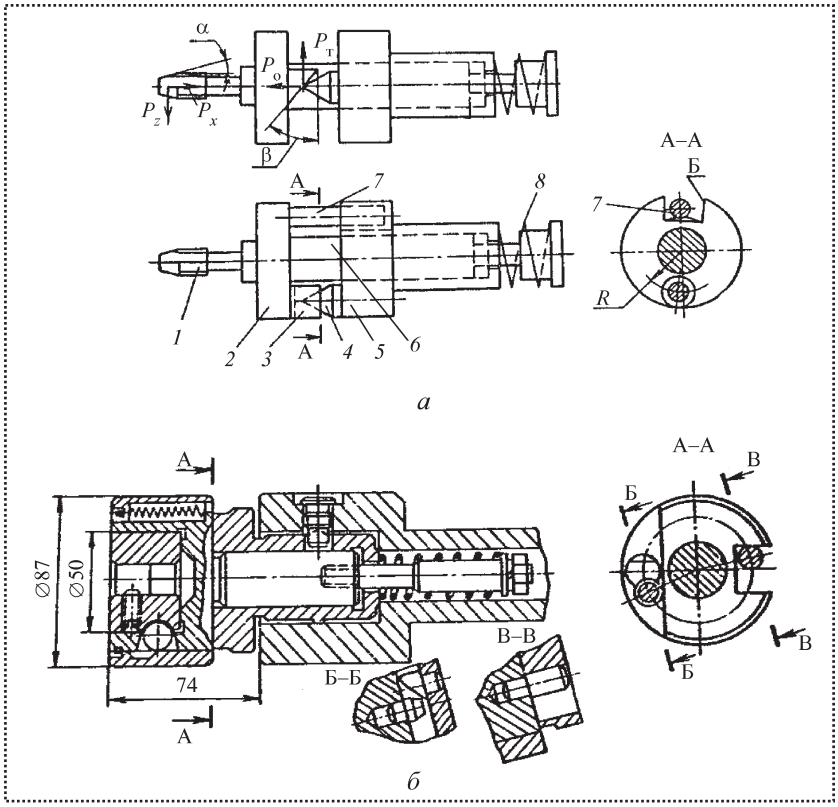

Рис. 10. Патрон для компенсации осевых усилий:
а – схема работы; *б* – конструкция патрона

подачи инструмента. При вывинчивании поводок *7* предотвращает вращение держателя *2* и пружина *8* возвращает патрон в исходное положение.

Автор работы [1] установил функциональную зависимость угла β скоса кулачка от конструктивных параметров патрона и значений действующих сил. Разработана номограмма для удобства определения этого угла. На рис. 10, *б* представлена конструкция подобного патрона для нарезания резьб диаметром 8...27 мм на шестишпиндельных токарных автоматах. По данным этого же автора такие патроны исключают брак и повышают стойкость инструмента.

Подобными разработками занимались и другие специалисты. Известны конструкции подобной оснастки для компенсации осевых сил, в которой применялись копирные линейки, винтовые шариковые передачи, шарнирные рычаги и линейки, дифференциальные винты, протарированные крутильные пружины и другие механизмы [2, 3]. Известна масса отечественных изобретений таких устройств, например, а.с. 534309 от 19.05.1977, а.с. 621507 от 30.08.1978, а.с. 804264 от 15.02.1981 и др.

7. Патроны для вибрационной ориентации метчиков и крепежных деталей при автоматизированных процессах резьбонарезания и сборки

Автоматическая ориентация метчиков при резьбонарезании или крепежных изделий при их сборке является серьезной проблемой, решаемой, в том числе, и при помощи патронов различных конструкций. Идея подобных патронов с электромагнитной виброориентацией была предложена А.М. Гирелем, Н.М. Карелиным и другими еще в 1974 г. в изобретении для ориентации гаек (а.с. 438512 от 05.08.1974). В дальнейшем эта группа авторов разработала вибропатроны для стержневых и изогнутых гаечных метчиков [4].

Одна из таких конструкций представлена на рис. 11. В конструкцию патрона входит оправка *2*, закрепленная винтами *3* в утолщенной части державки с конусом Морзе *1*. На верхней части оправки на шарикоподшипниках *4* располагается диск *5*, к которому шпильками *6* прикреплен статор *9* асинхронного электродвигателя трехфазного переменного тока.

Между диском и статором на кронштейне *7* установлена рукоятка *8*, входящая в кольцевую проточку зубчатой муфты *18*, замыкаемой действием пружины *19*.

Крутящий момент от шпинделя станка на эту полумуфту передается посредством штифта *17*. В нижней части оправки размещена с зазором зубчатая полумуфта *16*, находящаяся под действием пружины *15* и имеющая шариковые опоры качения *14*. В торце полумуфты по посадке с зазором расположена державка *13* для установки метчика. Державка имеет возможность осевого смещения действием пружины *12*, смягчающей взаимодействия, возникающие при контактах метчика с заготовкой в процессе их относительной ориентации.

На полумуфте *16* находится втулка *10*, выполняющая роль ротора и закрепленная винтами *11*, служащая для экспериментального подбора зазора между ротором *10* и статором *9*.

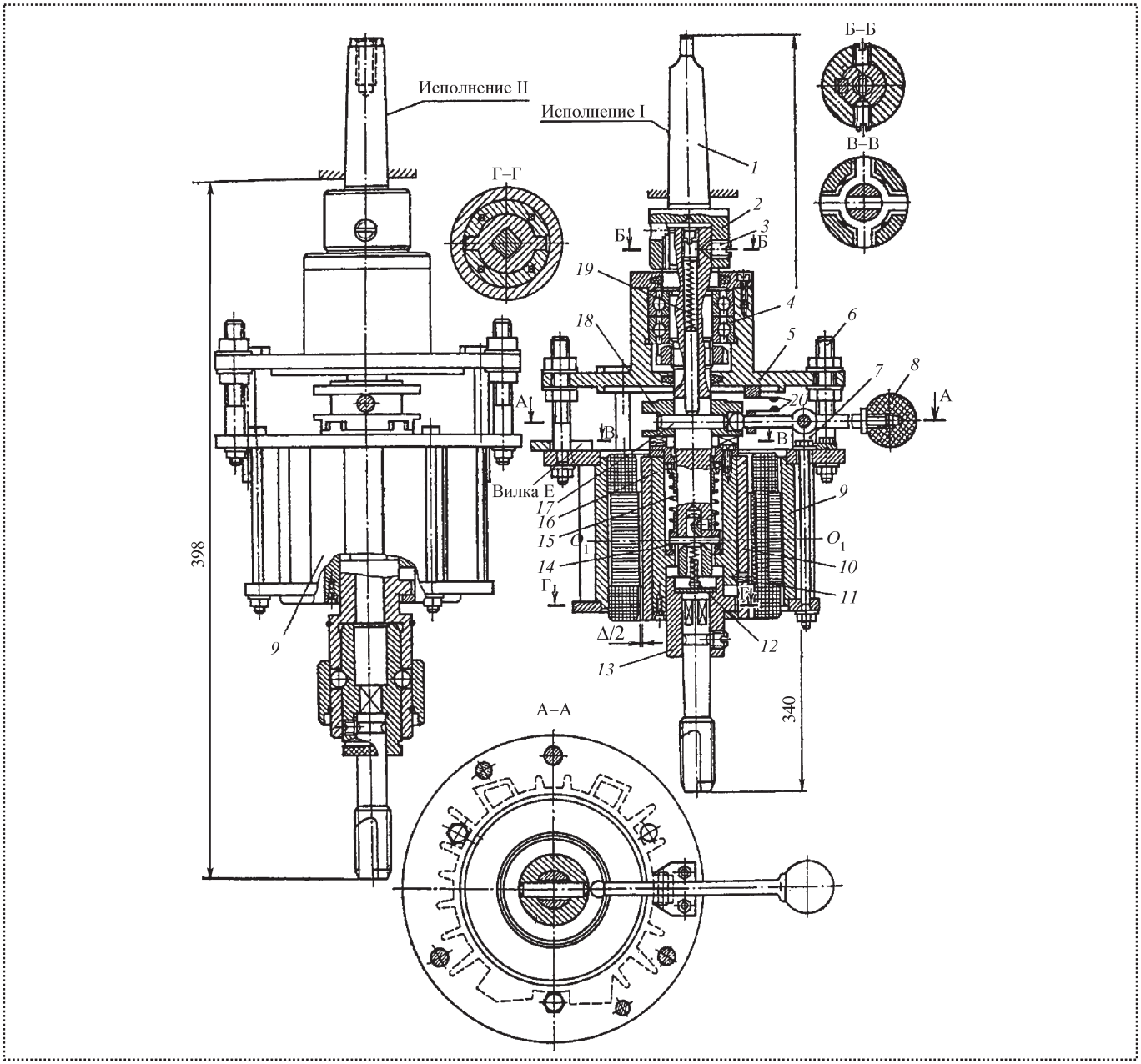

Рис. 11. Патрон для вибрационной ориентации метчиков при автоматизированном резьбонарезании

Работа патрона заключается в следующем. При включенном станке оператор опускает рукоятку *8* вниз; при этом замыкаются контакты *20*, включающие питание статора и происходит автоматическая ориентация метчика относительно отверстия заготовки путем планетарного перекатывания ротора *10* по внутренней поверхности статора *9*. После отпускания оператором рукоятки *8* полумуфты соединяются, и происходит обычный процесс нарезания резьбы.

Интерес к вибрационно-ориентирующей оснастке не ослабевает и в настоящее время. Известны конструкции патронов американских изобретателей по патентам US 2009/0064828 и US 2004/0121848, в которых предлагаются изделия с различными типами активаторов ротационного и вибрационного движений (рис. 12).

Патрон, изображенный на рис. 12, *а*, предназначен для вибрационной ориентации винтов при автоматической сборке и практически идентичен конструкции А.М. Гиреля и др. В состав элементов

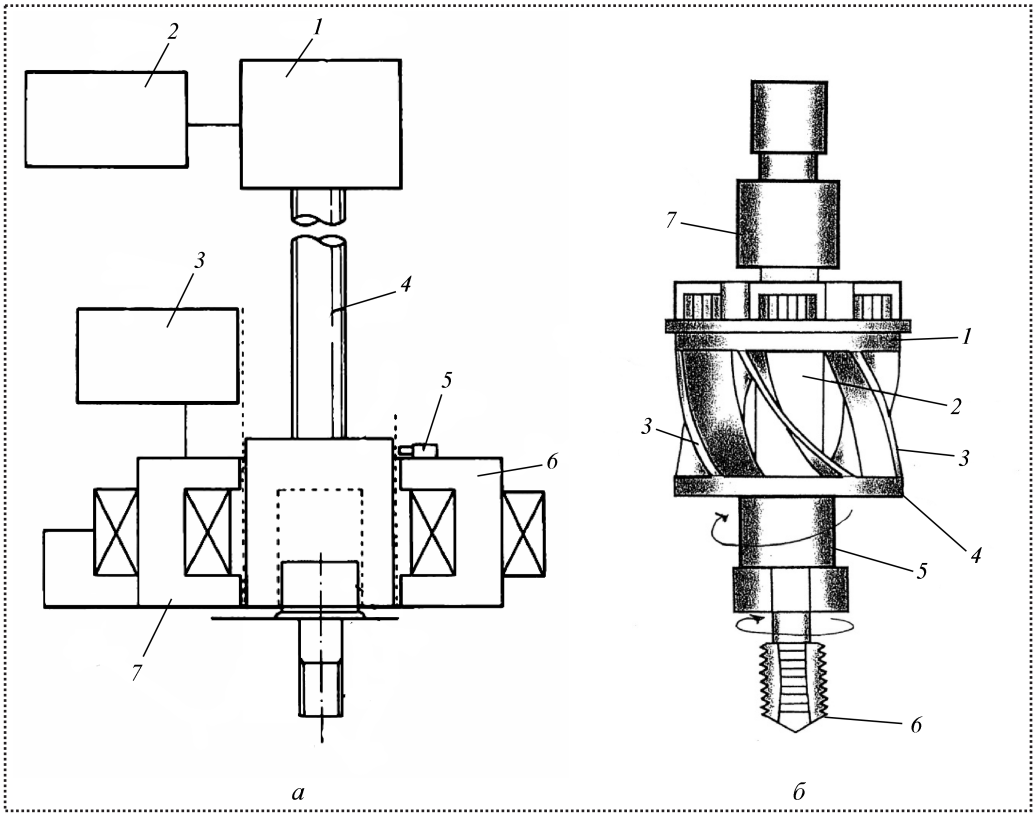

Рис. 12. Конструкции вибрационно-ориентирующих патронов американских изобретателей:
а – патент US 2009/0064828;
б – патент US 2004/0121848

патрона входят: *1* – датчик ротационного движения; *2* – контроллер движения; *3* – блок контроля соединения; *4* – валовая передача; *5* – датчик смещения; *6* – электромагнитный привод; *7* – компенсатор реактивных сил.

Патрон конструкции Bi Zhang, изображенный на рис. 12, *б*, реализует две цели. Во-первых, он способствует ориентации метчика на начальном этапе его контакта с отверстием, а во-вторых, он активирует резьбонарезание, снижая усилия резания путем придания метчику крутильно-осевых колебаний по траектории, близкой к винтовой линии резьбы.

Патрон содержит верхнюю и нижнюю платформы *1* и *4*, между которыми закреплен активатор колебаний *2*. Платформы, кроме того, связаны косыми упругими балками *3*. Метчик *6* установлен в держателе *5*, а верхняя платформа *1* жестко связана с приводным хвостовиком *7*. Активирующая часть патрона, по данным автора изобретения, может быть разной, например электромагнитной или пьезоэлектрической.

Известны и другие виды оснастки, в состав которых входят электромагнитные механизмы, например, для захвата головок винтов и удерживания их в процессе сборки, а также для намагничивания винтов с целью ориентации относительно отверстия.

8. Патроны с адаптивными функциями

В процессе сборки резьбовых соединений возможно несовпадение ниток резьбы винта и отверстия. В этом случае может произойти обрыв ниток или их смятие. Для устранения такого брака были разработаны патроны или головки к винтовёртам, обладающие адаптивными функциями, т.е. они содержали механизмы, чувствительные к ситуации заклинивания.

Свойства таких устройств были подробно описаны в работе [5] В.А. Яхимовичем и группой соавторов. Такие патроны требуют применения дополнительной энергии для реализации функции управления. В частности в патроне по а.с. 956269 от 07.09.1982 используется пневматика.

Принцип работы адаптивных устройств можно рассмотреть на кинематической схеме, представленной на рис. 13. Завинчивающая головка выполнена на базе дифференциальной конической передачи и состоит из ведущего вала *1*, соединенного с водилом *3* посредством пружинно-шариковой

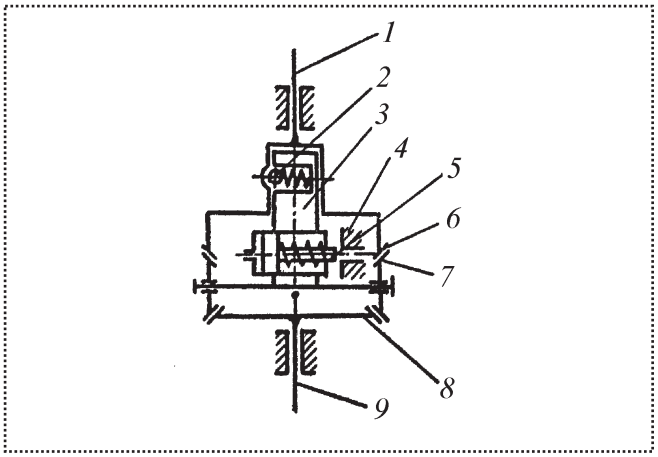

Рис. 13. Кинематическая схема адаптивной завинчивающей головки

муфты *2*, а со шпинделем *9* – посредством зубчатого колеса *6*, сателлитов *7* и зубчатого колеса *8*. В корпус водила встроен поршень *4*, который своим штоком может фиксировать водило относительно корпуса *5*.

Во время работы головки ведущий вал *1* вместе с зубчатым колесом *6* постоянно вращается в направлении ввинчивания. Через муфту *2* это вращение передается водилу с сателлитами *7* и далее на колесо *8* и шпиндель *9*. Таким образом, ведущий вал *1* с колесом *6*, водило *3* с поршнем и сателлитами *7* и шпиндель *9* с колесом *8* вращаются вместе, как одно целое.

Если происходит заклинивание резьбы сопрягаемых деталей, шпиндель и колесо *8* останавливаются, а ведущий вал и колесо *6* продолжают вращение. В результате этого дифференциал начинает работать как планетарный механизм. При этом водило *3* вращается в том же направлении, что и ведущий вал, но в два раза медленнее. За счет этого срабатывает муфта *2*, что является сигналом для подачи сжатого воздуха к поршню *4*, который своим штоком соединяется с корпусом *5*, и водило останавливается.

При остановленном водиле дифференциальная коническая передача превращается в простую зубчатую передачу, а сателлиты *7* становятся паразитными колесами, из-за чего колесо *8* со шпинделем начинает вращаться в противоположную сторону. В этом случае шпиндель *9* вращается с той же частотой, что и ведущий вал, но в противоположную сторону.

Когда ведущий вал совершит полный оборот относительно водила, шпиндель совершит больше половины обратного оборота. После этого ведущий вал и водило снова соединяются посредством муфты *2*, так как после одного оборота ведущего вала его гнездо и шарик совпадают. Полость под поршнем сообщается с атмосферой, его шток выходит из отверстия *5*, а водило вместе с ведущим валом и шпинделем начинают вращаться в направлении завинчивания.

9. Выключающиеся и реверсивные патроны

В практике резьбонарезания и сборки резьбовых соединений возникают случаи, когда необходимо обеспечить точную глубину завинчивания метчика или крепежной детали в отверстие. Это особенно важно при нарезании конических резьб, резьб в глухих отверстиях (нарезание резьбы в упор) или при завинчивании резьбовых изделий с точной высотой выступающей части, например головок толкателей.

Для таких операций разрабатывают патроны с функциями выключения вращения шпинделя при достижении требуемой глубины завинчивания и реверсивные патроны, переключающие вращение с прямого на обратное при том же условии. В первом случае обратное вращение обеспечивается не патроном, а станком.

Одними из первых изобретений этого типа оснастки являются самовыключающиеся патроны Б.И. Мудрова (а.с. 89598 от 01.01.1950) и Д.Г. Христофорова, А.М. Гиреля (а.с. 123024 от 3.11.1958). Конструктивные признаки последнего из них просматриваются в стандарте ГОСТ 21938–76 "Патроны для нарезания резьб на токарных станках". В дальнейшем были разработки и других авторов, описанные в изобретениях по а.с. 482271 от 24.06.1976, а.с. 763040 от 15.09.1980 и др.

Конструкция выключающегося патрона представлена на рис. 14, *а*. Прекращение процесса нарезания резьбы в нем происходит в результате соприкосновения регулируемого упора с обрабатываемой деталью. Прекращение резьбонарезания и реверс осуществляются с помощью муфты обгона, встроенной в патрон. Упор *1* ввинчен в гайку *2*, соединенную резьбой с подвижным стаканом *7*, который вращается вместе с хвостовиком *6* патрона благодаря наличию двух направляющих шпонок *5*, входящих в продольные пазы стакана. Под действием пружины *8* стакан с упором *1* занимает крайнее переднее (выдвинутое) положение относительно хвостовика патрона. Упором при этом служит крышка *9*.

Вместе с хвостовиком и стаканом вращается также державка метчика *4*, в один из шести пазов кото-

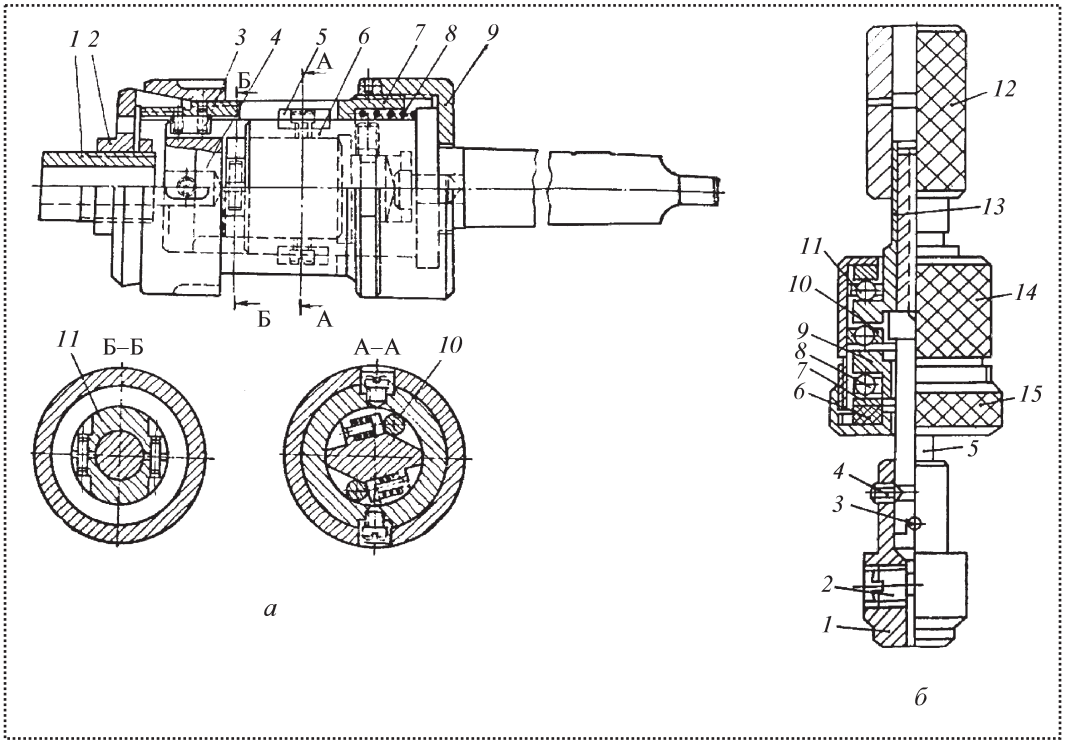

Рис. 14. Выключающийся патрон с муфтой обгона (*а*) и реверсивный патрон с шариковой передачей (*б*)

рой входит шпонка *3*, закрепленная в стакане. Метчик установлен в квадратном отверстии державки. При упоре патрона в торец нарезаемой детали перемещение стакана прекращается. В то же время метчик с державкой *4* и хвостовиком патрона продолжает совершать подачу и нарезать резьбу до тех пор, пока шпонка *3* не выйдет из паза державки метчика.

С этого момента вращение державки с метчиком, а следовательно, и подача прекращаются, т.е. резьба нарезана на требуемую глубину. Хвостовик патрона со шпинделем продолжают вращаться, чему не препятствует муфта обгона (см. сечение А–А). При переключении станком вращения на противоположное муфта обгона роликами *10* снова захватывает шпонками *5* стакан *7* и державку *4* с метчиком, который начинает вывинчиваться из нарезанного отверстия. После отвода метчика шпонка *3* возвращается в один из шести пазов державки пружиной *8* и патрон готов для работы со следующим отверстием. В сечении Б–Б показан хомутик *11*, ограничивающий осевое смещение роликов обгонной муфты.

Реверсивные резьбонарезные патроны применяют в случаях, когда неэффективно часто производить реверс шпинделя станка, например, при обработке группы резьбовых отверстий. Реверсивная механика патронов строится на основе фрикционных и зубчатых передач. Фрикционные реверсивные патроны применяют для нарезания мелких резьб, в основном до М6. Они не требуют значительных крутящих моментов и переключаются вручную. Фрикционные передачи используют шариковые или с коническими роликами. Зубчатые передачи основаны на принципе работы конических трензелей с муфтовым переключением вращения с прямого на обратное, по типу передачи, указанной на рис. 13. На рис. 14, *б* представлена конструкция шарикового реверсивного патрона для вертикально-сверлильных станков.

Патрон состоит из метчикодержателя *1*, закрепленного на поводке *5* при помощи винта *4*. Крутящий момент метчикодержателю передается штифтом *3*. Хвостовик метчика крепится винтом *2*, а поводок *5* и весь реверсивный механизм собраны в корпусе *14*. Механизм состоит из двух упорных подшипников *8* с упорными кольцами *7*, включая реверсивное кольцо *9*, сепаратор *10* с шариками *11* и грибком *13*. Весь комплект обжимается в корпусе *14* гайкой *15* через резиновое кольцо *6*. Сепаратор *10* плотно сидит на внутренней поверхности корпуса *14*. Для связи патрона со шпинделем станка служит конусная втулка *12*. При нарезке резьбы поводок прижимается к грибку *13* и передает крутящий момент метчикодержателю. Для реверса необходимо поднять корпус *14* в крайнее верхнее по-

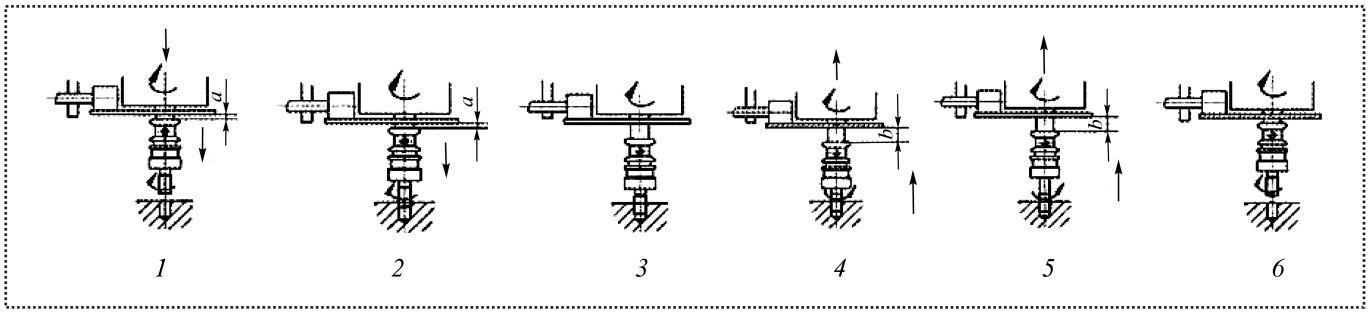

Рис. 15. Схема работы реверсивных патронов фирм Tapmatic и Titan Tool (США), INO Machinery (Польша), Nikken (Япония), TACO (Индия) и др.

ложение. При этом поводок *5* выходит из зацепления с грибком и стыкуется с реверсивным кольцом *9* и получает обратное вращение, вывинчивая метчик из отверстия. Патрон, кроме того, позволяет визуально контролировать процесс и своевременно удалять стружку реверсом, избегая заклинивания.

Патроны с зубчатыми реверсивными коническими механизмами не требуют комментариев, так как широко распространены и выпускаются известными компаниями США, Японии, Германии, Франции, Италии и др. Исторически они, наверняка, одни из самых старых. В нашей стране известно изобретение Э.С. Павловского по а.с. 13671 от 31.03.1930. Однако до сих пор их конструкции усовершенствуются (см. патент US 5096343 от 17.03.1992).

На рис. 15 показана схема работы патронов известных фирм. Патроны снабжены удерживающим поводком, связанным с базой станка. На 1-й фазе включается прямое вращение шпинделя и подвод метчика к отверстию. На 2-й фазе производится наживление, на 3-й – завинчивание с выдвижением пиноли патрона из корпуса. На 4-й фазе выдвинутая пиноль переключает реверсивную муфту и вращение метчика изменяется на обратное. На 5-й фазе идет вывинчивание метчика и втягивание пиноли, на 6-й – патрон переключается и возвращается в исходное положение.

10. Резьбонарезные патроны с подводом смазочно-охлаждающих жидкостей под давлением

Необходимость применения смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) вносит определенные коррективы и в конструкции резьбонарезающих патронов. На практике используют два способа подвода СОЖ к зоне резьбообразования: поливом сверху и с внутренним подводом через метчик, имеющий каналы в перьях. Первый способ не требует высокого давления и может применяться для смазывания контактной зоны жидкими смазками. Второй применяется для нагнетания СОЖ под давлением в достаточно широком диапазоне (0,5...5,0 МПа) внутрь отверстия через каналы метчика. Для обоих способов производят патроны, несущие специальные элементы, позволяющие реализовать схемы подвода, указанные на рис. 16. Их можно объединить в две основные группы:

1) с подводом СОЖ через шпиндель станка;

2) независимая – от внешнего трубопровода к патрубку, закрепленному в неподвижной обойме вращающегося патрона.

В 1-й группе СОЖ поступает через шпиндель и центральное отверстие патрона к метчику или от шпинделя к отверстиям в верхней фланцевой плоскости хвостовика патрона (см. вариант А, рис. 17, *а*). В последнем случае торцовые поверхности хвостовика и шпинделя должны быть уплотнены (см. вариант Б).

При 2-й, независимой, схеме корпус патрона установлен на опорах качения внутри обоймы, несущей подводящий патрубок и неподвижно связанной после установки патрона с базой станка. Обойма имеет гидравлические уплотнения для передачи СОЖ от патрубка к обойме и далее к патрону и метчику (см. рис. 17, *б*).

При поливе сверху обойма служит просто держателем патрубка и подающей трубки. Такие патроны выпускаются фирмой Nikken, экземпляр которых представлен на рис. 17, *в*.

Резьбонарезная и завинчивающая оснастка постоянно совершенствуется, расширяется ее номенклатура и назначение. В настоящем обзоре охвачены далеко не все области ее применения. Патроны разрабатывают не только для основных операций резьбообразования и сборки, но и для определенного круга сопутствующих операций.

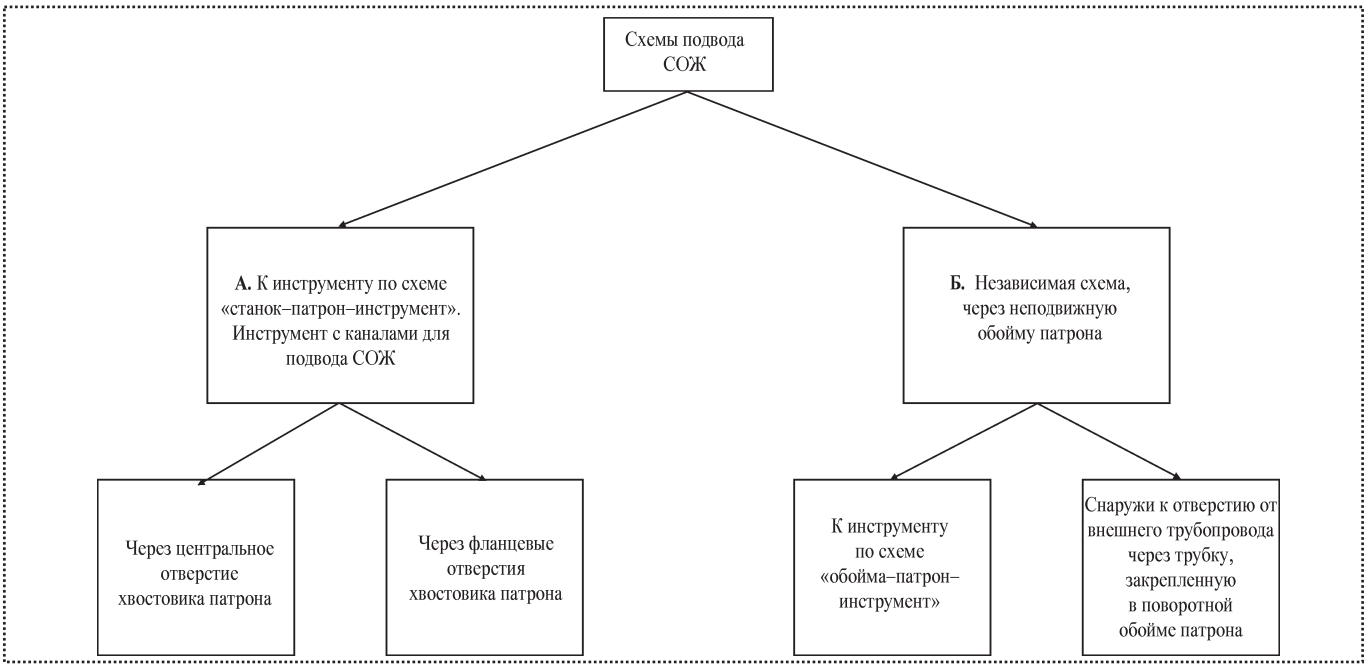

Рис. 16. Схемы подвода СОЖ в различных исполнениях патронов

Известны конструкции для измерения позиционных отверстий под крепежную резьбу, самоцентрирующиеся патроны или патроны того же назначения, но имеющие внешние устройства центрирования, патроны и головки для подачи интенсифицирующих воздействий на зону резьбообразования в виде ультразвука или электронагрева, патроны с электронными приборами контроля за параметрами выполнения операций и много других.

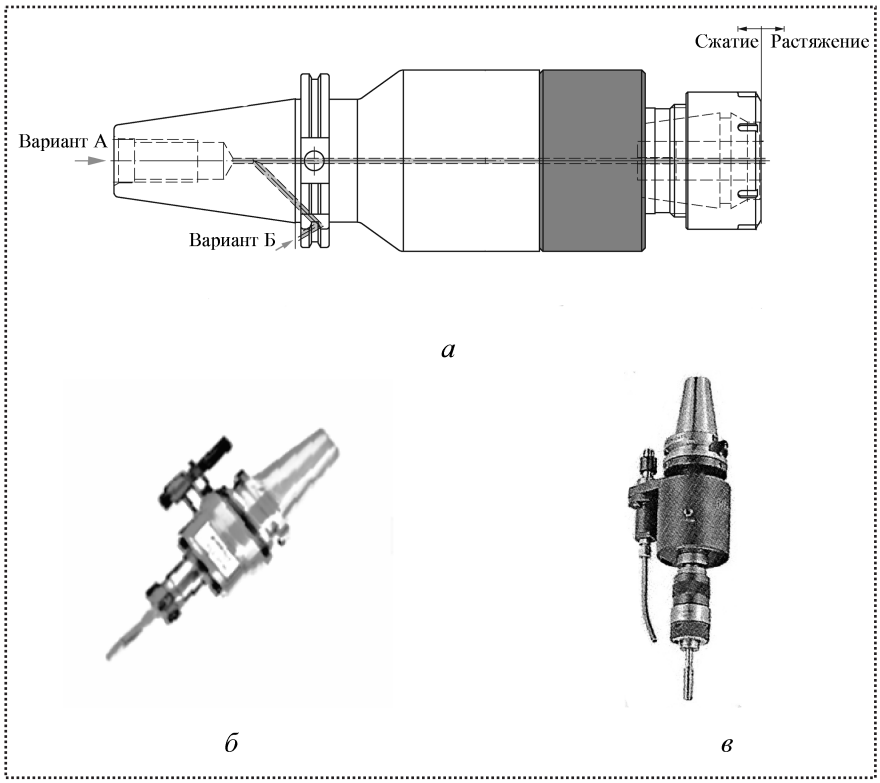

Рис. 17. Примеры патронов ведущих инструментальных фирм:
а – патрон KSN/HD/Softsynchro фирмы EMUGE (Германия) по DIN 69871, работающий по схемам А1, А2; *б* – патроны OHDC, OHSL фирмы Dine Dinox, Ю.Корея (схема Б1); *в* – патроны ZR12 фирмы Nikken, Япония (схема Б2)

Библиографический список

1. **Мосенкис М.Г.** Резьбонарезной патрон с автоматическим регулированием осевого усилия // СТИН. 1971. № 12. С. 24–25.

2. **Выбойщик В.Н.** Повышение точности резьбонарезания при работе с принудительной подачей инструмента // Исследования в области технологии образования наружных и внутренних резьб, резьбообразующих инструментов, станков и методов контроля резьб: сб. статей Тульского политехнического института. Тула: ТПИ, 1974. С. 40–48.

3. **Матвеев В.В.** Нарезание точных резьб. М.: Машиностроение, 1978. 88 с.

4. **Гирель А.М.** Автоматизация нарезания резьб комплектом метчиков во вращающемся магнитном поле: обзор. Сер. С-6-3. М.: НИИмаш, 1978. 58 с.

5. **Яхимович В.А., Головащенко В.Е., Кулинич И.Я.** Автоматизация сборки резьбовых соединений. Львов: Изд-во Львовского ун-та, 1982. 160 с.

УДК 62–755; 621.317.4

Р.М. Гоцеридзе, *канд. техн. наук,*
С.В. Румянцев *(МГТУ им. Н.Э. Баумана)*
E-mail: sergio1961@bk.ru

Определение параметров неуравновешенности поплавкового чувствительного элемента с магниторезонансным подвесом методом измерения угла фазового сдвига

Описан фазовый метод измерения параметров неуравновешенности при помощи магниторезонансного подвеса, служащего в качестве опор, и датчиков перемещений. Рассмотрены возможности повышения точности измерений за счет применения фазового метода с цифровой обработкой сигнала.

It is described phase method of the measurement parameters unbalance with the help of magnetic-resonance suspension, serving as footprint and sensor of displacement. It is considered possibilities of increasing to precision of the measurements due to using the phase method with digital signal processing.

Ключевые слова: магниторезонансный подвес, поплавковый чувствительный элемент, балансировка, фазовый сдвиг, преобразователь фаза–время, время-импульсное преобразование.

Keywords: magnetic-resonance suspension, floating detector element, balancing, phase shift, phase-time converter, time-pulsed transformation.

В космической и авиационной технике широко применяют инерционные системы ориентации и навигации на основе поплавковых гироскопических узлов и акселерометров. Поплавковые инерционные датчики отличаются от других типов датчиков навигации высокой степенью стабильности и надежности при сохранении высоких значений чувствительности и точности. В этих приборах инерционным датчиком является поплавковый чувствительный элемент (ПЧЭ), погруженный в жидкость. Жидкость выполняет функцию демпфирующей и смазывающей среды, осуществляет разгрузку опор чувствительного элемента и уменьшает трение за счет создания нулевой плавучести, а также является естественным интегратором в алгоритме работы инерционного датчика.

Важным этапом повышения качеств ПЧЭ (точности и чувствительности) было применение в его конструкции электромагнитных опор, которые полностью устраняют механическое трение за счет левитации (подвешивания) чувствительного элемента в электромагнитном поле. Жидкость, имеющая определенную вязкость, удачно выполняет здесь роль электромеханического демпфера, подавляя автоколебания ротора ПЧЭ в электромагнитном подвесе.

Наибольшее распространение в конструкции гироскопов и акселерометров получил электромагнитный подвес резонансного типа (магниторезонансный подвес), работающий на переменном токе. Магниторезонансный подвес (МРП) имеет малые габариты и массу и по своей конструкции значительно проще подвесов с внешней системой регулирования. Используют МРП уже сравнительно давно, они надежны и устойчивы при работе в составе инерционных датчиков.

Кроме того, МРП нашел удачное применение и в технологическом процессе производства ПЧЭ, а именно на этапе статической балансировки – благодаря тому, что МРП обладает свойствами высокоточного датчика сил и угловых или линейных перемещений (при соответствующей конструкции подвеса), что позволяет измерять параметры неуравновешенности ПЧЭ с последующей их корректировкой. Преимуществом МРП как датчика сил и перемещений является широкий выбор возможностей и методов получения информации о параметрах неуравновешенности (или внешних инерционных воздействиях). МРП может работать как преобразователь перемещение–ток, перемещение–напряжение, перемещение–фаза. То же касается и

преобразования силы в соответствующий электрический сигнал.

Каждый из способов преобразования перемещения в электрический сигнал имеет свои преимущества и недостатки. Рассмотрим особенности этих способов преобразования.

Как преобразователь перемещение–ток МРП позволяет измерять перемещение или силу с высокой точностью, но требует наличия высокоточных токоизмерительных резисторов. Эти резисторы несколько уменьшают добротность резонансного контура МРП и его несущую способность. Требуются чувствительные и высокостабильные усилители для измерения тока, что несколько усложняет схему измерения.

Как преобразователь перемещение–напряжение МРП имеет точность и линейность несколько ниже, чем в случае измерения тока (из-за нелинейных искажений сигнала). Но значительные уровни снимаемых с обмоток МРП напряжений дают возможность получать хорошую чувствительность при невысоких требованиях к точности и чувствительности электроники. Предварительные калибровка и тарирование измерительного тракта (для учета нелинейности) позволяют получать достаточно точные результаты измерений и с хорошей чувствительностью.

Как преобразователь напряжение–фаза МРП до недавнего времени был наименее изучен и не имел широкого распространения, в основном из-за достаточно сложной его реализации через аналоговую электронику, при использовании которой сложно было получить достаточно точные и стабильные результаты. Однако с развитием цифровой и компьютерной техники появились новые возможности реализации этого метода измерения, которые позволяют повысить чувствительность и точность измерений, а применение компьютерной обработки (на основе персонального компьютера) позволяет существенно упростить электронную часть обработки сигнала. Эти преимущества появились благодаря переходу от метода измерения амплитуд сигнала к методу измерения интервалов времени, пропорциональных углу фазового сдвига сигналов переменного тока, т.е. к осуществлению преобразования фаза–время (ПФВ). ПФВ позволяет избавиться от таких недостатков, присущих аналоговым (амплитудным) измерениям, как дрейф нуля усиления из-за температурной нестабильности,

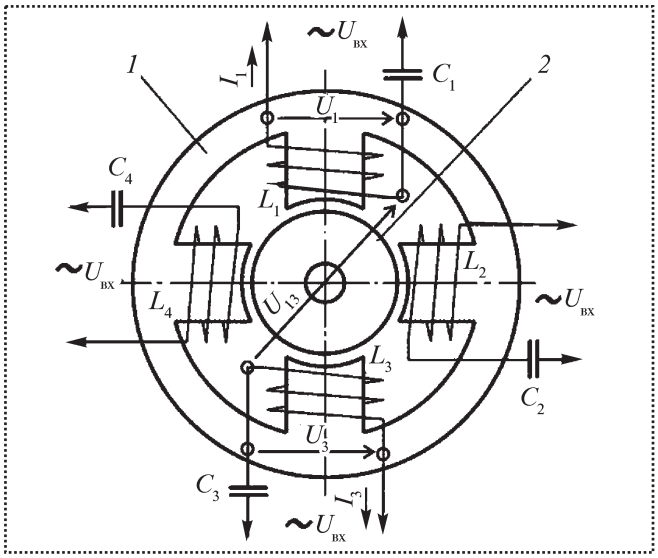

Рис. 1. Схема МРП

подверженность воздействию внешних электрических помех и электрических наводок, погрешностей аналого-цифрового преобразования.

Рассмотрим сущность фазового метода измерений и его возможности при использовании МРП как датчика сил и линейных перемещений.

Математическая модель фазового метода измерения параметров неуравновешенности ПЧЭ была рассмотрена в работе [1] . Коротко напомним основные теоретические положения этого метода.

Электромеханическая схема МРП (рис. 1) состоит из статора *1* с обмотками возбуждения $L1$–$L4$, создающих центрирующую силу для ротора *2*, связанного с ПЧЭ. Каждая из *LC*-ветвей МРП подключена к источнику переменного напряжения $U_{вх}$ со стабилизированными частотой и амплитудой.

Для электрической цепи МРП, изображенной на рис. 1, в работе [1] были выведены выражения для токов в вертикальных обмотках полюсов статора. В комплексной форме записи эти выражения имеют следующий вид:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{I}_к}{1 + \frac{x_{L1}}{Z} e^{g\varphi}}; \quad \dot{I}_3 = \frac{\dot{I}_к}{1 + \frac{x_{L3}}{Z} e^{g\varphi}}, \qquad (1)$$

где $\dot{I}_к$ – постоянная величина, равная силе тока в цепи МРП с короткозамкнутой катушкой;

x_{L1} и x_{L3} – индуктивное сопротивление цепей МРП с $L1$ и $L3$ соответственно;

Z – сумма активной и емкостной составляющих полного сопротивления цепи МРП;

g – мнимая единица;

φ – угол фазового сдвига между токами $\dot{I}_1$ и $\dot{I}_3$.

Уравнения (1) представляют собой уравнения окружности в комплексной форме записи. Поэтому при изменении параметров x_{L1} и x_{L3}, т.е. при смещении ротора МРП относительно его центрального положения, годографами векторов $\dot{I}_1$ и $\dot{I}_3$ будут окружности.

При центральном положении ротора *1* МРП (в случае отсутствия неуравновешенности) $x_{L1} = x_{L3}$ и $\dot{I}_1 = \dot{I}_3$. Разность фаз φ между токами при этом будет равна нулю. При наличии неуравновешенности ПЧЭ ротор МРП смещается из центрального положения, при этом токи $\dot{I}_1$ и $\dot{I}_3$ будут иметь различные амплитуды и фазы. Изменение токов будет приводить к изменению напряжений на конденсаторах $C1$ и $C3$, а следовательно, и фазы между $\dot{U}_1$ и $\dot{U}_3$. Выражение для напряжений в вертикальных обмотках МРП согласно работе [1] будут иметь следующий вид:

$$\dot{U}_1 = Z\,\dot{I}_1; \quad \dot{U}_3 = Z\,\dot{I}_3. \qquad (2)$$

При центральном положении ротора МРП (в случае отсутствия неуравновешенности) $x_{L1} = x_{L3}$, $\dot{I}_1 = \dot{I}_3, \dot{U}_1 = \dot{U}_3$ и φ = 0. При смещении ротора от центрального положения разность фаз φ зависит от значения этого смещения, а знак разности фаз – от направления смещения.

Два случая смещения ротора показаны на рис. 2: *а* – вверх, *б* – вниз. Годографом векторов $\dot{U}_1$ и $\dot{U}_3$ так же, как и при $\dot{I}_1$ и $\dot{I}_3$, будет окружность. При смещении ротора вверх индуктивность $L1$ увеличивается, а индуктивность $L3$ уменьшается, что приводит к уменьшению модуля напряжения $\dot{U}_1$ и увеличению модуля напряжения $\dot{U}_3$.

Смещение ротора на такую же величину вниз иллюстрируется рис. 2, *б*. В силу симметричности схемы векторы $\dot{U}_1$ и $\dot{U}_3$ здесь как бы меняются местами по сравнению с рис. 2, *а*, что приводит к изменению знака разности векторов и фазового угла φ. Векторы напряжений $\dot{U}_{10} = \dot{U}_{30}$ соответствуют центральному положению ротора и совпадают по амплитуде и по фазе.

В работе [1] метод измерения параметров неуравновешенности ПЧЭ заключался в том, что измерением амплитуды и фазы напряжения $\dot{U}_{13}$ между средними точками контуров $L1$ и $L3$ (см. рис. 1) определяется значение и направление смещения ротора МРП, вызванного неуравновешенностью ПЧЭ. В данной статье предложен метод измерения только ***угла фазового сдвига*** без измерения амплитуды.

Фазовый угол между векторами $\dot{U}_1$ и $\dot{U}_3$ при смещении ротора МРП вверх или вниз будет иметь соответственно положительное или отрицательное значение (см. рис. 2) и по модулю будет пропорционален значению смещения ротора. Из этого следует, что сущность предлагаемого метода измерения параметров неуравновешенности ПЧЭ заключается в том, что, измеряя фазовый угол между

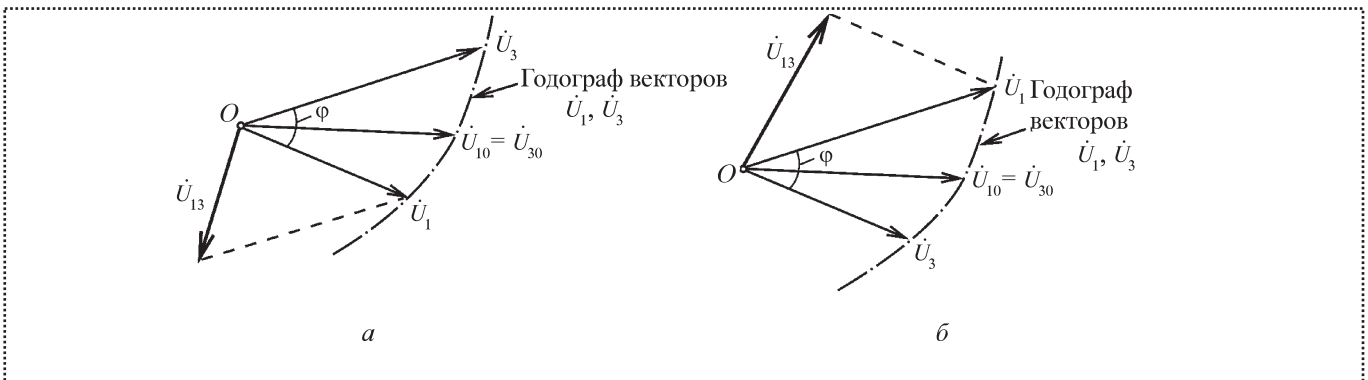

Рис. 2. Смещение фаз напряжений при смещении ротора

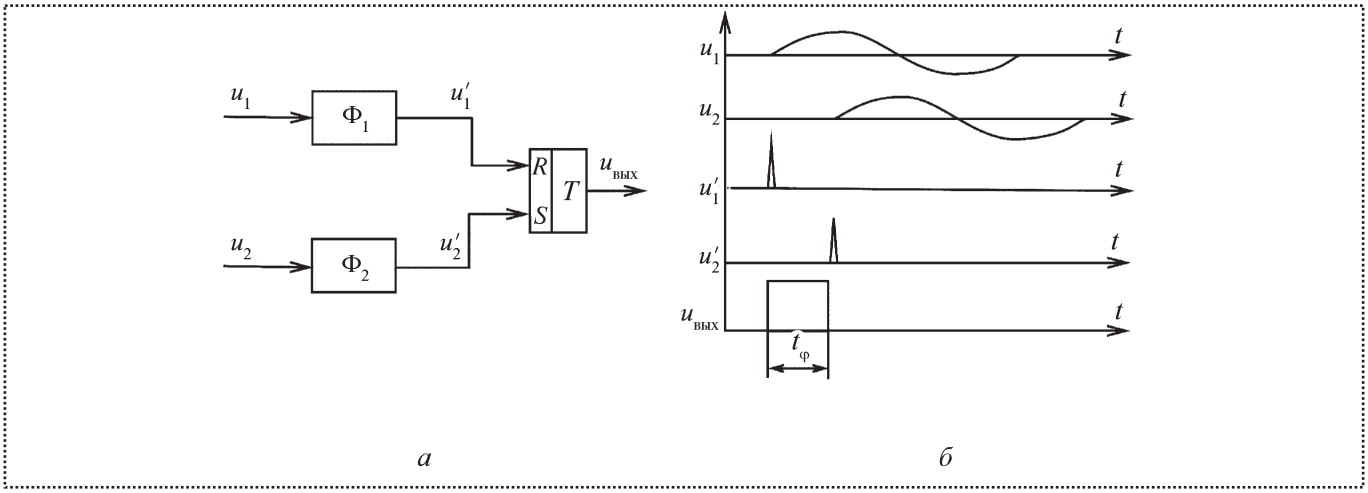

Рис. 3. Преобразователь фаза–время (*а*) и диаграмма его работы (*б*)

векторами $\dot{U}_1$ и $\dot{U}_3$, можно определить значение и направление смещения ротора МРП, вызванного неуравновешенностью ПЧЭ.

Рассмотрим принципы построения блока измерения (рис. 3), реализующего метод измерения фазового сдвига и преобразования его в цифровой код. Эти методы основаны на преобразовании угла фазового сдвига в интервал времени и заполнении полученного интервала времени счетными импульсами известной частоты. В общем случае фазовые измерители, построенные на данном методе, содержат преобразователь угла фазового сдвига в интервал времени, времяимпульсный преобразователь и устройство подсчета числа импульсов за период измерения.

Главной частью фазоизмерительной схемы является ПФВ. Наиболее простым решением ПФВ является однополупериодный триггерный преобразователь (рис. 3, *а*). Он состоит из двух формирователей коротких импульсов Ф1 и Ф2, а также *RS*-триггера *T*. Исследуемые напряжения u_1 и u_2 подаются на входы формирователей Ф1 и Ф2, которые при переходе напряжения из отрицательного в положительное формируют импульсы u_1' и u_2', поступающие на входы триггера *T*. На выходе триггера получается импульс, длительность t_φ которого пропорциональна углу φ фазового сдвига:

$$t_\varphi = \varphi \frac{T}{360},$$

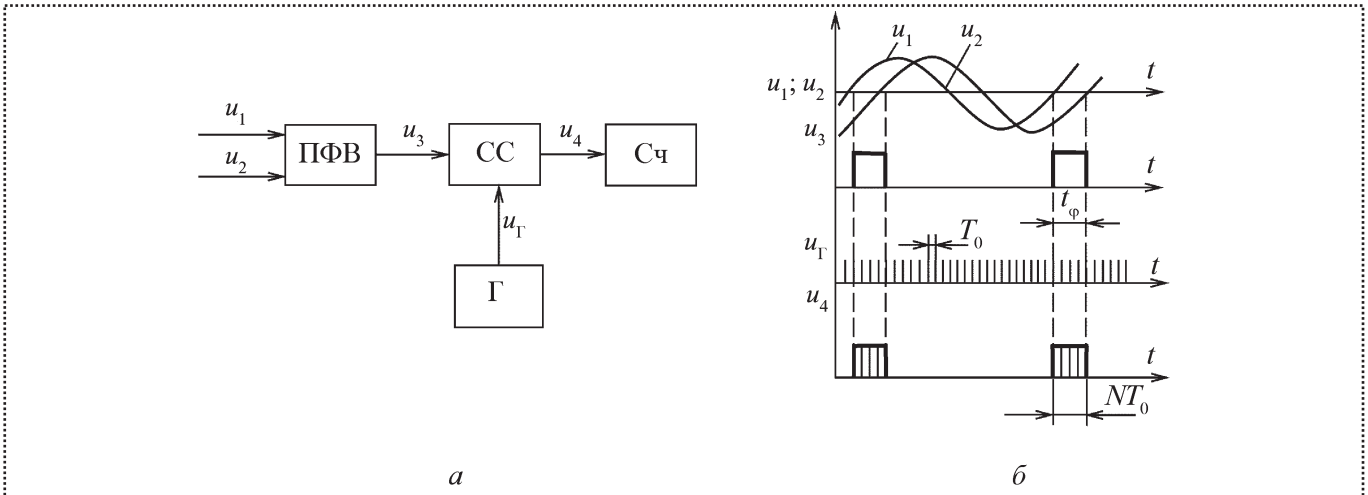

Рис. 4. Измерение фазового сдвига преобразованием время – число импульсов: времяимпульсный преобразователь (*а*) и его рабочая диаграмма (*б*)

где T – период входного сигнала.

Схема времяимпульсного преобразователя со счетчиком импульсов показана на рис. 4, *а*. Преобразование фазового сигнала в код здесь производится за один период исследуемого напряжения. Устройство состоит из ПФВ, схемы совпадения СС, генератора квантующих импульсов Г и счетчика Сч.

Угол фазового сигнала между напряжениями u_1 и u_2 преобразуется в сигнал u_3 длительностью t_φ (рис. 4, *б*), который поступает на схему совпадения СС (см. рис. 4, *а*). На выходе схемы совпадения получаем импульсы, число N которых пропорционально t_φ, т.е. углу фазового сдвига:

$$N = t_\varphi / T_0,$$

где T_0 – период счетных импульсов. Так как $t_\varphi = \varphi \frac{T}{360}$, то

$$N = \varphi \frac{T}{T_0} \frac{1}{360}.$$

При номинальном значении угла фазового сдвига $\varphi_{ном} = 360°$ число импульсов

$$N_{ном} = T / T_0.$$

Погрешность измерения угла фазового сдвига при частоте квантующего сигнала $f_0 = 100$ МГц и частоте входных напряжений 14 кГц составляет $\delta_0 = 0{,}05°$, что является очень хорошим показателем точности.

Устройство сопряжения измерителя фазы с персональным компьютером может быть выполнено по различным схемным решениям. Наиболее простым и дешевым вариантом сопряжения является подключение счетчиков фазометра через параллельный порт принтера с разделением по времени старшего и младшего байта информации о фазовом сдвиге в цифровом коде. При этом скорость передачи информации будет не слишком высокой, но для целей балансировки ПЧЭ в жидкости она вполне приемлема.

Выводы

1. Фазовый метод измерения параметров неуравновешенности ПЧЭ, в отличие от методов измерения амплитуд напряжений и токов, отличается существенными преимуществами:

- *не требуется высокая точность усиления входного сигнала;*
- *исключается дрейф нуля усиления и температурная нестабильность, нет подверженности воздействию внешних электрических помех и электрических наводок, не требуется аналого-цифрового преобразования сигнала.*

2. Фазовый метод измерения с преобразованием фаза–время позволяет производить измерение фазы с высокой точностью и стабильностью, осуществлять непосредственное преобразование фазы в цифровой код.

3. Времяимпульсный метод измерения угла фазового сдвига является перспективным методом измерения, позволяющим гибко управлять значениями чувствительности и точности измерений, вводить в процесс измерения методы компьютерной автоматизации.

Библиографический список

1. **Гоцеридзе Р.М.** Фазовый метод измерения плавучести и дифферента поплавковых чувствительных элементов // Техника машиностроения. 2002. № 1. С. 86–89.

2. **А.с. СССР № 983476.** Устройство для балансировки поплавковых чувствительных элементов / Р.М. Гоцеридзе, Л.И. Коцюбинский, Ю.Е. Нитусов. Опубликовано 23.12.1982. Бюллетень № 47.

3. **Кузнецов В.А., Долгов В.А.** Измерения в электронике: справочник. М.: ЕЕ Медиа, 2012. 512 с.

УДК 621.865.8+519.688

А.П. Лукинов, *канд. техн. наук,* **А.Н. Сыромятин**
(Московский государственный технологический университет "СТАНКИН")
E-mail: redwindrider@gmail.com

Оптимизация и оценка робастности силовых замыканий антропоморфной сборочной оснастки

Предложена математическая модель силового замыкания, алгоритмы оптимизации усилий замыкания и оценки робастности гарантированного удержания объектов в антропоморфных захватных устройствах сборочных машин при многоточечном контакте с трением.

The force-closure mathematical model, closing efforts optimization algorithm and objects of manipulation robustness rating secure holding by assembly equipment anthropomorphic gripper in the presence of multipoint contacts with friction are considered.

Ключевые слова: антропоморфное захватное устройство, математические условия гарантированного удержания, оптимизация силового замыкания.

Keywords: anthropomorphic gripper, secure holding mathematical conditions, optimization of force-closure.

Введение

При автоматизации сборочных операций с помощью роботов или сборочных машин все чаще применяют оснастку в виде захватных устройств, сходных с рукой человека [1] (рис. 1), получившую название антропоморфного захватного устройства (АЗУ, anthropomorphic gripper).

Роботы, оснащенные АЗУ и системой технического зрения, могут без смены рабочего органа проводить множество операций:

- загружать/выгружать детали различных физических свойств и различающейся геометрии;
- базировать заготовки;
- осуществлять сборочные работы, которые не подразумевают деформации деталей при соединении (рис. 2);
- удерживать и подавать специальный инструмент при сборке агрегатов на резьбовых соединениях и подавать крепежные элементы и т.д.

Состоящие из трех трехзвенных кинематических цепей АЗУ могут помочь автоматизировать трудоемкие процессы, в ходе которых нужно обрабатывать от 5 до 20 деталей (заготовок) различной конфигурации и требуется смена захватного устройства. В таких процессах АЗУ сможет сэкономить время на переналадку и смену инструмента и снизить затраты на оснастку [1]. Роботы, оснащенные АЗУ, могут

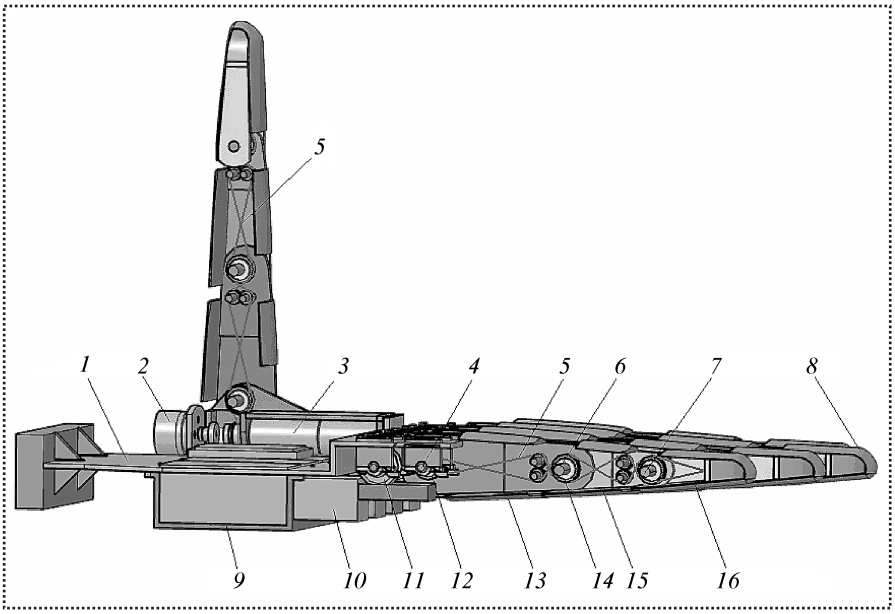

Рис. 1. Пример технической реализации АЗУ:
1 – несущая плита; *2*, *3*, *10* – электродвигатели; *4*, *6*, *7* – оси фаланг; *5* – тяговый трос; *8* – облицовка фаланги ; *9* – скоба; *11* – передача зубчатая рейка – зубчатое колесо; *12*, *14* – шкив тросовой передачи; *15* – фаланга; *16* – корпус фаланги

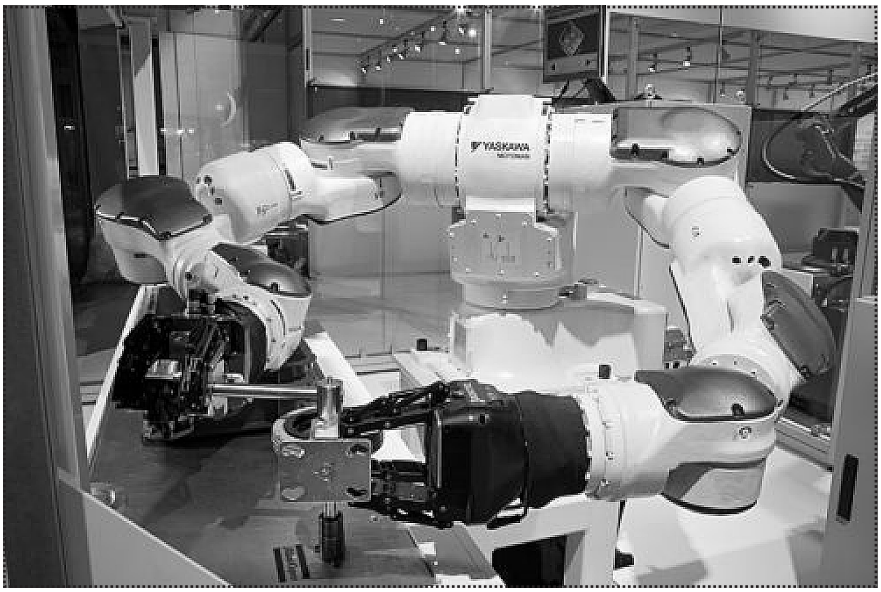

Рис. 2. Робот с двумя манипуляторами, оснащенными трехпальцевыми АЗУ, проводит сборочную операцию [1]

производить сборку крупногабаритных конструкций, а также сборку узлов и агрегатов автомобилей на конвейере.

Элементы таких схватов принято называть по аналогии с рукой человека, например, ладонь, палец, фаланга, сустав пальца. Хотя двигательные возможности АЗУ (15...16 суставов) пока ниже, чем у руки человека (35 суставов), функциональные возможности АЗУ позволяют решать задачи, не достижимые для традиционных клещевых схватов.

Такие АЗУ могут обеспечить множественный контакт с монтируемой деталью (далее объектом манипулирования – ОМ), что делает АЗУ безальтернативными при так называемой "деликатной сборке" из хрупких, пластичных, нежестких деталей. Удержание детали в АЗУ достигается обеспечением условий геометрического или силового замыкания, при которых смещение и/или изменение ориентации детали в базовой системе координат (БСК) $\{x, y, z\}$ АЗУ не выходит за допуски на смещение и/или на изменение ориентации. При автоматизированной сборке система управления должна "знать", что после замыкания пальцев и при осуществлении перемещения детали в зону базирования, деталь не изменит своего положения и ориентации в АЗУ и сборка будет реализована с требуемой точностью.

Эта задача может решаться "обучением", т.е. формированием программы управления АЗУ оператором сборочной машины. Такое обучение, особенно при дозировании усилий замыкания, трудоемко и дорого, а поэтому эффективно только в массовом производстве.

Второй путь решения этой проблемы – это разработка алгоритмов, по которым на основании некоторого множества исходных данных можно рассчитать:

- логический признак того, что захваченный объект будет удержан схватом при любых допустимых силах и моментах, приложенных к объекту;
- минимальные значения усилий, прикладываемых в точках контакта фаланг АЗУ с поверхностью детали, при которых гарантируется отсутствие поступательного и вращательного движения детали относительно системы координат АЗУ при допустимых значениях внешних сил и моментов;
- допустимые отклонения значений исходных данных, при которых сохраняются гарантии отсутствия поступательного и вращательного движения детали относительно системы координат АЗУ при допустимых значениях внешних сил и моментов.

Хотя научный и практический интерес к решению этой задачи велик, к настоящему времени известны только качественные ее исследования. Критерии гарантированного удержания объекта манипулирования в АЗУ при геометрическом замыкании приведены в работе [2], но возможности силового замыкания при автоматизации сборки гораздо шире, что делает решение поставленных задач актуальным. Замена процедур "обучения" расчетами резко сокращает расходы на технологическую подготовку сборочного производства, что и обеспечивает практическую ценность решения сформулированных ранее задач. Решению задач оценки гарантированного удержания объекта в АЗУ, оптимизации усилий замыкания в АЗУ и оценки робастности процедур замыкания при гарантированном удержании объектов в АЗУ и посвящена предлагаемая работа.

1. Принятые допущения и исходные данные, используемые в рамках данной работы, постановка задачи исследования

Принятые допущения и понятия:

• контакты представляются идеальными точками, принадлежащими локальной паре "сфера–плоскость", и эта точка для каждой фаланги единственна;

• активные силы со стороны фаланг и реакции в каждой контактной точке направлены по нормальной линии к сфере и плоскости;

• каждая точка, в которой возможен расчетный контакт с АЗУ, считается допустимой;

• допустимые точки, привлекаемые для решения выбранной задачи, считаются выделенными;

• окрестность ρ ($\| \rho \| > 0$) каждой выделенной i-й, $i = 1, 2, ..., I_к < \infty$, точки является выпуклым множеством и считается выделенной поверхностью $\mathbf{C}_i \supseteq \mathbf{C}$;

• каждая выделенная поверхность $\mathbf{C}_i \supseteq \mathbf{C}$ изотропна и обладает постоянной и известной верхней оценкой коэффициента трения покоя μ_i в точках контакта фаланг с ОМ: $0 < \mu_i \le 1 \ \forall i = 1, 2, ..., I_к$;

• на ОМ действуют допустимые внешние силы и моменты, такие, что вектор $\vec{F}_{вн} = (F_{вн_x}, F_{вн_y}, F_{вн_z})^T = (F_{вн_1}, F_{вн_2}, F_{вн_3})^T$ есть равнодействующая этих сил и момент $\vec{M}_{вн} = (M_{вн_x}, M_{вн_y}, M_{вн_z})^T = (M_{вн_1}, M_{вн_2}, M_{вн_3})^T$ есть равнодействующий момент моментов этих сил и внешних моментов, и векторы этих сил и моментов ограничены по модулю $0 < \| \vec{F}_{вн} \| = F_{вн} \le F_{вн_max} < \infty$, $0 \le \| \vec{M}_{вн} \| = M_{вн} \le M_{вн_max} < \infty$, но не ограничены по направлению;

• все замыкающие силы $\vec{F}_i$, $0 < \| \vec{F}_i \| = F_i \le F_{i_доп} < \infty$, $i = 1, 2, ..., I_к$ направлены по нормали к поверхности ОМ;

• силы реакции опор $\vec{R}_i = \| \vec{R}_i \| \vec{n}_i = R_i \vec{n}_i$, $i = I+1, I+2, ..., I_к$ совпадают по направлению с нормалями $\vec{n}_i$, $i = I, I+1, ..., I_к$ и являются односторонними;

• все конструктивные элементы АЗУ и ОМ обладают нулевой податливостью;

• начало координат БСК есть внутренняя точка множества $\mathbf{C}$;

• ОМ лишается подвижности за счет нормальных реакций связей и сил трения покоя, все остальные виды сил и моментов (извлекающие силы и моменты) могут вызвать поступательные и/или вращательные движения;

• все активные силы и моменты приведены к началу системы координат, жестко связанной с БСК АЗУ;

• до приложения любых сил и моментов ОМ был лишен поступательного и вращательного движения;

• все данные представляются в системе координат АЗУ (БСК АЗУ); $i = 1, 2, ..., I_к \le 18$ (для задач плоского замыкания $I_к \ge 2$, для задач пространственного замыкания $I_к \ge 3$).

Исходные данные (набор значений параметров замыкания, необходимый и достаточный для решения поставленной задачи) формируются априори или поступают с некоторого аппаратно-программного комплекса, например системы технического зрения и обработки данных, и включают в себя:

• рассчитанные координаты контактов фаланг пальцев АЗУ $C_i = C(x_i, y_i, z_i) \in \mathbf{C}$, $i = 1, 2, ..., I_к \le 18$, в форме массивов данных, которым соответствует также векторное представление выделенных точек в БСК – $\vec{C}_i = (x_i, y_i, z_i)^T$;

• нормированные векторы нормалей к поверхности $\mathbf{C}$ в точках C_i, $\vec{n}_i = (n_{i_x}, n_{i_y}, n_{i_z})^T = (n_{i_1}, n_{i_2}, n_{i_3})^T$; $\| \vec{n} \| = 1$;

• вектор внешних активных сил, $\vec{F}_{вн}$;

• вектор момента внешних сил $\overset{r}{M}_{\text{вн}}$; оценки коэффициентов трения в выделенных точках $\mu_i : \mu_{i_\text{н}} < \mu_i \le \mu_{i_\text{к}}$ и вектор, составленный из этих оценок $\overset{r}{\mu} = (\mu_1, \mu_2, ..., \mu_{1\,\text{к}})^T$;

• общую максимальную абсолютную неопределенность (погрешность) представления (измерения и расчета) исходных данных: Δ_c – неопределенность представления координат выделенных точек, Δ_n – неопределенность представления нормалей к поверхности в выделенных точках, Δ_μ – неопределенность знаний о трении в выделенных точках.

Для разработки программного обеспечения автоматического управления процессами замыкания и удержания объектов в АЗУ наряду с другими должны быть решены следующие задачи.

1. Задача оценки гарантированного удержания объекта захваченного АЗУ: "При заданных в системе координат, жестко связанной с АЗУ, значениях $C_i = C(x_i, y_i, z_i) \in \mathbf{C}$; $\overset{r}{n}_i = (n_{i_x}, n_{i_y}, n_{i_z})^T : \| \overset{r}{n} \| = 1$; $\overset{r}{\mu} = (\mu_1, \mu_2, ..., \mu_\text{к})^T$; $\overset{r}{F}_{\text{вн}}$; $\overset{r}{M}_{\text{вн}}$; F_i; $i = 1, 2, ..., I_\text{к} \le 18$, определить факт того, что объект лишается поступательного и вращательного движения".

2. Задача минимизации замыкающих усилий при сохранении гарантированного удержания объекта захваченного АЗУ: "При заданных в системе координат жестко связанной с АЗУ значениях $C_i = C(x_i, y_i, z_i) \in \mathbf{C}$; $\overset{r}{n}_i = (n_{i_x}, n_{i_y}, n_{i_z})^T : \| \overset{r}{n} \| = 1$; $\overset{r}{\mu} = (\mu_1, \mu_2, ..., \mu_\text{к})^T$; $\overset{r}{F}_{\text{вн}}$; $\overset{r}{M}_{\text{вн}}$; $i = 1, 2, ..., I_\text{к} \le 18$, найти значения F_i, $\forall i = 1, 2, ..., I_\text{к} \le 18 : Z(\overset{r}{F}) = \min \sum_{i=1}^{I_\text{к}} F_i$, $c_i \ge 0$, $\overset{r}{F} = (F_1, F_2, ..., F_{I_\text{к}})^T$, при которых объект лишается поступательного и вращательного движения".

3. Задача оценки робастности гарантированного удержания объекта захваченного АЗУ при неопределенности (погрешности) представления исходных данных: "При заданных в системе координат, жестко связанной с АЗУ, значениях: $C_i = C(x_i, y_i, z_i) \in \mathbf{C}$; $\overset{r}{n}_i = (n_{i_x}, n_{i_y}, n_{i_z})^T : \| \overset{r}{n} \| = 1$; $\overset{r}{\mu} = (\mu_1, \mu_2, ..., \mu_{I_\text{к}})^T$; $\overset{r}{F}_{\text{вн}}$; $\overset{r}{M}_{\text{вн}}$; F_i; $i = 1, 2, ..., I_\text{к} \le 18$, таких, что ОМ лишен поступательной и вращательной неподвижности, найти допустимые отклонения фактических значений параметров замыкания от исходных данных программ расчета, соответствующих этим параметрам: $\Delta x_i = |x_{i_\text{факт}} - x_i|$, $\Delta y = |y_{i_\text{факт}} - y_i|$, $\Delta z_i = |z_{i_\text{факт}} - z_i|$, $\Delta\mu_i = |\mu_{i_\text{факт}} - \mu_i|$, $i = 1, 2, ..., I_\text{к} \le 18$, при которых объект сохраняет поступательную и вращательную неподвижность".

2. Общие математические условия неподвижности трехмерных объектов в условиях силового замыкания АЗУ

Рассмотрим условия статического равновесия модели ОМ под действием системы удерживающих сил и внешних сил и моментов [3]

$$\begin{aligned}
&\sum_{i=1}^{I \le 15} F_i \overset{r}{n}_i + \sum_{i=I+1}^{I_\text{к} \le 18} R_i \overset{r}{n}_i + \sum_{i=1}^{I_\text{к} \le 18} \overset{r}{T}_i + \overset{r}{F}_{\text{вн}} = 0; \\
&\sum_{i=1}^{I \le 15} (\overset{i}{C}_r \times F_i \overset{r}{n}_i) + \sum_{i=I+1}^{I_\text{к} \le 18} (\overset{r}{C}_i \times R_i \overset{r}{n}_i) + \\
&+ \sum_{i=1}^{I_\text{к} \le 18} (\overset{r}{C}_i \times \overset{r}{T}_i) + \overset{r}{M}_{\text{вн}} = 0,
\end{aligned} \tag{1}$$

где $\overset{r}{T}_i$, $i = 1, 2, ..., I_\text{к} \le 18$ – векторы сил трения в точках контакта с направляющими векторами их линий действия $\overset{r}{\tau}_i$, $i = 1, 2, ..., I_\text{к}$, и евклидовой нормой (далее просто "нормой") сил трения: $\| \overset{r}{T}_i \| = T_i \le \mu_i F_i$, $i = 1, 2, ..., I$; $\| \overset{r}{T}_i \| = T_i \le \mu_i R_i$, $i = I+1, I+2, ..., I_\text{к}$.

Первое векторное уравнение системы (1) является статическим условием отсутствия поступательного движения ОМ, а второе – статическим условием отсутствия вращательного движения ОМ.

Запишем скалярный аналог векторной системы (1) как проекции векторов на оси БСК:

$$\begin{cases} \varphi_{f_1}(\mathbf{C},\mathbf{F},\mathbf{R},\ \mathbf{T},\ \overset{r}{F}_{\text{вн}}) = \sum\limits_{i=1}^{I\le 15} F_i\, n_{i-1} + \sum\limits_{i=I+1}^{I_{\text{к}}\le 18} R_i\, n_{i_1} + \sum\limits_{i=1}^{I_{\text{к}}\le 18} T_{a_i_1} + F_{\text{вн}_1} = 0; \\ \varphi_{f_2}(\mathbf{C},\mathbf{F},\mathbf{R},\ \mathbf{T},\ \overset{r}{F}_{\text{вн}}) = \sum\limits_{i=1}^{I\le 15} F_i\, n_{i-2} + \sum\limits_{i=I+1}^{I_{\text{к}}\le 18} R_i\, n_{i_2} + \sum\limits_{i=1}^{I_{\text{к}}\le 18} T_{a_i_2} + F_{\text{вн}_2} = 0; \\ \varphi_{f_3}(\mathbf{C},\mathbf{F},\mathbf{R},\ \mathbf{T},\ \overset{r}{F}_{\text{вн}}) = \sum\limits_{i=1}^{I\le 15} F_i\, n_{i-3} + \sum\limits_{i=I+1}^{I_{\text{к}}\le 18} R_i\, n_{i_3} + \sum\limits_{i=1}^{I_{\text{к}}\le 18} T_{a_i_3} + F_{\text{вн}_3} = 0; \\ \varphi_{r_4}(\mathbf{C},\mathbf{F},\mathbf{R},\ \mathbf{T},\ \overset{r}{M}_{\text{вн}}) = \sum\limits_{i=1}^{I\le 15} a_{i_4}(\overset{r}{n}_i, \overset{r}{C}_i)\ F_i + \sum\limits_{i=I+1}^{I_{\text{к}}\le 18} a_{i_4}(\overset{r}{n}_i, \overset{r}{C}_i) R_i + \sum\limits_{i=1}^{I_{\text{к}}\le 18} (T_{m_i_3}\ x_{i_2} - T_{m_i_2}\ x_{i_3}) + M_{\text{вн}_1} = 0; \\ \varphi_{r_5}(\mathbf{C},\mathbf{F},\mathbf{R},\ \mathbf{T},\ \overset{r}{M}_{\text{вн}}) = \sum\limits_{i=1}^{I\le 15} a_{i_5}(\overset{r}{n}_i, \overset{r}{C}_i)\ F_i + \sum\limits_{i=I+1}^{I_{\text{к}}\le 18} a_{i_5}(\overset{r}{n}_i, \overset{r}{C}_i) R_i + \sum\limits_{i=1}^{I_{\text{к}}\le 18} (T_{m_i_1}\ x_{i_3} - T_{m_i_3}\ x_{i_1}) + M_{\text{вн}_2} = 0; \\ \varphi_{r_6}(\mathbf{C},\mathbf{F},\mathbf{R},\ \mathbf{T},\ \overset{r}{M}_{\text{вн}}) = \sum\limits_{i=1}^{I\le 15} a_{i_6}(\overset{r}{n}_i, \overset{r}{C}_i)\ F_i + \sum\limits_{i=I+1}^{I_{\text{к}}\le 18} a_{i_6}(\overset{r}{n}_i, \overset{r}{C}_i) R_i + \sum\limits_{i=1}^{I_{\text{к}}\le 18} (T_{m_i_2}\ x_{i_1} - T_{m_i_1}\ x_{i_2}) + M_{\text{вн}_3} = 0; \end{cases} \quad (2)$$

где $T_{a_i_j}$ – проекция составляющей силы трения, препятствующей поступательному движению тела, $T_{a_i_j} \le \mu_i T_i$;

$T_{m_i_j}$ – проекция составляющей силы трения, препятствующей вращательному движению тела, $|T_{m_i_j}| \le \mu_i T_i$;

$a_{i_4}(\overset{r}{n}_i, \overset{r}{C}_i) = (n_{i_3}\, x_{i_2} - n_{i_2}\, x_{i_3})$, $a_{i_5}(\overset{r}{n}_i, \overset{r}{C}_i) = (n_{i_1}\, x_{i_3} - n_{i_3}\, x_{i_1})$, $a_{i_6}(\overset{r}{n}_i, \overset{r}{C}_i) = (n_{i_2}\, x_{i_1} - n_{i_1}\, x_{i_2})$;

$F_{\text{вн}_j}$, j=1, 2, 3 – проекция главного вектора внешних сил на j-ю ось БСК;

$M_{\text{вн}_j}$, $j = 1, 2, 3$ – проекция вектора главного момента внешних сил на j-ю ось БСК;

C, **F**, **R**, **μ** – множества значений исходных данных.

Из системы (2) видно, что она линейна относительно переменных: F_i, i=1, 2, ..., I; R_i, $i = I$+1, I+2, ..., $I_{\text{к}}$; $T_{a_i_j}$, i=1, 2, ..., I, j=1, 2, 3 – число которых при полном замыкании всеми фалангами может составлять до 72.

Систему (1) будем называть векторной моделью пространственного силового замыкания (СЗ) объекта в АЗУ, а систему (2) будем называть скалярной линейной моделью пространственного силового замыкания (СЗ) объекта в АЗУ. Система (2), отражающая взаимодействие пространственных сил и моментов, может быть легко преобразована в систему сил и моментов, действующих в плоскости, при:

$$x_{i_3} \equiv n_{i_3} \equiv a_{i_4}(\overset{r}{n}_i, \overset{r}{C}_i) \equiv a_{i_5}(\overset{r}{n}_i, \overset{r}{C}_i) \equiv T_{i_3} \equiv F_{\text{вн}_3} \equiv M_{\text{вн}_1} \equiv M_{\text{вн}_2} \equiv 0,$$

и поэтому в дальнейшем мы будем говорить только о пространственных замыканиях.

Очевидно, что модель (2) в рамках теории линейных систем разрешима только в частных случаях [4], и для решения поставленных задач мы обратимся к методам математического программирования, предварительно снизив размерность моделей замыкания.

3. Формирование моделей силового замыкания ОМ в АЗУ в терминах нелинейного программирования

Введем главный (равнодействующий) вектор активных сил и сил реакций опор [3]:

$$\overset{r}{\Sigma}_a = \sum_{i=1}^{I\le 15} F_i\, \overset{r}{n}_i + \sum_{i=I+1}^{I_{\text{к}}\le 18} R_i\, \overset{r}{n}_i + \overset{r}{F}_{\text{вн}} = 0, \quad (3)$$

и запишем нормированный вектор вектора $\vec{\Sigma}_a : \vec{\sigma}_a = \vec{\Sigma}_a / \|\vec{\Sigma}_a\|$, $\|\vec{\sigma}_a\| = 1$, а также главный (равнодействующий) [3] вектор моментов активных сил и сил реакций опор:

$$\vec{\Sigma}_{M_a} = \sum_{i=1}^{I \le 15} (\vec{C}_i \times \vec{F}_i \, \vec{n}_i) + \sum_{i=I+1}^{I_к \le 18} (\vec{C}_i \times \vec{R}_i \, \vec{n}_i) + \vec{M}_{вн} = 0 \qquad (4)$$

и его нормированное представление:

$$\vec{\sigma}_{M_a} = (\sigma_{M_{a_1}}, \sigma_{M_{a_2}}, \sigma_{M_{a_3}})^T : \|\vec{\sigma}_{M_a}\| = 1, \ \vec{\Sigma}_{M_a} = \|\Sigma_{M_a}\| \vec{\sigma}_{M_a} .$$

Составляющая силы трения в точке контакта, $\vec{T}_{a_1}$, $i = 1, 2, \ldots, I_к$, препятствующая действиям главных векторов сил и моментов, будет лежать в плоскости $Пл_{i_0}$ касательной к поверхности ОМ в точке C_i, $i = 1, 2, \ldots, I_к$ [4], определяемой нормалью n_i, $i = 1, 2, \ldots, I_к$. Направление этой силы априорно не известно, а норма этой силы отвечает неравенству

$$T_{a_i} = \|\vec{T}_{a_i}\| \le \mu_i F_i , \quad i = 1, 2, ..., I_к ,$$
$$T_{a_i} = \|\vec{T}_{a_i}\| \le \mu_i \|R_i\|, \quad i = I+1, I+2, \ldots, I_к .$$

Так как силы действия и противодействия, обеспечивающие статическое равновесие, должны лежать на одной прямой [3], то они должны лежать и в одной плоскости.

Проведем через линию действия вектора $\vec{\sigma}_a$ и точку C_i, $i = 1, 2, \ldots, I_к$, плоскость $Пл_{i_1}$, определяемую нормальным вектором, $\vec{\psi}_i = (\psi_{i_1}, \psi_{i_2}, \psi_{i_3})^T = \vec{\sigma}_a \times \vec{n}_i$.

Уравнение плоскости $Пл_{i_1}$ будет иметь вид [4]:

$$\psi_{i_1}(x - x_i) + \psi_{i_2}(y - y_i) + \psi_{i_3}(z - z_i) = 0 ;$$

а уравнение плоскости $Пл_{i_0}$ будет иметь вид:

$$n_{i_1}(x - x_i) + n_{i_2}(y - y_i) + n_{i_3}(z - z_i) = 0 .$$

Так как $\vec{T}_{a_i}$ должен лежать как в плоскости $Пл_{i_0}$, так и в плоскости $Пл_{i_1}$, то это условие выполняется только на линии пересечения этих плоскостей L_{i_1}, уравнение которой может быть получено известными методами [4] и будет определяться нормированным направляющим вектором [4] $\vec{\tau}_{l_{1_i}} = (\tau_{l_{1_i_1}}, \tau_{l_{1_i_2}}, \tau_{l_{1_i_3}})^T$, который с точностью до знака будет нормированным направляющим вектором силы трения, препятствующей действию активных сил.

Вектору $\vec{\Sigma}_a$ будет противодействовать трение в точке C_i, $i = 1, 2, \ldots, I_к$. Тогда в соответствии с законами трения [3] вектор силы трения $\vec{T}_{a_i}$ будет лежать на линии действия силы $\vec{\Sigma}_a$, линии L_{i_1}, что позволит определить знаки компонент вектора $\vec{\tau}_{a_i}$:

$$\tau_{a_i_j} = -\text{sign}(\Sigma_{a_j}) \cdot |\tau_{l_{1_i_j}}|, \quad j = 1, 2, 3, \qquad (5)$$

и вектор силы трения в i-й точке

$$\vec{T}_{a_i} : \vec{T}_{a_i} = \|\vec{T}_{a_i}\| \vec{\tau}_{a_i} = T_{a_i} \vec{\tau}_{a_i} ,$$

где о норме вектора $\overset{r}{T}_{a_i}$ известно только то, что $T_{a_i} \le \mu_i \; F_i \;\; \forall \; i = 1, 2, ..., I_к$.

Таким образом, мы получили компоненты векторов силы трения в точках C_i, участвующих в сопротивлении поступательному движению ОМ с точностью до оценок их модулей, выраженных через активные замыкающие силы.

Найдем такие же оценки векторов моментов трения. Проведем через точку C_i, $i = 1, 2, ..., I_к$, плоскость Пл_{i_2} перпендикулярна линии действия вектора $\overset{r}{\sigma}_{Ma}$, уравнение которой будет иметь вид [3]:

$$\sigma_{M_{a_1}}(x - x_i) + \sigma_{M_{a_2}}(y - y_i) + \sigma_{M_{a_3}}(z - z_i) = 0.$$

Составляющая вектора силы трения в i-й точке, препятствующая моменту активных сил, должна принадлежать одновременно и плоскости Пл_{i_0} и плоскости Пл_{i_2}, т.е. лежать на линии их пересечения L_{i_2} и будет определяться [4] направляющим нормированным вектором $\overset{r}{\tau}_{l_{2_i}}$ с координатами $\overset{r}{\tau}_{l_{2_i}} = (\tau_{l_{2_i_1}}, \tau_{l_{2_i_2}}, \tau_{l_{2_i_3}})^T$, который с точностью до знака будет нормированным направляющим вектором $\overset{r}{\tau}_{m_i}$ силы трения, препятствующей действию моментов активных сил.

Определим знаки компонент вектора $\overset{r}{\tau}_{m_i}$, так же как мы это сделали при определении знаков компонент вектора $\overset{r}{\tau}_{a_i}$:

$$\tau_{m_i_j} = -\text{sign}\,(\Sigma_{M_{a_j}}) \cdot |\tau_{l_{2_i_j}}|, \quad j = 1, 2, 3. \tag{6}$$

Использовав формулы (5) и (6), составим квадраты двух векторных сверток, положив $R_i = 0$, $i = I+1, ..., I_к$, что не изменяет смысла неравенств:

$$\varphi_a(\mathbf{C}, \mathbf{F}, \mathbf{R}, \boldsymbol{\mu}, \overset{r}{F}_{\text{вн}}) = \left(\sum_{i=1}^{I \le 15} F_i \, n_{i_1} + F_{\text{вн}_1}\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{I \le 15} F_i \, n_{i_2} + F_{\text{вн}_2}\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{I \le 15} F_i \, n_{i_3} + F_{\text{вн}_3}\right)^2 - \left(\sum_{i=1}^{I \le 15} \mu_i \, F_i \, |\tau_{l_{1_i_1}}|\right)^2 -$$
$$- \left(\sum_{i=1}^{I \le 15} \mu_i \, F_i \, |\tau_{l_{1_i_2}}|\right)^2 - \left(\sum_{i=1}^{I \le 15} \mu_i \, F_i \, |\tau_{l_{1_i_3}}|\right)^2 \le 0; \tag{7}$$

$$\varphi_m(\mathbf{C}, \mathbf{F}, \mathbf{R}, \boldsymbol{\mu}, \overset{r}{M}_{\text{вн}}) = \left(\sum_{i=1}^{I \le 15} a_{i_4}(\overset{r}{n}_i, \overset{r}{C}_i) F_i + M_{\text{вн}_1}\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{I \le 15} a_{i_5}(\overset{r}{n}_i, \overset{r}{C}_i) F_i + M_{\text{вн}_2}\right)^2 +$$
$$+ \left(\sum_{i=1}^{I \le 15} a_{i_6}(\overset{r}{n}_i, \overset{r}{C}_i) \, F_i + M_{\text{вн}_3}\right)^2 - \left(\sum_{i=1}^{I \le 15} \mu_i \, F_i \, h_i \, |\tau_{l_{2_i_2}}|\right)^2 - \left(\sum_{i=1}^{I \le 15} \mu_i \, F_i \, h_i \, \tau_{m_i_2}\right)^2 - \left(\sum_{i=1}^{I \le 15} \mu_i \, F_i \, h_i \, |\tau_{l_{2_i_3}}|\right)^2 \le 0. \tag{8}$$

Модели (7) и (8) являются условиями отсутствия поступательного и вращательного движения ОМ относительно АЗУ, а выполнение этих условий является решением задачи оценки гарантированного удержания ОМ. Выражение $Fr(\mathbf{C}, \mathbf{F}, \mathbf{R}, \boldsymbol{\mu}, \overset{r}{F}_{\text{вн}}, \overset{r}{M}_{\text{вн}}) = if\{[\varphi_a(\mathbf{C}, \mathbf{F}, \mathbf{R}, \boldsymbol{\mu}, \overset{r}{F}_{\text{вн}} \le 0] \cap [\varphi_m(\mathbf{C}, \mathbf{F}, \mathbf{R}, \boldsymbol{\mu}, \overset{r}{M}_{\text{вн}} \le 0], 1, 0\}$ является математическим критерием гарантированного удержания ОМ в АЗУ при СЗ с трением.

Задача минимизации замыкающих усилий преобразуется в задачу нелинейного программирования: "Найти $\overset{r}{F} = (F_1, F_2, ..., F_к)^T : 0 \le F_i \le F_{i_\text{доп}} < \infty \;\; \forall i = 1, 2, ..., I_к$, $\overset{r}{F} = (F_1, F_2, ..., F_{l_к})^T : 0 \le F_i \le F_{i_\text{доп}} < \infty$, $Z(\overset{r}{F}) = \min \sum_{i=1}^{I_к} F_i$, $c_i \to \min$, $c_i \ge 0$, $i = 1, 2, ..., I_к$ при $[\varphi_a(\mathbf{C}, \mathbf{F}, \mathbf{R}, \boldsymbol{\mu}, \overset{r}{F}_{\text{вн}} \le 0] \cap [\varphi_m(\mathbf{C}, \mathbf{F}, \mathbf{R}, \boldsymbol{\mu}, \overset{r}{M}_{\text{вн}} \le 0] \cap$
$\cap [\overset{r}{F} \ne \varnothing]$".

Задача нелинейного программирования относится к задачам общих регулярных символьных (аналитических) методов, решения которых пока не найдены [5], но возможно применение эффективных числен-

ных методов [6]. Регулярным численным методом решения является, например, прямой метод (сканирование пространства параметров), но сложность алгоритмов прямого метода будет не хуже, чем $o(pI)$, $p>0$.

Линейной сложностью $o(pI)$ обладают алгоритмы оптимизации усилий замыкания в некоторых частных, но широко распространенных конструкциях АЗУ.

АЗУ с равными замыкающими усилиями. В этом случае $F_i = F_j = F$, $i, j = 1, 2, \ldots, I_к$, $i \neq j$, число неизвестных становится не более 1, и задача имеет решение с линейной сложностью [6].

АЗУ с одним приводом на все фаланги. В этом случае $F_i = c_i u$, где u – управление приводом силового замыкания; c_i – коэффициент передачи. Тогда алгоритм отыскания оптимального усилия замыкания также обладает линейной сложностью [6].

4. Постановка и решения задачи оценки робастности замыкания

Задачи оценки робастности силового замыкания по отношению к неопределенности (погрешности) представления данных о координатах точек контакта могут быть сформулированы следующим образом: "При заданных точках контакта найти максимальные отклонения значений исходных данных, при которых гарантируется поступательная и/или вращательная неподвижность ОМ, при любых допустимых значениях внешних сил и моментов".

Определим алгоритм решения задачи оценки робастности замыкания по отношению к неопределенности (погрешности) представления данных о координатах точек контакта при силовом замыкании.

Исходные данные:

I, x_i, y_i, z_i, F_i, μ_i, $i = 1, 2, \ldots, I$; $F_{вн_1}$, $F_{вн_2}$, $F_{вн_3}$, $M_{вн_1}$, $M_{вн_2}$, $M_{вн_3}$; Δ – шаг дискретизации исходной математической модели поверхности ОМ; d_λ – шаг сканирования по каждой координате: $d_1 = d_x$; $d_2 = d_y$; $d_3 = d_z$.

1. Назначаем границы сканирования, положив:

$$\alpha_н = -\Delta/2; \quad \alpha_к = \Delta/2.$$

2. Определяем число дискретных значений:

$$\Theta_g = \text{ceil}(\alpha_к - \alpha_н)/d_g, \quad \forall g = 1, 2, 3,$$

где ceil(*) – операция округления числа до ближайшего большего целого (левосторонняя дискретизация).

3. Вычисляем мощность множества номеров сканирования $\Lambda = \sum_{g=1}^{3} \Theta_g$, положив $\lambda = 1, 2, \ldots, \Lambda$.

4. Сформируем процедуру обратной задачи кодирования [6]:

$$\theta_g(\lambda) = K_{g-1}(\lambda) - \Theta_g \ \text{floor}\{\Theta_g^{-1}[K_{g-1}(\lambda) - 1]\}, \quad g = 1, 2, 3, \quad \lambda = 1, 2, \ldots, \Lambda,$$

где $K_{g-1}(\lambda) = 1 + \text{floor}\{[K_{g-2}(\lambda) - 1]/\Theta_{g-1}\}$ $\forall g = 2, 3$, иначе λ при $g = 1$; floor(*) – операция округления числа до ближайшего меньшего целого.

5. Задаем координаты выделенных точек в функциях номеров, λ:

$$x_i(\lambda) = x_i[\theta_1(\lambda)] = x_i - \alpha_н + d_1[\theta_1(\lambda) - 1], \ y_i(\lambda) = y_i[\theta_2, \lambda] = y_i - \alpha_н + d_2[\theta_2(\lambda) - 1],$$

$$z_i(\lambda) = z_i[\theta_3(\lambda)] = z_i - \alpha_н + d_3[\theta_3(\lambda) - 1], \quad \forall i = 1, 2, \ldots, 5, \quad \lambda = 1, 2, \ldots, \Lambda.$$

6. Вычисляем компоненты векторов нормалей в выделенных точках:

$$n_{i_1} = f_1[x_i(\lambda), y_i(\lambda), z_i(\lambda)]; \ n_{i_2} = f_2[x_i(\lambda), y_i(\lambda), z_i(\lambda)]; \ n_{i_3} = f_3[x_i(\lambda), y_i(\lambda), z_i(\lambda)].$$

7. Если $\{\varphi_a[x(\lambda), y(\lambda), z(\lambda)] \le 0\} \cap \{\varphi_m[x(\lambda), y(\lambda), z(\lambda)] \le 0\}$, то $\varsigma_\lambda = 0$, иначе $\varsigma_\lambda = 1$.

8. Выделяем номера $\lambda^\wedge : \varsigma_{\lambda^\wedge} = 1$, остальные исключаем.

9. Находим $\forall i = 1, 2, \ldots, I$: $x_{i,\text{н}} = \min_{\lambda^\wedge} x_i(\lambda^\wedge)$, $x_{i,\text{к}} = \max_{\lambda^\wedge} x_i(\lambda^\wedge)$, $y_{i,\text{н}} = \min_{\lambda^\wedge} y_i(\lambda^\wedge)$, $y_{i,\text{к}} = \max_{\lambda^\wedge} y_i(\lambda^\wedge)$, $z_{i,\text{н}} = \min_{\lambda^\wedge} z_i(\lambda^\wedge)$, $z_{i,\text{к}} = \max_{\lambda^\wedge} z_i(\lambda^\wedge)$.

10. Выводим, если нужно, сообщение: "Удержание объекта силовым замыканием гарантируется при следующих отклонениях исходных данных:

- для точки 1: $x_{1,\text{н}} \le x_1 \le x_{1,\text{к}}$; $y_{1,\text{н}} \le y_1 \le y_{1,\text{к}}$; $z_{1,\text{н}} \le z_1 \le z_{1,\text{к}}$;
- для точки 2: $x_{2,\text{н}} \le x_2 \le x_{2,\text{к}}$; $y_{2,\text{н}} \le y_2 \le y_{2,\text{к}}$; $z_{2,\text{н}} \le z_2 \le z_{2,\text{к}}$;

...

- для точки I: $x_{I,\text{н}} \le x_I \le x_{I,\text{к}}$; $y_{I,\text{н}} \le y_I \le y_{I,\text{к}}$; $z_{I,\text{н}} \le z_I \le z_{I,\text{к}}$."

5. Пример решения задачи оценки робастности замыкания по отношению к неопределенности (погрешности) представления данных о координатах точек контакта при силовом замыкании

На основе алгоритма, приведенного в п. 4, была написана программа на графическом языке программирования Mathcad для нахождения допустимых отклонений координат точек контакта ОИ и АЗУ. Исходными данными для проведения эксперимента служили массивы координат точек, описывающих геометрию объектов исследования (ОИ), полученных с помощью системы лазерного сканирования. В ходе сканирования (рис. 3) ОИ вращается вокруг вертикальной оси. При сканировании ОИ ПО David Laser Scanner 3.7.1 отрисовывает части поверхности ОИ.

После окончания процедуры сканирования полученные поверхности накладывают друг на друга. После сшивания поверхностей с помощью программы MeshLab v1.3.1 трехмерная модель ОИ проходит процедуру сглаживания и сохраняется в формате STL. Из файлов данного формата получены таблицы координат точек, описывающих ОИ.

Для проведения эксперимента были взяты пять трехмерных тел (рис. 4): ОИ_1: Сфера; ОИ_2: Кувшин; ОИ_3: Флакон; ОИ_4: Скелет морского ежа Echinocardium cordatum; ОИ_5: корпус дрели Black & decker.

Координаты точек замыкания ОИ и АЗУ, представенные в таблице, были найдены известным способом, описанным в работе [7].

Для проведения эксперимента было спроектировано и изготовлено АЗУ (рис. 5). Каждый палец, кроме большого, имеет три фаланги. Каждая фаланга по отдельности приводится в движение тросоприводным средством. Тросы протянуты через системы шкивов и опорных элементов. У четырех пальцев (указательно-

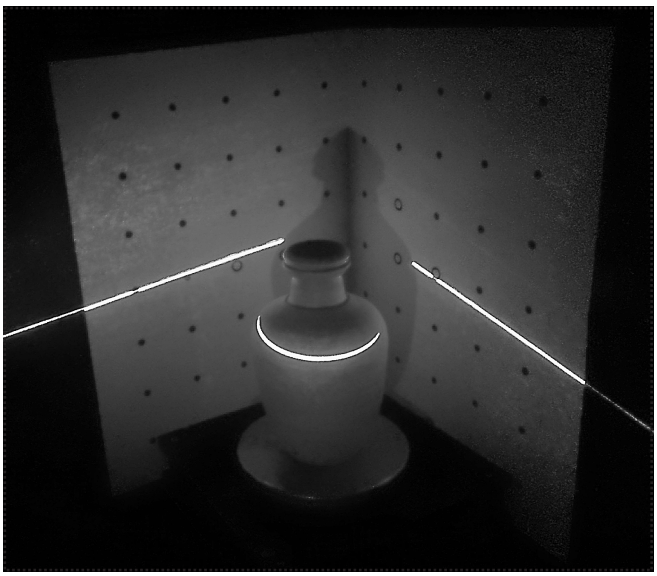

Рис. 3. Сканирование ОИ

Рис. 4. Геометрические модели ОИ

Координаты точек контакта ОИ и АЗУ

Номер ОИ	M1	M2	M3	M4	M5
ОИ_1	132,51;	199,74;	190,06;	152,32;	135,04;
	–21,93;	–28,67;	–50,83;	–71,45;	–28,76;
	85,40	52,14	111,41	51,20	124,00
ОИ_2	147,26;	174,74;	124,13;	156,50;	167,76;
	–28,67;	10,26;	–28,67;	–41,84;	–63,54;
	29,34	62,30	79,51	85,50	63,34
ОИ_3	131,43;	179,98;	146,29;	106,04;	163,33;
	–18,76;	–28,76;	–28,76;	–28,67;	–57,02;
	77,21	62,30	29,34	55,24	67,43
ОИ_4	169,64;	166,61;	183,04;	145,48;	149,27;
	–16,77;	–28,76;	–57,35;	–63,30;	–28,76;
	88,94	99,34	75,48	75,49	31,25
ОИ_5	66,25;	77,68;	100,56;	108,01;	147,26;
	10,96;	–28,67;	–28,89;	–28,76;	–28,76;
	41,50	29,03	44,64	71,16	29,45

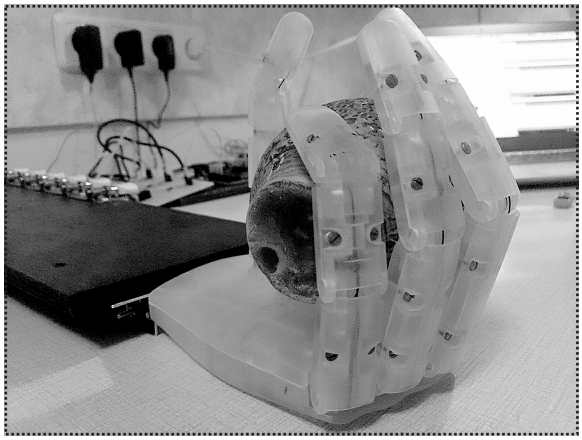

Рис. 5. АЗУ

го–мизинца) возможна фиксация в положении, при котором плоскости замыкания параллельны друг другу, и в положении, при котором плоскости замыкания пресекаются в точке начала проксимальной фаланги большого пальца.

Эксперимент проводили в следующем порядке:

1) выбор ОИ;

2) нахождение отклонений исходных данных;

3) базирование ОИ в координатно-калибровочном углу;

4) подведение АЗУ к ОИ в точки допустимых отклонений;

5) проведение процедуры захватывания ОИ;

6) перемещение АЗУ с зажатым ОИ в различные положения.

Далее приведены допустимые отклонения координат точек замыкания ОИ и АЗУ, полученные с помощью составленной программы:

ОИ_1:

Для точки M1: $127{,}51 \le x_1 \le 137{,}51$; $19{,}87 \le y_1 \le 23{,}55$; $82{,}66 \le z_1 \le 88{,}53$;
Для точки M2: $194{,}47 \le x_2 \le 203{,}34$; $26{,}21 \le y_2 \le 31{,}98$; $49{,}89 \le z_2 \le 55{,}56$;
Для точки M3: $186{,}06 \le x_3 \le 194{,}06$; $-54{,}81 \le y_3 \le -46{,}83$; $107{,}32 \le z_3 \le 115{,}67$;
Для точки M4: $148{,}23 \le x_4 \le 156{,}14$; $-75{,}11 \le y_4 \le -67{,}43$; $47{,}54 \le z_4 \le 55{,}23$;
Для точки M5: $131{,}47 \le x_5 \le 139{,}99$; $-32{,}55 \le y_5 \le -24{,}77$; $120{,}00 \le z_5 \le 128{,}00$.

ОИ_2:

Для точки M1: $145{,}28 \le x_1 \le 150{,}01$; $-31{,}01 \le y_1 \le -26{,}77$; $27{,}23 \le z_1 \le 31{,}91$;
Для точки M2: $171{,}67 \le x_2 \le 178{,}03$; $8{,}70 \le y_2 \le 13{,}11$; $59{,}02 \le z_2 \le 65{,}08$;
Для точки M3: $121{,}66 \le x_3 \le 127{,}40$; $-31{,}07 \le y_3 \le -26{,}09$; $76{,}56 \le z_3 \le 82{,}31$;
Для точки M4: $154{,}04 \le x_4 \le 159{,}81$; $-44{,}21 \le y_4 \le -38{,}53$; $82{,}99 \le z_4 \le 88{,}33$;
Для точки M5: $164{,}43 \le x_5 \le 171{,}09$; $-67{,}32 \le y_5 \le -59{,}11$; $63{,}34 \le z_5 \le 67{,}03$.

ОИ_3:

Для точки М1: $127{,}43 \le x_1 \le 134{,}43$; $-21{,}49 \le y_1 \le -16{,}55$; $74{,}22 \le z_1 \le 80{,}00$;
Для точки М2: $177{,}98 \le x_2 \le 181{,}98$; $-31{,}76 \le y_2 \le -26{,}76$; $59{,}30 \le z_2 \le 67{,}30$;
Для точки М3: $143{,}28 \le x_3 \le 149{,}30$; $-31{,}77 \le y_3 \le -25{,}65$; $26{,}13 \le z_3 \le 33{,}45$;
Для точки М4: $103{,}01 \le x_4 \le 109{,}07$; $-31{,}56 \le y_4 \le -24{,}53$; $52{,}13 \le z_4 \le 58{,}35$;
Для точки М5: $161{,}22 \le x_5 \le 166{,}44$; $-59{,}04 \le y_5 \le -53{,}78$; $65{,}22 \le z_5 \le 70{,}54$.

ОИ_4:

Для точки М1: $165{,}53 \le x_1 \le 175{,}32$; $-19{,}33 \le y_1 \le -13{,}32$; $85{,}83 \le z_1 \le 91{,}54$;
Для точки М2: $164{,}50 \le x_2 \le 169{,}03$; $-31{,}76 \le y_2 \le -25{,}76$; $97{,}99 \le z_2 \le 101{,}31$;
Для точки М3: $180{,}01 \le x_3 \le 186{,}09$; $-61{,}23 \le y_3 \le -54{,}44$; $72{,}22 \le z_3 \le 78{,}98$;
Для точки М4: $141{,}22 \le x_4 \le 149{,}49$; $-66{,}30 \le y_4 \le -59{,}20$; $71{,}50 \le z_4 \le 77{,}95$;
Для точки М5: $145{,}16 \le x_5 \le 153{,}38$; $-31{,}65 \le y_5 \le -25{,}89$; $28{,}14 \le z_5 \le 34{,}34$.

ОИ_5:

Для точки М1: $64{,}25 \le x_1 \le 68{,}24$; $8{,}08 \le y_1 \le 13{,}96$; $38{,}05 \le z_1 \le 46{,}31$;
Для точки М2: $74{,}30 \le x_2 \le 80{,}06$; $-31{,}20 \le y_2 \le -25{,}67$; $26{,}01 \le z_2 \le 31{,}03$;
Для точки М3: $99{,}04 \le x_3 \le 102{,}56$; $-31{,}21 \le y_3 \le -27{,}89$; $41{,}53 \le z_3 \le 47{,}78$;
Для точки М4: $105{,}98 \le x_4 \le 111{,}01$; $-31{,}76 \le y_4 \le -25{,}76$; $67{,}16 \le z_4 \le 74{,}56$;
Для точки М5: $144{,}26 \le x_5 \le 151{,}51$; $-32{,}70 \le y_5 \le -25{,}60$; $27{,}45 \le z_5 \le 31{,}42$.

Выводы

1. Решение задач силового замыкания объектов манипулирования АЗУ в рамках систем линейных алгебраических уравнений, порождаемых законами статики твердого тела в общем случае невозможно из-за неразрешимости таких систем.

2. Переход к решению задач силового замыкания объектов манипулирования АЗУ методами исследования операций позволяет:

• получить математическую запись достаточного критерия гарантированного удержания ОМ как при плоском, так и объемном силовом замыкании с трением;

• математически строго сформулировать разрешимую задачу нелинейного программирования, размерность которой равна числу замыкающих сил, т.е. минимально возможному при независимом формировании этих сил, что позволяет найти оптимальные значения замыкающих сил при заданной конфигурации точек контакта и ее использование в программах управления АЗУ в реальном времени.

3. На основе нелинейных достаточных критериев гарантированного удержания при силовом плоском или пространственном замыкании могут быть предложены частные, но применимые для широкого спектра конструкций АЗУ эффективные алгоритмы минимизации замыкающих усилий при гарантии удержания объекта, захваченного АЗУ.

4. Задачи оценки робастности силового замыкания по отношению к неопределенности (погрешности) представления данных о координатах точек контакта при любых допустимых значениях внешних сил и моментов имеют свои решения, например, в форме частного алгоритма решения задачи оценки робастности замыкания по отношению к неопределенности (погрешности) представления данных о координатах точек контакта при силовом замыкании с трением.

Библиографический список

1. **Anandan T.** Latest trends in intelligent Robot End-of-Arm Tooling // Robotics Online, Robotics industries association. MI, USA, 2013. URL: http://www.robotics.org/content-detail.cfm/Industrial-Robotics-Featured-Articles/Latest-Trends-in-Intelligent-Robot-End-of-Arm-Tooling/content_id / 4253 (дата обращения: 10.08.2013).

2. **Лукинов А.П., Сыромятин А.Н.** Математические условия удержания объекта манипулирования антропоморфным захватным устройством при геометрическом замыкании в трехмерном пространстве // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. 2013. № 1. С. 95–99.

3. **Дронг В.И., Дубинин В.В., Ильин М.М.** Курс теоретической механики. Учебник. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 736 с.

4. **Корн Г., Корн Т.** Справочник по математике (для научных работников и инженеров). М.: Наука, 1974. 832 с.

5. **Васильев Ф.П.** Методы оптимизации. М.: Изд-во "Факториал пресс", 2002. 824 с.

6. **Лукинов А.П.** Проектирование мехатронных и робототехнических устройств. СПб: Лань, 2012. 608 с.

7. **Лукинов А.П., Сыромятин А.Н.** О решении задачи замыкания предметов антропоморфными захватными устройствами при задании формы предмета массивами данных // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2012. № 10. С. 23–30.

УДК 681.2

А.А. Емельяненко, *канд. техн. наук,*
С.Г. Бабкин *(ОАО "НИИ гидросвязи "Штиль", г. Волгоград)*
E-mail: emelyanenko_alaksei@mail.ru

Технологически эффективный подход к конструированию корпусов приборов связи

Сформулирована цель и поставлены задачи разработки новой конструкции корпусов приборов связи. Определены технологические условия и круг оборудования для производства основных деталей корпусов. Предложен принцип группирования разрабатываемых приборов, определяющий конструктивное построение корпусов. Изложена концепция построения и особенности новой конструкции корпусов каждой группы приборов. Показаны технологические преимущества нового подхода к конструированию корпусов.

The aim is stated and the problems of development of a new hull design of the communication devices (equipment) are posed. Technological conditions and the range of equipment for the production of basic hull parts (of the hull parts) are defined. The principle of grouping of the developing devices, defining the constructive design of hulls (that defines the constructive hull design) is proposed. The concept of designing and features of a new hull design (design of hulls) of each group of devices is expounded. The technological advantages of a new approach to the (hull design) design of hulls are shown.

Ключевые слова: корпус прибора; синтез конструкции; 3D-модель; стержневая деталь; плоская деталь; каркас; рама; сварная конструкция; свинчиваемая конструкция; точность; прочность; жесткость; взаимозаменяемость; собираемость; трудоемкость; себестоимость.

Keywords: device hull; synthesis of construction; 3D-model; rod part; flat part; skeleton; frame; weldment; screwed construction; precision; strength; stiffness; interchangeability; assemblage; labor-intensiveness; prime cost.

В номенклатуре изделий, проектируемых в конструкторском отделе НИИ "Штиль", существенную долю занимают корпуса приборов связи, имеющие в целом прямоугольную коробчатую конфигурацию. Такие корпуса, относящиеся к разным изделиям, имеют ряд общих функциональных и конструктивных признаков и ряд различий.

До недавнего времени общим в конструктивном исполнении таких корпусов независимо от габаритных размеров и массы прибора было то, что основные составляющие корпуса – короб и крышка или два полукороба – изготавливали из листового материала – сплава АМг5М – толщиной 2 или еще ранее 1,5 мм. Короб (полукороб) такого корпуса сваривали из днища и обечайки. При этом предварительное формообразование каждой составляющей представляет собой гибочную операцию. К обечайке к тому же приваривали гнутую опорную планку под уплотнительный шнур и ряд других деталей.

Основными технологическими операциями, реализующими подобную конструкцию короба, являются вырубка и обрезка листового материала, гибка и в определенных случаях рихтование листа, пригонка под сварку, сварка, правка, окончательная обрезка при необходимости, механическая обработка систем отверстий. Из приведенного перечня операций гибка листового материала и сварка являются наиболее трудоемкими видами обработки, требующими многократной выверки, особой тщательности, внимательности и высокой квалификации рабочих. Кроме того, зачастую проблемы с собираемостью изделия в целом возникают на этапе общей сборки, когда уже изготовлены короб и крышка или два полукороба. Тогда увеличивается доля пригоночных работ в общем времени изготовления прибора. Естественно, это напрямую сказывается на сроках изготовления и себестоимости изделия.

В 2011 г. в НИИ "Штиль" были начаты конструкторские изыскания по выработке новой концепции корпусов приборов, конфигурация которых имеет в целом форму прямого параллелепипеда.

Цель разработки – максимальное снижение себестоимости корпуса при обеспечении полного соответствия прибора техническому заданию.

Для достижения этой цели требовалось решить следующие задачи:

• исключить из технологического процесса изготовления корпуса сложные малопроизводительные гибочные и сварочные работы, требующие высокой квалификации исполнителей;

• объединить в один этап (а лучше в одну операцию) и автоматизировать формообразование элементов корпуса и обработку систем отверстий;

• обеспечить полную взаимозаменяемость элементов корпуса, т.е. возможность сборки партии корпусов без пригоночных работ, сортировки и подбора деталей;

• обеспечить возможность качественной сборки корпуса силами исполнителей невысокой квалификации.

Решение перечисленных задач позволило бы: сократить штучное время изготовления прибора; снизить в нем долю времени на механическую и слесарную обработку и сборку корпуса, а в норме времени на изготовление корпуса – снизить долю вспомогательного (не машинного) времени; снизить нормы оплаты труда производственных рабочих, а следовательно, снизить себестоимость изготовления корпуса и прибора в целом.

Рассматриваемые приборы были разделены нами на три группы по габаритным размерам:

1) малогабаритные – с наибольшим размером (высотой) до 250 мм;

2) средних габаритов – с наибольшим размером (высотой) до 500 мм;

3) крупногабаритные – с наибольшим размером (высотой) до 1000 мм (рис. 1 на стр. 3 обл.).

Оказалось, что и массы приборов могут быть в целом поставлены в соответствие размерным группам: масса приборов 1-й размерной группы – до 5 кг, 2-й – до 20 кг, 3-й – до 80 кг. Таким образом, ряды размеров и масс, соответствующих размерным группам приборов, образуют в целом (не смотря на возможные обоснованные отклонения) геометрические прогрессии. Этот факт, помимо возможности проработки соответствующих группе конструктивных подходов к построению корпусов, позволяет унифицировать сортамент материала деталей корпусов.

Работа была начата с определения номенклатуры оборудования, которое могло бы быть задействовано для механической обработки конструктивных элементов корпуса. Предприятия-партнеры НИИ "Штиль" располагают парком оборудования с числовым программным управлением (ЧПУ), в том числе фрезерно-сверлильного, на котором обработка деталей корпусов представляется весьма перспективной. В частности контурная и позиционная обработка деталей типа плит, стенок, корпусов небольших габаритов может вестись на фрезерно-сверлильном станке с ЧПУ модели HAAC EC 400; те же виды обработки для крупногабаритных плит и корпусов возможны на портальном фрезерно-сверлильном станке с ЧПУ модели HAAC GR 712; вырубка тонких стенок и пробивка в них отверстий возможна на координатно-пробивном станке с ЧПУ модели HRT-300. Помимо названных моделей станков возможна, конечно, обработка и на аналогах подобных типоразмеров. Поскольку предполагаемое производство рассматриваемых корпусов является, по меньшей мере, мелкосерийным и периодически возобновляемым, то использование станков с ЧПУ представляется вполне оправданным и эффективным.

Ознакомившись с возможностями оборудования предприятий-партнеров, мы рассмотрели первоначально три конструктивных варианта полукороба одного из малогабаритных приборов:

• цельный литой с механической обработкой плоских базовых поверхностей, пазов и отверстий на станке с ЧПУ;

• цельный, полученный на станке с ЧПУ контурным фрезерованием плиты и позиционной обработкой отверстий;

• сборный, составные части которого – основание и обечайка – также изготавливают из плит на фрезерно-сверлильном станке с ЧПУ.

Однако первый из названных вариантов требует все-таки большей программы выпуска, чем та, которая сегодня востребована. Второй и третий варианты имеют слишком низкий коэффициент использования металла даже для небольших программ выпуска. Поэтому, приступая к следующему варианту, мы решили отказаться от стереотипного построения конструкции с использованием обечайки или цельного полукороба.

Конструкция последнего варианта корпуса рассматриваемого прибора имеет конфигурацию сборного каркаса с навешиваемыми на него тонкими стенками (рис. 2 на стр. 3 обл.). Соединения деталей корпуса – резьбовые. Доля сварки исключительно мала: контактной сваркой присоединяют только лепестки заземления к стенкам корпуса.

Каркас состоит из базовой задней стенки, четырех угловых стоек и плоской рамы. Стойки прикре-

плены к задней стенке винтами. Раму прикрепляют к стойкам резьбовыми фланцевыми втулками, служащими одновременно для фиксации крышки в закрытом положении винтами. Толщина боковых стенок не увеличилась по сравнению с прежней конструкцией.

Базовая задняя стенка является несущей для электронных элементов прибора. К нижней стенке крепятся разъемы вводов и выводов. На откидной крышке корпуса устанавливают громкоговоритель и элементы управления. На ней же или на левой боковой стенке, в зависимости от исполнения, устанавливают кронштейн микрофона и микрофон. Крышка корпуса имеет окно, защищенное сдвоенными жалюзи. Герметичность стыков деталей корпуса обеспечивается герметиком; стопорение резьбовых соединений – клеем; герметичность стыка крышки и корпуса – уплотнительной силиконовой трубкой. В закрытом положении крышку фиксируют четырьмя винтами.

Для беспрепятственного открывания и закрывания крышки использованы петли с "плавающей" осью. Винты, крепящие крышку к корпусу, невыпадающие и подпружинены. Принятые размеры сечений деталей корпуса, число и диаметры резьбовых соединений обеспечивают надлежащую прочность и жесткость корпуса при оговоренных техническим заданием вибрациях и ударе.

Приборы 2-й группы отличаются от приборов 1-й группы не только бóльшими габаритами, но и большей массой электрического и электронного содержимого. Поэтому, разрабатывая новую конструкцию их корпуса, мы должны были гарантировать его прочность и жесткость иным, чем в первой группе, способом.

Несущим каркасом в данном случае стала конструкция, состоящая из базовой задней стенки, двух боковых вертикальных стенок и плоской рамы (рис. 3 на стр. 3 обл.). Толщина боковых стенок каркаса составляет 6 мм, задней стенки и рамы – 16 мм. Боковые стенки каркаса имеют двустороннее оребрение и одновременно с несущей функцией выполняют функцию радиаторов. Задняя базовая стенка имеет оребрение в зависимости от конкретного прибора.

Каркас свинчивается винтами. К каркасу крепят нижнюю и верхнюю тонкие стенки толщиной 2 мм. К верхней стенке крепят разъемы вводов и выводов. Откидную крышку на петлях с "плавающей" осью фиксируют в закрытом положении четырьмя винтами. В зависимости от того, для каких электроэлементов крышка является несущей, ее толщина составляет 6 или 16 мм. В последнем случае крышка имеет двустороннее оребрение.

Охлаждение приборов осуществляется внутренним вентилированием без воздухообмена с внешней средой, поскольку сам корпус является одновременно массивным радиатором с развитой поверхностью. Основные детали корпуса – задняя базовая стенка, боковые стенки, плоская рама, крышка – спроектированы из расчета обработки на станках с ЧПУ.

Приборы третьей группы при еще больших габаритах имеют большую массу. Причем масса приборов от группы к группе увеличивается в большем соотношении, чем габаритные размеры. Обеспечить прочность и жесткость приборов третьей группы в рамках принятой концепции построения корпусов можно двумя путями.

Первый путь состоит в построении всего короба корпуса из толстых стенок (плит), соединяемых винтами (рис. 4). В этом случае из конструкции исключается передняя плоская рама (под крышку), а толстые стенки выполняются оребренными и используются как радиаторы.

Второй путь состоит в формировании каркаса корпуса из базовой (задней или нижней – в зависимости от расположения амортизаторов) толстой стенки, четырех смежных с нею рам и пятой рамы под крышку. Рамный каркас обшивают тонкими листовыми стенками, утопленными в рамы и присоединяемыми винтами. Возможна замена попарно противоположных рам толстыми стенками или тонкими стенками в сочетании с внутренним ребром жесткости.

Первый путь реализован в приборах модульной (линейной) компоновки (рис. 4, *а*) и произвольной (пространственной) компоновки (рис. 4, *б*).

Второй путь – в приборах пространственной компоновки с вариантами исполнения отдельных элементов корпуса (рис. 5). Так, по просьбе предприятия-изготовителя вариант корпуса прибора рассматриваемой группы (рис. 5, *а*) решен как комбинация двух толстых стенок, рамы и гнутой П-образной обечайки. Вариант другого прибора той же группы (рис. 5, *б*) предполагает замену боковых рам на внутреннее ребро. Гарантированная жесткость корпуса приборов третьей группы может быть обеспечена соединением каждой смежной

пары толстых стенок и рам двумя рядами винтов со скрещивающимися осями.

Переход на новую концепцию построения корпусов приборов, безусловно, сказался на массе приборов. Однако увеличение массы, на наш взгляд, не выходит за приемлемые рамки. Так, в частности, массы приборов, представляющих в данной работе 1-ю (см. рис. 2), 2-ю (см. рис. 3) и 3-ю (см. рис. 4, *а*) размерные группы, увеличились по сравнению с прежними конструкциями соответственно в 1,2, 1,4 и 1,1 раза.

В то же время новая концепция построения корпуса решает поставленные ранее задачи. Основные детали корпусов – стенки, плоские рамы, крышки – могут быть выполнены на станках с ЧПУ с минимальными затратами вспомогательного времени и с гарантированной точностью расположения крепежных отверстий и баз. Последнее помимо того, что исключает из технологического процесса трудоемкую разметку, обеспечивает полную взаимозаменяемость деталей в серии и беспригоночную сборку. Остальные детали корпуса выполняют на универсальном оборудовании.

Сборка корпуса состоит в герметизации стыков и резьб и соединении деталей корпуса посредством винтов с потайными головками и ранее названными резьбовыми фланцевыми втулками. Такая сборочная операция может быть эффективно механизирована применением электрических гайковертов, что также снизит штучное время изготовления прибора. Преимущества технологии изготовления новых конструкций корпусов в условиях мелко- и среднесерийного производства в пересчете на себестоимость являются более значимыми по сравнению с некоторым увеличением массы.

Так, трудоемкость механической и слесарной обработки, сварки и сборки корпуса прибора, представляющего в данной работе 1-ю размерную группу, в прежнем (гнуто-сварном) варианте конструкции составляет около 270 ч. Трудоемкость механической, слесарной обработки и сборки при изготовлении корпуса новой конструкции составляет около 140 ч. Удешевление прибора в целом составит при этом ориентировочно 15...20 %. Не менее важно и то, что вместе с исключением из технологического процесса операций гибки и пригонки высвободится труд дефицитного высококвалифицированного слесарно-сборочного персонала.

Все представленные корпуса, их подузлы и детали разработаны в формате 3D-моделей, что позволяет автоматизировать и составление управляющих программ для систем ЧПУ.

Корпуса – представители всех групп приборов – доведены до рабочей конструкторской документации и опытных образцов. Изготовление опытных образцов позволило отработать конструкторскую документацию, выявить и устранить определенные ошибки проектирования. Анализ повторяющихся ошибок позволил разделить их на две группы: геометрические ошибки конструирования и ошибки управляющих программ при обработке на станках с ЧПУ.

Основная часть ошибок первой группы связана с некорректной увязкой взаимного расположения систем крепежных отверстий. Эти ошибки могут быть исключены неукоснительным соблюдением принципа единства баз для систем отверстий детали и для деталей в составе сборочной единицы, а также выверкой позиционных допусков.

Ошибки второй группы исключаются заданием правильной последовательности обработки контуров детали и ее систем отверстий. Перед изготовлением детали, особенно партии деталей, из дорогостоящих материалов целесообразна отладка управляющей программы на опытном образце из дешевого материала. Это позволит исключить брак, пригонку или доводку рабочего образца.

Обзор общих видов зарубежных приборов аналогичной конфигурации, габаритов и массы, в частности фирмы General Electric [1], позволяет сделать вывод о том, что предложенные концепции корпусов соответствуют общей для ведущих производителей тенденции к разбиению конструкции на элементарные технологичные взаимозаменяемые конструктивные части, позволяющие автоматизировать процесс их изготовления, и к синтезу из этих частей легкособираемых свинчиваемых конструкций (рис. 6).

Таким образом, разработанные конструкции корпусов решают поставленные в начале работы задачи, и в итоге позволяют достичь существенного снижения себестоимости корпуса и норм времени на его изготовление при обеспечении полного соответствия приборов техническому заданию.

Библиографический список

1. **Прочный** корпус. URL: http://defense.geip.com/products/family/rugged-chassis.

УДК 658.562: 621.9

Е.А. Саввина, *канд. техн. наук,* **В.В. Прейс,** *д-р техн. наук*
(Тульский государственный университет)
E-mail: savvek@rambler.ru

Имитационное моделирование процедур статистического регулирования технологического процесса автоматизированной сборки многоэлементных изделий

Рассмотрены вопросы применения имитационного моделирования процедур статистического регулирования технологического процесса автоматизированной сборки многоэлементных изделий массового выпуска на автоматических роторных линиях для экспериментальной апробации достоверности аналитических моделей планов статистического контроля и методик их экономической оценки.

Questions of application of imitating modelling of procedures of statistical regulation of technological process of the automated assemblage of multielement products of mass release on automatic rotor lines for experimental approbation of reliability of analytical models of plans of the statistical control and techniques of their economic estimation are considered.

Ключевые слова: автоматизированная сборка, статистический метод, непрерывный выборочный контроль, план контроля.

Keywords: automated assemblage, statistical method, continuous selective control, control plan.

Важным элементом управления качеством сборки многоэлементных изделий массового выпуска на автоматических роторных линиях (АРЛ) остается непрерывный выборочный контроль качества изделий, базирующийся на применении статистических методов [1].

В массовых поточных сборочных производствах, автоматизированных на основе АРЛ, эффективное управление качеством производимой продукции может быть реализовано только на основе создания интегрированных систем автоматизированного статистического контроля качества [2].

Для процедур автоматизированного статистического контроля качества могут быть использованы известные планы моделей CSP (*continuous sampling plan*) или разработанные авторами планы автоматического непрерывного выборочного контроля моделей ACSP (*automatic continuous sampling plan*), которые позволяют проводить автоматизированный контроль ритмично [3].

Однако использование методов и процедур статистического контроля не всегда гарантирует поддержание требуемого уровня качества собираемых изделий. Это обусловлено отсутствием оперативной обратной связи между результатами контроля качества и тем элементом сборочной АРЛ, отказ которого и является источником нарушения качества изделий по соответствующему параметру, т.е. функции регулирования, как одной из трех необходимых составляющих эффективного управления качеством продукции – планирования, контроля и регулирования.

В работах [4–6] предложены методики планирования выборочного контроля качества штучной продукции по альтернативному и количественному признакам, а также методика экономической оценки планов автоматизированного статистического контроля качества, совмещенного со статистическим регулированием технологических процессов машино- и приборостроения. Разработанные методики позволяют изготовителю выбрать оптимальный план контроля, обеспечивающий требуемый уровень качества изделий, собираемых на АРЛ, при минимальных затратах на проведение контроля с учетом затрат на наладку сборочного оборудования.

Однако в производственных условиях сложно провести практическую апробацию разработанных аналитических моделей планов и методик их оценки, поэтому представляет практический интерес применение инструментов имитационного моделирования процедур статистического регулирования с целью анализа условий, обеспечивающих достоверное использование аналитических моделей.

Были исследованы модели статистического регулирования технологического процесса сборки многоэлементных изделий на АРЛ при выборочном контроле по альтернативному или количественному признакам. Программы имитационного моделирования процедур статистического регулирования реализованы в стандартной программной среде *MathCad* на основе разработанных авторами алгоритмов.

Фрагмент алгоритма моделирования процедуры статистического регулирования при контроле качест-

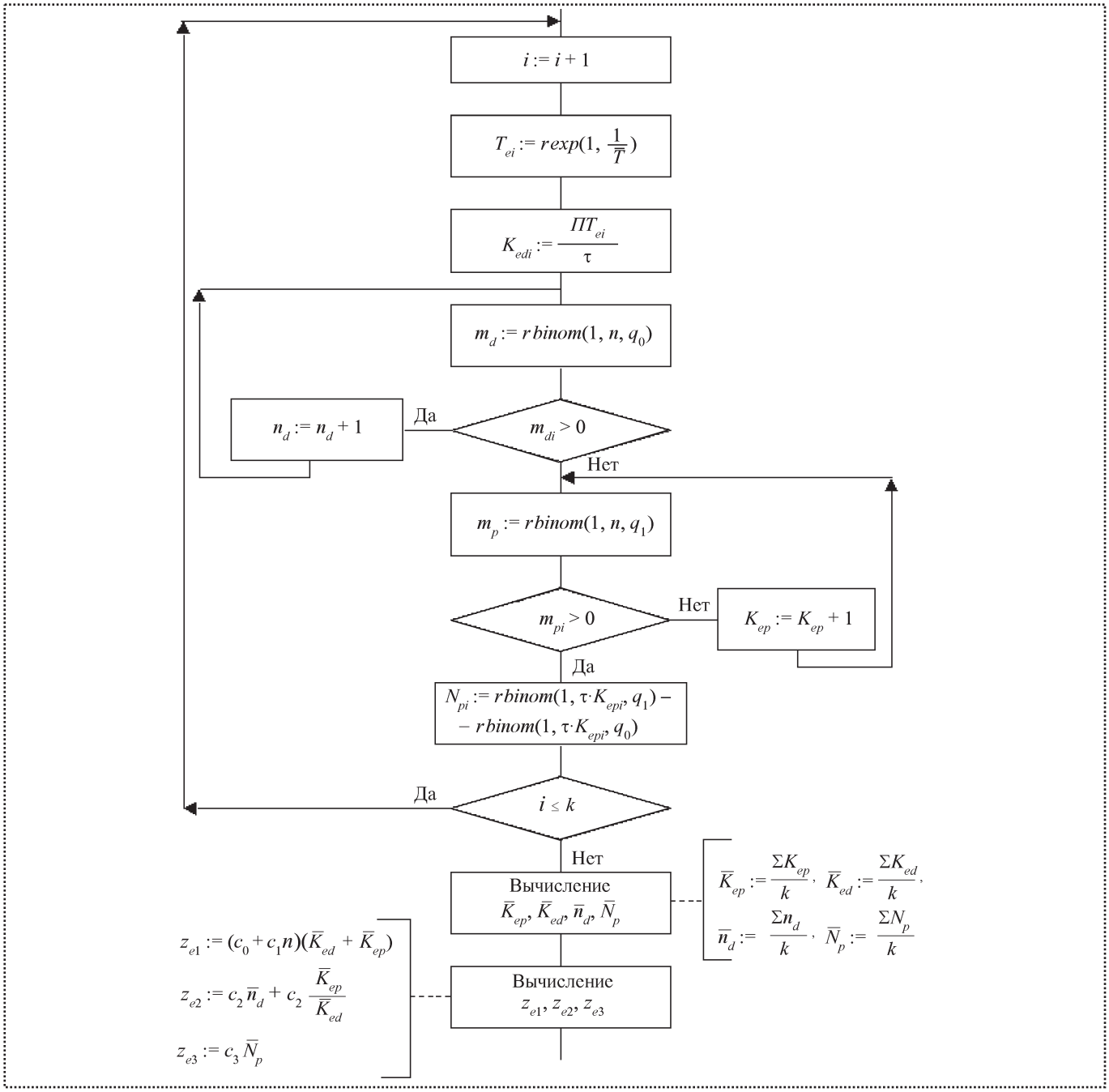

Рис. 1. Фрагмент алгоритма моделирования процедуры статистического регулирования при контроле качества по альтернативному признаку

ва сборки изделий по альтернативному признаку представлен на рис. 1.

С помощью оператора *r exp* генерировались случайные числа, подчиняющиеся экспоненциальному распределению. Параметром распределения являлось среднее время отказа сборочной АРЛ $\overline{T}$, значение которого принималось на основе анализа надежности АРЛ в действующих производствах. Определялось среднее число выборок до отказа K_{ed}.

С помощью оператора *r binom* генерировались биномиально распределенные случайные числа m_d дефектных изделий в выборке объемом n при налаженном процессе с уровнем дефектности q_0. При появлении дефектных изделий происходило накопление числа ошибочных наладок n_d за период до отказа.

С помощью оператора *r binom* также генерировались биномиально распределенные случайные числа m_p дефектных изделий в выборке объемом n при раз-

лаженном процессе с уровнем дефектности q_1. При отсутствии дефектных изделий происходило накопление числа выборок K_{ep} после незамеченного отказа. Рассчитывалось число дефектных изделий при переходе от налаженного к разлаженному состоянию N_p.

Указанные процедуры повторяли для k значений циклов отказа. Вычисляли средние значения $\overline{K}_{ed}$, $\overline{n}_d$, $\overline{K}_{ep}$, $\overline{N}_p$. Определяли средние экспериментальные значения затрат, обусловленных:

• проведением собственно процедуры контроля

$$z_{e1} = (c_0 + c_1 n)(\overline{K}_{ed} + \overline{K}_{ep}); \quad (1)$$

• наладкой сборочного оборудования

$$z_{e2} = c_2 \left(\overline{n}_d + \frac{\overline{K}_{ep}}{\overline{K}_{ed}} \right); \quad (2)$$

• убытками, связанными с ложной приемкой бракованных изделий

$$z_{e3} = c_3 \overline{N}_p. \quad (3)$$

Для сравнения результатов имитационного моделирования с теоретической зависимостью $z(\tau)$ рассчитывали критерий согласия Пирсона χ^2 по всему диапазону значений периода контроля τ. С помощью оператора *p chisq* определяли критическое значение $\chi^2_{кр}$ для числа степеней свободы, соответствующего числу экспериментальных точек и доверительной вероятности 0,95. При соблюдении неравенства $\chi^2 < \chi^2_{кр}$ считали, что экспериментальная зависимость соответствует теоретической.

На рис. 2 представлены теоретические $z(\tau)$ и экспериментальные $z_e(\tau)$ зависимости затрат от периода контроля τ для процедуры статистического регулирования при контроле качества изделий по альтернативному признаку с параметрами:

• $c_0 = 20$ (единовременные затраты на контроль одной выборки);

• $c_1 = 0{,}5$ (затраты на контроль единицы продукции);

• $c_2 = 100$ (стоимость наладки);

• $c_3 = 0{,}4$ (стоимость убытков от одной дефектной единицы продукции);

• уровень дефектности $q_0 = 0{,}001$, а при разлаженном процессе – $q_1 = 0{,}01$;

• производительность оборудования П = = 180 шт./мин = 3 шт./с;

• средняя наработка на отказ T = 8 ч = 28 800 с;

• диапазон значений периода контроля τ = = 2700...10 800 шт.;

• объем выборки при налаженном процессе n = 3.

Результаты имитационного моделирования показали, что существенные отклонения экспериментальных значений затрат от теоретических имеются только при малом числе анализируемых периодов отказа сборочного оборудования ($k < 10$).

Фрагмент алгоритма моделирования процедуры статистического регулирования при контроле качества сборки изделий по количественному признаку представлен на рис. 3.

С помощью оператора *r exp* генерировались случайные числа, подчиняющиеся экспоненциальному распределению. Параметром распределения являлось задаваемое среднее время наработки на отказ $\overline{T}$. Определялось среднее число выборок до отказа K_{ed}.

С помощью оператора *r norm* генерировались нормально распределенные случайные числа x_p в выборке объемом n при разлаженном процессе, который характеризуется нижним предельным уровнем качества LQL. При отсутствии дефектных изделий ($x_p > x_U$) происходило накопление числа выборок после незамеченного отказа K_{ep}. Затем генерировались нормально распределенные случайные числа x_d в выборке

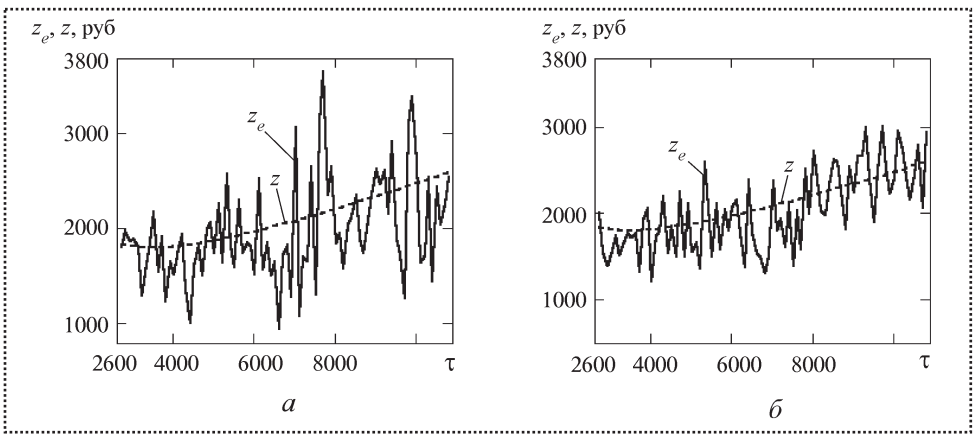

Рис. 2. Результаты моделирования процедуры статистического регулирования при контроле качества по альтернативному признаку:
а – k = 10; *б* – k = 100; —— – z_e; – – – z

объемом n при налаженном процессе, который характеризуется верхним предельным уровнем качества AQL. При наличии дефектных изделий ($x_d > x_U$) каждый раз проходило накопление числа ошибочных наладок n_d за период до отказа.

Аналогично с помощью оператора *r norm* генерировались нормально распределенные случайные числа x_1 в выборке объема n при разлаженном процессе (LQL) для периода до обнаружения отказа. Подсчитывалось число дефектных деталей N_1 за этот период.

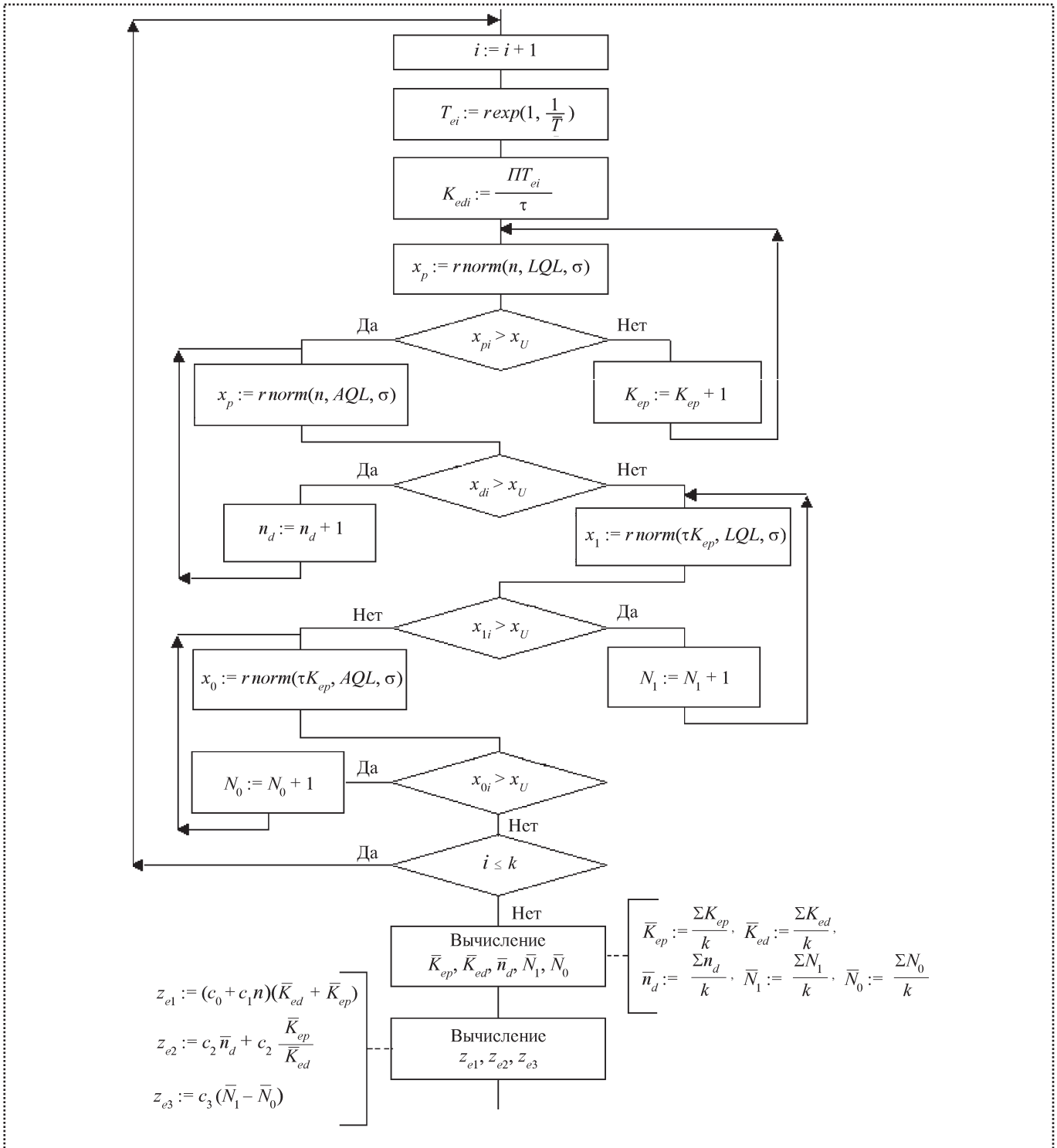

Рис. 3. Фрагмент алгоритма моделирования процедуры статистического регулирования при контроле качества по количественному признаку

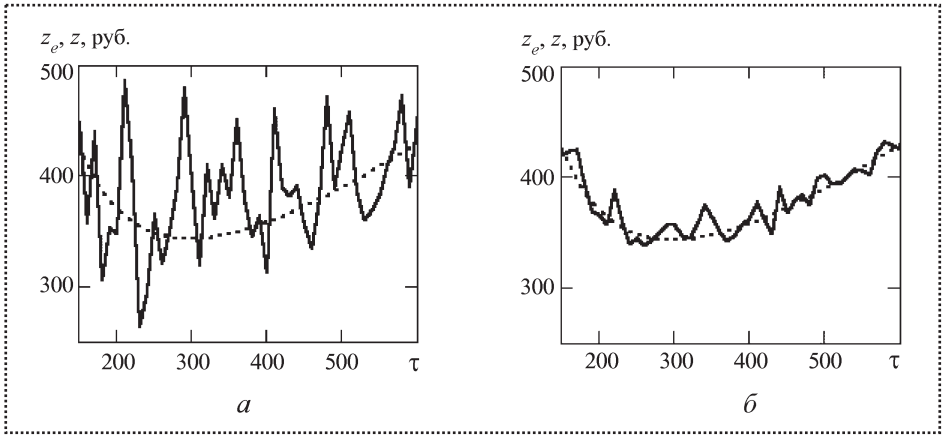

Рис. 4. Результаты моделирования процедуры статистического регулирования при контроле качества по количественному признаку:
а – $k = 10$; *б* – $k = 100$;
— – z_e; – – – z

Далее генерировались нормально распределенные случайные числа x_0 в выборке объема n при налаженном процессе (*AQL*) для периода до обнаружения отказа. Подсчитывалось число дефектных деталей N_0 за этот период.

Указанные процедуры повторяли для k значений циклов отказа. Вычисляли средние значения $\overline{K}_{ed}$, $\overline{n}_d$, $\overline{K}_{ep}$, $\overline{N}_1$, $\overline{N}_0$. Средние значения затрат z_{e1}, z_{e2} определяли соответственно по формулам (1) и (2), а среднее значение затрат z_{e3} – по формуле

$$z_{e3} = c_3 (\overline{N}_1 - \overline{N}_0). \qquad (4)$$

Статистическую оценку сходимости теоретических результатов и результатов имитационного моделирования оценивали по критерию χ^2 по всему диапазону значений периода контроля τ аналогично рассмотренному ранее варианту статистического контроля.

На рис. 4 представлены теоретические $z(\tau)$ и экспериментальные $z_e(\tau)$ зависимости затрат от периода контроля τ для процедуры статистического регулирования при контроле качества по количественному признаку с параметрами: $c_0 = 10$; $c_1 = 0{,}1$; $c_2 = 100$; $c_3 = 1{,}1$; $LQL = 80$ %; $AQL = 77$ %; среднее квадратическое отклонение $S = 1$ %; $x_U = 78{,}7$ %; $\overline{T} = 8$ ч $= 480$ мин; $\tau = 150...600$ шт.; $n = 3$; П $=$ $= 10$ шт./мин.

Результаты имитационного моделирования показали, что для представительной совокупности периодов отказа $k > 20$ экспериментальные значения затрат соответствуют теоретическим.

Разработанные имитационные модели включают в качестве исходных данных результаты статистического анализа технологических процессов сборки (законы распределения случайных значений, средний уровень дефектности, характеристики положения и рассеивания для параметров процессов), поэтому такое моделирование само по себе имеет практическую ценность, как инструмент анализа и выбора наименее затратного варианта плана выборочного контроля качества сборки.

В целом результаты имитационного моделирования процедур статистического регулирования при различных вариантах выборочного контроля показали, что разработанные теоретические модели планов и методики их оценки достоверно описывают процедуры контроля качества и регулирования технологических процессов автоматизированной сборки многоэлементных изделий на АРЛ и могут быть использованы на практике.

Библиографический список

1. **Горелов А.С., Прейс В.В.** Управление качеством автоматизированной сборки многоэлементных изделий массового выпуска на основе статистических методов // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2012. № 1. С. 40–43.

2. **Горелов А.С., Прейс В.В., Сосков В.Б.** Принципы построения интегрированной системы автоматизированного статистического контроля качества машиностроительной продукции // Станки и инструмент. 2007. № 12. С. 2–5.

3. **Горелов А.С., Прейс В.В., Саввина Е.А.** Проблемы реализации автоматизированного статистического контроля качества машиностроительной продукции // Станки и инструменты. 2007. № 8. С. 53–57.

4. **Горелов А.С., Прейс В.В.** Методологические основы автоматизированного статистического контроля качества продукции массовых производств // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2011. № 135. С. 126–133.

5. **Горелов А.С., Прейс В.В., Саввина Е.А.** Определение параметров статистического регулирования технологического процесса на основе экономических показателей // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 2. Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. С. 374–380.

6. **Горелов А.С., Прейс В.В., Саввина Е.А.** Экономическая оценка планов статистического контроля качества и регулирования автоматизированной сборки многоэлементных изделий // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2013. № 4. С. 3–5.

УДК 622.242

Ю.А. Лагунова, *д-р техн. наук,* **А.Е. Калянов**
(Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург)
E-mail: yu.lagunova@mail.ru

Применение гидропневмоаккумуляторов в горных машинах

Рассмотрены конструкции горного оборудования как для открытых, так и подземных горных работ, в которых использованы гидропневмоаккумуляторы. Показано, что применение гидропневмоаккумуляторов обеспечивает существенное снижение энергоемкости рабочих процессов и повышает производительность горных машин – буровых установок, погрузчиков, дробилок, гидромолотов и др.

The construction of mining equipments for both open and underground mining operations, which use hydro-pneumatic accumulators was describes. It is shown that the use of hydro-pneumatic accumulators for lower power consumption and increases workflow productivity mining equipment – drilling rigs, loaders, crushers, hammers, etc.

Ключевые слова: применение гидропневмоаккумуляторов, привод буровой установки, секция механизированной крепи, горный комбайн, гидромолот, скрепер, погрузчик, шагающий драглайн, конусная дробилка.

Keywords: application hydro-pneumatic accumulators, drive drilling rig, powered support section, mining machine, hammer, scraper, loader, walking dragline, cone crusher.

В современных машинах, оснащенных гидравлическими устройствами, с целью повышения КПД гидравлической системы, уменьшения мощности насоса, увеличения надежности работы системы и выполнения ряда вспомогательных функций получили применение аккумуляторы. В горно-рудной промышленности на принципе использования энергии аккумуляторов строят гидромеханические машины для выработки угля и дробления горных пород; в автомобильной промышленности аккумулятор используется для пуска двигателя и т.д. Применение аккумуляторов, как показал опыт, дает значительный экономический эффект.

В качестве носителя потенциальной энергии в аккумуляторах используют груз, пружины или газ, в связи с чем они могут быть разделены на три группы: грузовые, пружинные и газогидравлические.

Грузовые аккумуляторы состоят из цилиндропоршневой группы плунжерного типа и груза, расположенного строго симметрично относительно плунжера. Теоретически постоянное давление независимо от положения плунжера создается силой тяжести груза и плунжера, поэтому такой аккумулятор считают идеальным. Однако в покое и при движении плунжера, вследствие трения в уплотнении и инерции груза, давление в аккумуляторе колеблется. Возникающие скачки давления в гидравлической системе, ввиду инерции груза, грузовой аккумулятор демпфирует не полностью. Грузовые аккумуляторы просты, однако громоздки, поэтому их приходится устанавливать на фундаментах вне цеха. Дороговизна эксплуатации ограничивает применение грузовых аккумуляторов.

Пружинные аккумуляторы накапливают потенциальную энергию за счет деформации пружины. Давление в таком аккумуляторе поддерживают одна или несколько пружин. По мере разжатия пружины давление жидкости в аккумуляторе меняется. Пружинные аккумуляторы обладают меньшей инерционностью, чем грузовые аккумуляторы, поэтому их применяют в гидросистемах для компенсации гидравлических ударов, а также для удержания давления в зажимных устройствах. Для больших расходов жидкости и давлений выше 20 МПа они оказываются громоздкими.

Газогидравлические аккумуляторы основаны на использовании сжимаемости газа, что используют для поддержания давления жидкости в аккумуляторе. Если в грузовом аккумуляторе давление почти постоянно и не зависит от расположения плунжера или поршня, в пружинном оно изменяется пропорционально линейной характеристике, то в газогидравлическом аккумуляторе давление жидкости меняется по законам изменения давления в газах. Благодаря сжимаемости газа газогидравлические аккумуляторы особенно пригодны как демпфирующие и упругие элементы. По конструктивным признакам они отличаются в зависимости от того, есть ли разделитель между жидкой и газовой средой или его нет.

Рассмотрим примеры применения гидроаккумуляторов в конструкциях горных машин.

Буровая установка УРБ-2А2

Установка предназначена для вращательного бурения долотами и твердосплавными коронками. Все механизмы, входящие в установку (рис. 1), в том числе:

раздаточная коробка, передающая вращение от ходового двигателя автомобиля; буровой насос НБ-32 или компрессор КТ-7; мачта с кронблоком, подвижным вращателем и одноцилиндровым гидроподъемником двустороннего действия; пульт управления механизмами установки; масляные баки для обеспечения маслом гидросистемы буровой установки – смонтированы на раме, закрепленной на шасси автомобиля.

Установка имеет подвижный вращатель, который используется в процессе бурения, наращивания инструмента без отрыва его от забоя и выполняет совместно с гидроподъемником работу по спуску-подъему инструмента и принудительную подачу его на забой. Кинематика и мощность вращателя обеспечивают также свинчивание и развинчивание бурильных труб, поэтому специальные механизмы для этой цели не нужны.

Вращение от ходового двигателя автомобиля при частоте вращения $n = 1800$ мин$^{-1}$ через коробку перемены передач, раздаточную коробку автомобиля с помощью карданных валов передается на раздаточную коробку буровой установки. Вращатель представляет собой трехскоростную коробку с цилиндрической прямозубой передачей в стальном литом корпусе. С пульта управления можно изменять и реверсировать на каждой передаче частоту вращения шпинделя от нуля до максимума за счет дросселирования жидкости, подводимой к гидродвигателю вращателя. Мачта установки – сварная из труб-швеллеров. Она опирается на опоры, установленные на раме, и шарнирно на них закреплена. Подъем и опускание мачты осуществляются гидроцилиндром.

Повышения точности забуривания скважин и долговечности рабочего органа буровой установки можно достичь за счет обеспечения постоянного прижатия центрирующих поджимных роликов [1].

Указанная цель достигается тем, что в рабочем органе буровой установки, включающем мачту с направляющими и размещенную на ней каретку вращателя, содержащую направляющие и центрирующие поджимные ролики с прижимными элементами, на подвижной каретке вращателя размещена автономная гидравлическая система с гидроаккумулятором, а прижимные элементы центрирующих поджимных роликов выполнены в виде включенных в эту систему гидроплунжеров, соединенных своими штоками с центрирующими поджимными роликами для постоянного их прижатия к направляющим мачты.

Рабочий орган буровой установки показан на рис. 2, а ее гидравлическая схема – на рис. 3.

Мачта *1* (см. рис. 2) выполнена из швеллеров, по внутренним направляющим поверхностям которых под действием тяговой системы (не показана) перемещается подвижная каретка *4* вращателя, связанная с мачтой посредством направляющих *3* и центрирующих поджимных роликов *2* с прижимными элементами в виде четырех гидроплунжеров (ГЦ1, ГЦ2,

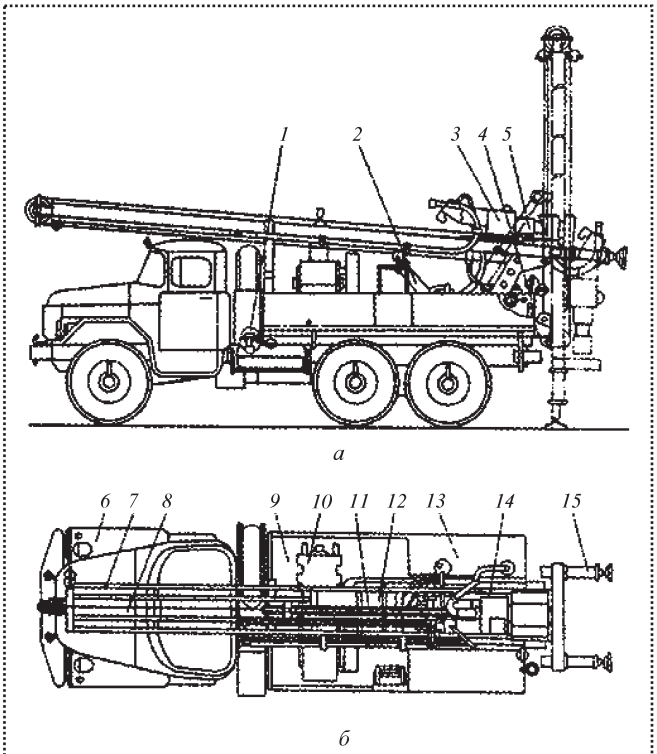

Рис. 1. Буровая установка УРБ-2А2:
а – вид сбоку; *б* – вид сверху; *1* – коробка отбора мощности; *2* – цилиндр подъема мачты; *3* – вращатель; *4* – пульт управления; *5* – элеватор для труб и патрон для шнеков; *6* – автомобиль; *7* – мачта; *8* – талевая система; *9* – рама; *10* – установки бурового насоса и компрессора; *11* – гидродомкрат подачи; *12* – раздаточная коробка; *13* – обвязка гидросистемы; *14* – каретка; *15* – опорный домкрат

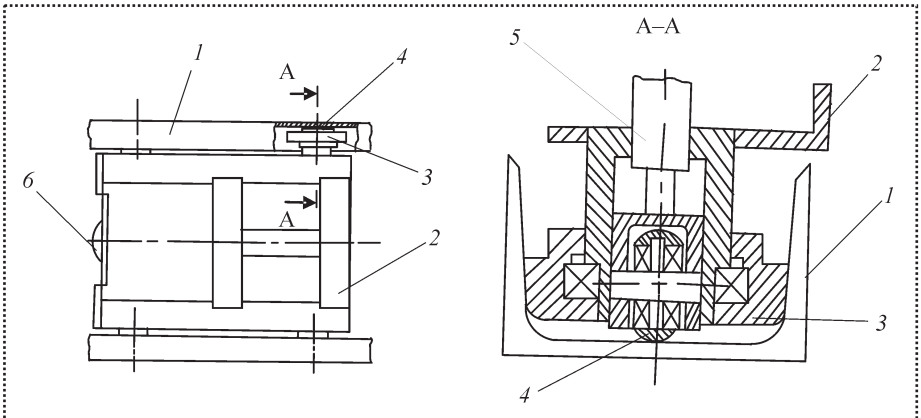

Рис. 2. Рабочий орган буровой установки УРБ-2А

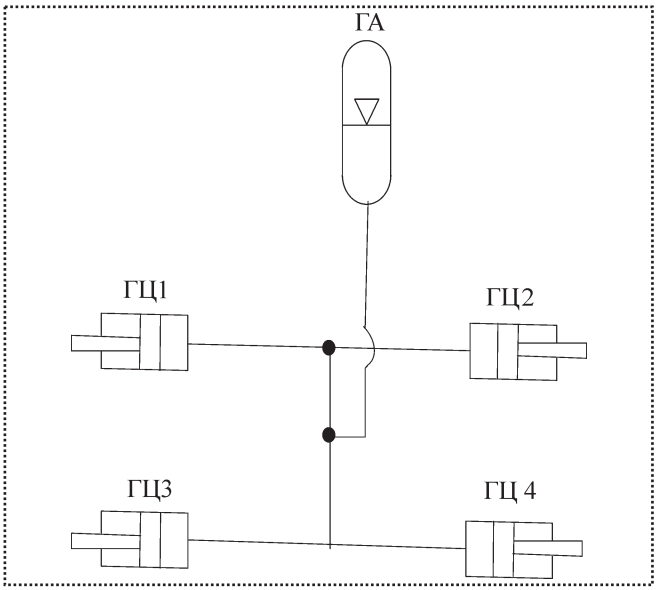

Рис. 3. Гидравлическая система с гидроаккумулятором

ГЦ3, ГЦ4) *5*, соединенных своими штоками с центрирующими поджимными роликами *2* и включенных в автономную гидравлическую систему с гидроаккумулятором (ГА) *6*, размещенную на подвижной каретке вращателя *4*.

В процессе бурения скважин каретка вращателя *4* под действием талевой системы перемещается по внутренним направляющим поверхностям мачты *1* посредством направляющих роликов *3* и центрирующих поджимных роликов *2*. При этом каждый из роликов *2* связан со штоками гидроплунжеров *5*, включенных в автономную гидравлическую систему с гидроаккумулятором *6*, обеспечивающим постоянное прижатие центрирующих поджимных роликов *2* к направляющим мачты *1*.

За счет обеспечения точности центрирования каретки вращателя по оси бурения существенно повышается точность забуривания скважин, а следовательно, возможно сократить время вспомогательных операций и повысить производительность бурения. Кроме этого, исключение значительных зазоров в местах сопряжения роликов каретки с направляющими мачты позволяет существенно снизить шум, вибрации и биение каретки вращателя и повысить долговечность рабочего органа в целом.

Секция механизированной крепи

Механизированные крепи могут быть использованы в очистных комплексах и агрегатах для выемки полезных ископаемых. Важным элементом механизированной крепи является гидропривод. Изобретение [2] позволяет снизить затраты энергии при эксплуатации секции механизированной крепи.

Гидропривод секции механизированной крепи содержит напорную гидролинию *1*, соединенную через обратный клапан *3* с насосной станцией, и сливную гидролинию *2* (рис. 4). Гидрораспределителем *6* к ним подключена гидростойка *7*, снабженная гидрозамком *8* одностороннего действия и предохранительным клапаном *9* с подвижным седлом. Выход предохранительного клапана *9* гидростойки *7* соединен с дополнительной гидролинией *11*, один конец которой через дополнительный предохранительный клапан *12* соединен со сливной гидролинией *2*, а другой конец заглушен. В дополнительную гидролинию *11* включены гидроаккумуляторы *10*, распределенные вдоль нее. Дополнительная гидролиния *11* соединена с напорной гидролинией *1* через дополнительный гидрораспределитель *13*. Гидродомкрат передвижки *4* через гидрораспределитель *5* соединен с гидролиниями *1* и *2*.

Гидропривод секции механизированной крепи работает следующим образом. Распор гидростойки *7* и передвижка секции механизированной крепи гидроцилиндром передвижки *4* производится за счет энергии рабочей жидкости, подаваемой от насосной станции по гидролиниям *1* и *2* через гидораспределители *5* и *6*. Односторонний гидрозамок *8* фиксирует поршень гидростойки *7* в выбранном положении при отключении гидрораспределителя *6*. При этом гидролиния *11* отключена от насосной станции гидрораспределителем *13*.

При возрастании горного давления в поршневой полости гидростойки *7* повышается давление рабочей

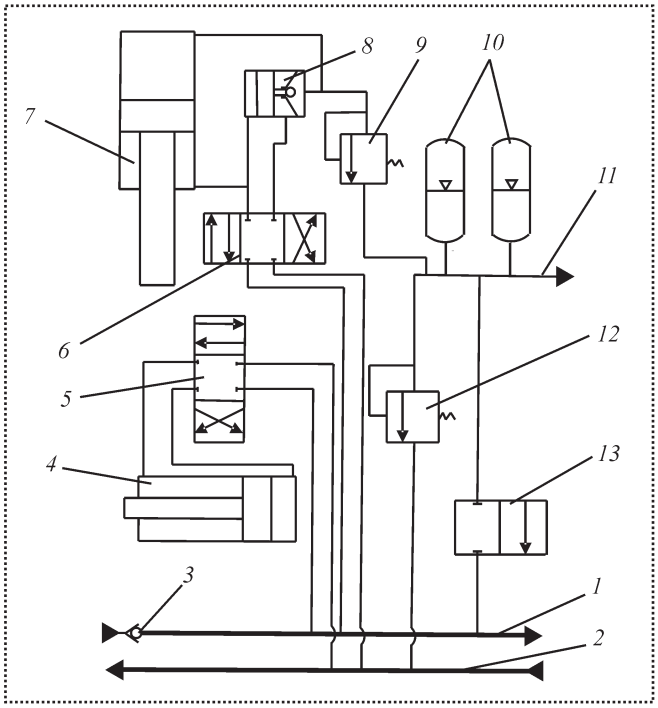

Рис. 4. Принципиальная гидравлическая схема секции механизированной крепи

жидкости, при достижении максимального значения которого происходит открытие запорного элемента предохранительного клапана с подвижным седлом *9* и жидкость из поршневой полости гидростойки *7* поступает по гидролинии *11* в гидроаккумуляторы *10*, заряжая их. При этом дополнительный предохранительный клапан *12* закрыт и не пропускает жидкость в сливную гидролинию *2*.

Плавающее седло предохранительного клапана *9* обеспечивает открытие запорного элемента при постоянном значении максимального давления рабочей жидкости в поршневой полости гидростойки *7* в условиях изменения давления в гидролинии *11* в пределах от минимального до максимального давления зарядки гидропневмоаккумуляторов рабочей жидкостью.

Запасенная в гидропневмоаккумуляторах *10* потенциальная энергия при переключении дополнительного гидрораспределителя *13* возвращается через напорную гидролинию *1* и гидрораспределители *5* и *6* в поршневую полость гидростойки *7* для совершения распора крепи или в гидродомкрат передвижки *4* для передвижки секции крепи.

В процессе эксплуатации существующих механизированных крепей каждая гидростойка испытывает возрастающее горное давление, под действием которого в поршневой полости гидростойки пропорционально возрастает давление рабочей жидкости. При достижении предельного значения давления, которое существенно превышает давление при распоре перекрытия, гидростойка начинает работать в режиме постоянного сопротивления за счет периодического сброса части рабочей жидкости через предохранительный клапан в сливную гидролинию.

Таким образом, под действием горного давления пород кровли гидростойка переходит в насосный режим работы. Однако при этом энергия рабочей жидкости, накопленная в поршневой полости гидростойки, расходуется бесполезно.

Создание энергосберегающего гидропривода секции механизированной крепи заключается в использовании принципа обратимости объемных гидравлических машин (гидростоек), периодического характера их работы в режиме гидронасосов под действием горного давления, а также применении гидропневмоаккумуляторов для накопления потенциальной энергии рабочей жидкости, а именно в направлении рабочей жидкости, обладающей потенциальной энергией из гидростойки гидропневмоаккумулятора, с последующим использованием ее при выполнении операции распора гидростойки или передвижки секции крепи.

Введение в гидропривод секции механизированной крепи дополнительных элементов позволяет обеспечить возврат дополнительной энергии, появившийся в гидросистемах в момент проявления повышенного горного давления и накопленной в гидропневмоаккумуляторах, в гидросистему механизированной крепи для совершения полезной, связанной с распором гидростойки или передвижкой секции крепи, что позволяет снизить затраты энергии при эксплуатации гидропривода механизированных крепей очистных комплексов.

Горный комбайн

Горный комбайн включает:

- режущую часть с редукторами, электродвигателями и исполнительными органами;
- механизм подачи, выполненный в виде дифференциала, солнечная шестерня которого через зубчатые колеса связана с электродвигателем;
- движитель;
- внешнюю зубчатую обойму дифференциала, выполненную с возможностью перемещения и взаимодействия через эксцентрик с упругим элементом;
- водило, соединенное с движителем через зубчатые передачи.

Механизм подачи снабжен блоком управления, жестко закрепленным в редукторе механизма подачи. Блок управления имеет радиально расположенные подпружиненные плунжеры, установленные без зазора к обоймам подшипников эксцентрика большого солнечного колеса дифференциала. Это дает возможность удержания эксцентрика усилием других элементов, имеющих различную жесткость. Указанная жесткость задается установленными пружинами и сопротивлением единой гидравлической системы блока управления, образованной плунжерами со всасывающими клапанами, связанными последовательно между собой нагнетательными клапанами и аккумулятором, а также дросселем и предохранительным клапаном, установленными с возможностью регулирования между аккумулятором и масляной ванной. Все это определяет режим нагрузки электродвигателя и кинематической цепи движителя.

Сущность патента [3] заключается в том, что механизм подачи снабжают блоком управления, состоящим из жестко закрепленного в редукторе механизма подачи корпуса блока управления. Указанный механизм имеет радиально расположенные подпружиненные плунжеры, установленные без зазора к обоймам подшипников эксцентрика внешней зубчатой обоймы дифференциала с возможностью удержания эксцентрика усилием упругих элементов, имеющих различную жесткость.

Жесткость определяется установленными пружинами и гидравлическим сопротивлением единой гидравлической системы блока управления, образованной плунжерами со всасывающими клапанами, связанными последовательно между собой нагнетательными клапанами и аккумулятором, а также предохранительным клапаном и дросселем равного сопротив-

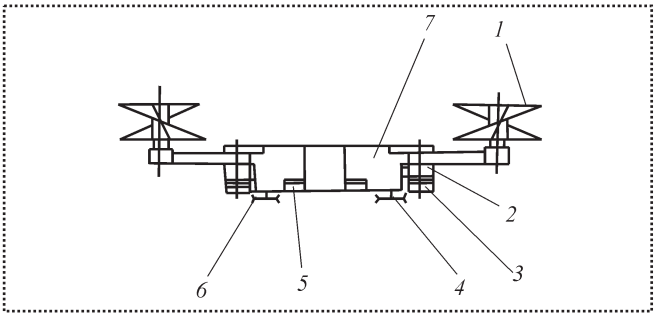

Рис. 5. Блок управления плунжерами

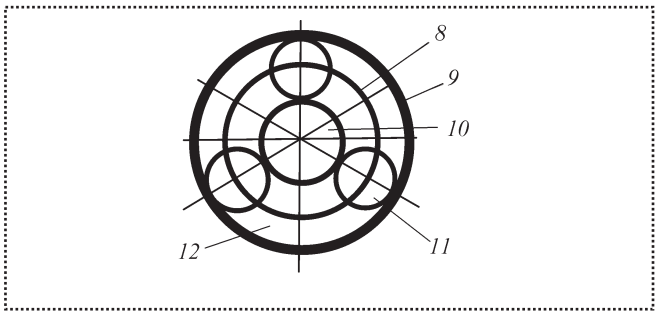

Рис. 6. Кинематическая схема дифференциала

ления. Последние имеют возможность регулирования, установлены между аккумулятором и масляной ванной и определяют режим нагрузки электродвигателя и кинематической цепи движителя.

Кроме того, дроссель, установленный между аккумулятором и масляной ванной, может быть выполнен в виде дросселя равного сопротивления.

Технический результат изобретения выражается в выборе оптимальных режимов скорости подачи и нагрузки с помощью гидромеханической системы механизма подачи. Указанная система состоит из взаимоувязанных блоков управления и механических редукторов, осуществляющих удержание эксцентрика внешней зубчатой обоймы дифференциала посредством упругих элементов и сопротивления единой гидравлической системы, а также регулируемого предохранительного клапана, определяющего режим нагрузки электродвигателя и кинематической цепи цевочного движителя.

Горный комбайн (рис. 5–7) работает следующим образом.

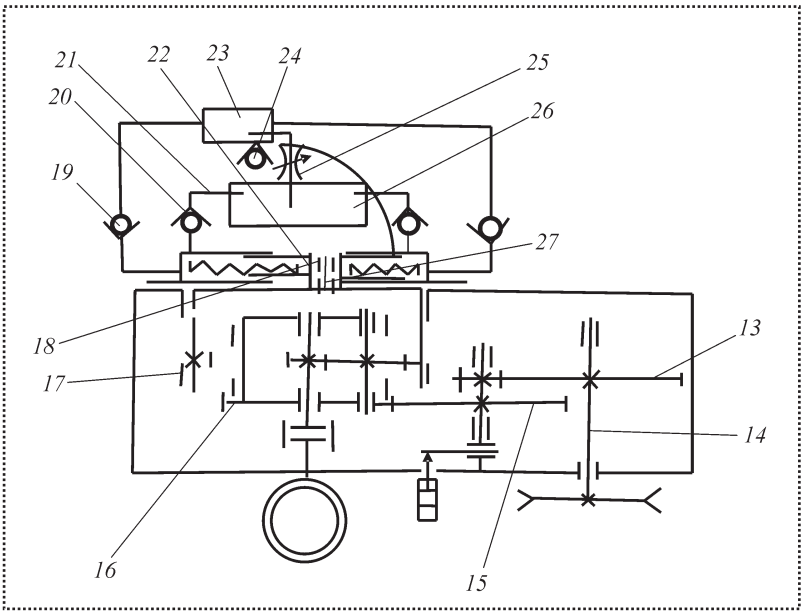

Рис. 7. Гидрокинематическая схема подающей части

Исполнительные органы *1* приводятся в движение электродвигателем *3* через редукторы режущей части. Перемещение горного комбайна осуществляется механизмом подачи *4*, который приводится в движение от отдельного асинхронного электродвигателя *5*. В случае номинального режима дифференциал *8* работает как простая планетарная передача.

Вращение от электродвигателя *5* передается малому солнечному колесу *10* через сателлиты *11* большому солнечному колесу *12* и далее водилу *9*. Водило *9* вращает колесо 1*5* посредством колеса *16*. Зубчатое колесо *15* через промежуточные шестерни передает вращение на зубчатое колесо *13* и вал *14* на цевочное колесо *6*, являющееся водилом комбайна.

В режиме перегрузки водило *9* останавливается, дифференциал *8* превращается в простой зубчатый редуктор с внутренним зацеплением. Асинхронный электродвигатель *5* передает крутящий момент через малое солнечное колесо *10*, сателлит *11*, большому солнечному колесу *12*, которое, вращаясь в подшипниках *17*, своим эксцентриком *27* через подшипники *18* и обойму *22* взаимодействует с плунжером *21*. Плунжер *21* открывает всасывающий клапан *20* и засасывает масло из ванны *27*.

При дальнейшем движении плунжера *21* всасывающий клапан *20* закрывается и под действием давления масла открывается нагнетательный клапан *19*. Далее масло перекачивается в гидроаккумулятор *23*. При этом плунжер *21* удерживает вращение эксцентрика *27*, регулируя скорость комбайна. Пружины плунжеров *21* могут быть установлены различной жесткости, что изменяет сопротивление единой гидравлической системы и режим работы комбайна. Но в большинстве случаев желательно устанавливать противолежащие пружины плунжеров *21* различными по жесткости с другой парой пружин для периодических нагружения и разгрузки электродвигателя *5* механизма подачи *4*.

В гидроаккумуляторе *23* давление масла выравнивается, и регулируемый дроссель *25*

переливает масло в ванну *26*. Оператор регулирует дроссель *25* в зависимости от необходимой скорости подачи, определяемой настройкой предохранительного клапана *24*, не допускающего перегрузки электродвигателя механизма подачи *5*.

Автоматический режим регулировки и защиты механизма подачи от перегрузки производится за счет упругого элемента – пружин совместно с дросселем *25*, которые изменяют гидравлическое сопротивление системы блока управления. Если корпус комбайна выполнен с дополнительным механизмом подачи *7*, то суммарная нагрузка на комбайн делится поровну между двумя идентичными механизмами подачи *4* и *7*, за счет поочередного удержания эксцентрика *27* внешней зубчатой обоймы *22* дифференциала *8* посредством пружин плунжеров *21* и единых гидравлических систем блока управления каждой подающей части.

Гидроударный инструмент (гидромолот)

Гидромолот (рис. 8) – сменное оборудование гидравлического экскаватора, погрузчика или трактора – предназначен для вскрытия асфальтобетонных покрытий, разрушения бетонных и железобетонных конструкций, рыхления скальных и мерзлых грунтов, уплотнения рыхлого грунта (при использовании сменного рабочего органа – трамбовки) и др.

Гидромолот устанавливают на экскаватор вместо снятой рукояти или ковша и подключают к гидравлической системе. Он незаменим при вскрытии подземных сооружений – тепловых магистралей, газопроводов, трубопроводов и т.п., его широко используют в коммунальном хозяйстве, строительстве, для разрушения отслуживших срок сооружений, а также безвзрывной проходки горных выработок.

Использование гидромолотов, например, в коммунальном хозяйстве позволяет полностью отказаться от применения так называемого "горячего" способа вскрытия мерзлого грунта. Отпадает необходимость отогрева земли, при этом значительно сокращаются продолжительность и материальные затраты на земляные работы в зимнее время, что особенно важно при ликвидации аварий на подземных коммуникациях.

Исполнительный механизм гидромолота может быть изготовлен с использованием гидропневмоаккумулятора или гидравлических аккумуляторов типа "жидкая пружина". Как и все машины виброударного действия, гидромолоты характеризуются частотой ударов и энергией единичного удара. Энергетический диапазон современных гидромолотов составляет 0,5...20 кДж, частота ударов 10...40 Гц. Эффективное разрушение материалов разной прочности требует определенной комбинации указанных характеристик. Для разрушения более прочных материалов нужна большая энергия единичного удара.

В конструкции гидромолотов используют автоматические устройства выбора режима нагружения по энергии и частоте удара. В некоторых моделях молотов применена автоматическая система ударного нагружения, оперативно реагирующая на изменение сопротивления. Гидромолот приводят в работу при определенном значении смещения инструмента, характеризующего его правильную установку на объекте обработки.

В приводе большинства гидромолотов зарубежного производства, а также отечественных гидромолотов серии "Импульс" (И-200 и И-300М) применены гидропневматические аккумуляторы (мембранные и поршневые), в которых в качестве упругого элемента используется сжатый азот.

Конструкция нового поколения отечественных гидромолотов Д-600, Д-550 (рис. 9) и Д-450 серии "Дельта" (в стадии разработки находятся Д-250, Д-150) основана на использовании эффекта "жидкой пружины", который не имеет широкого применения в мировой практике производства гидромолотов. Исполнительный механизм гидромолота серии "Дельта" способен рекуперировать возвратный, или откатный, импульс рабочего бойка, возникающий после удара, и в результате энергия упругих колебаний жидкости в гидросистеме молота затрачивается на полезную работу возвратно-поступательного движения рабочего инструмента.

Рабочий элемент (боек) молота одновременно служит поршнем для накопления энергии гидросистемы при возвратном движении после совершения удара. Утилизация импульса обратного хода рабочего бойка в полезную энергию "жидкой пружины", совершающей возвратно-поступательное движение, позволяет исключить из гидравличе-

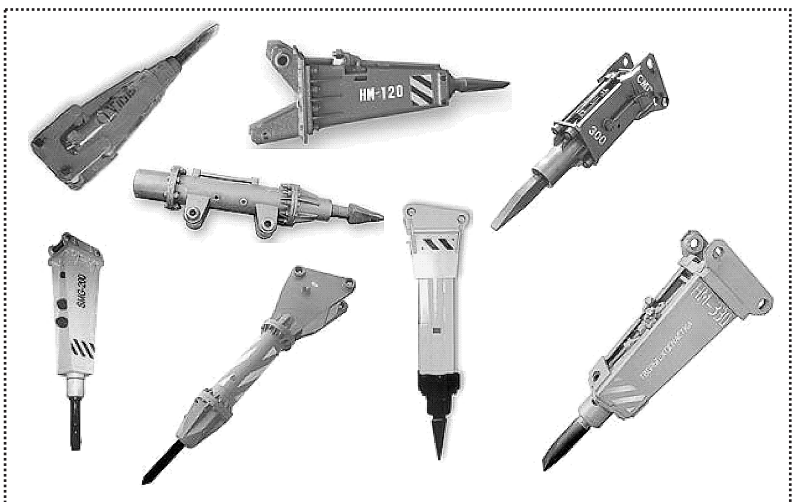

Рис. 8. Гидромолоты

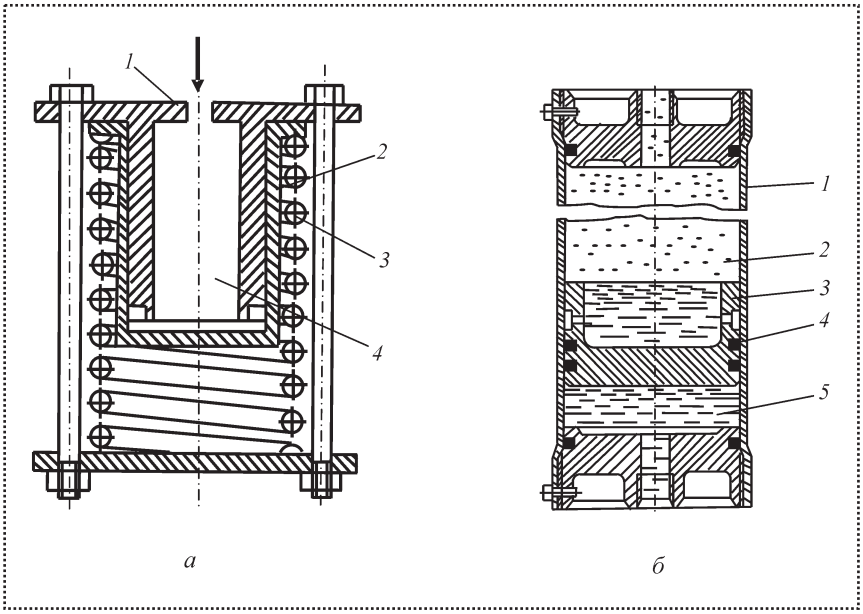

Рис. 9. Конструкции рабочего элемента молота:
а – пружинный аккумулятор: *1* – корпус; *2* – поршень (боек); *3* – пружина; *4* – рабочая полость; *б* – "жидкая пружина": *1* – корпус; *2* – поршень (боек); *3* – уплотнения; *4* – полость для подачи сжатого воздуха; *5* – полость для подачи жидкости

ской системы ударного инструмента пневматические камеры. В гидромолоте Д-550 производства ОАО "Невьянский машиностроительный завод" в качестве энергоносителя применяют рабочую жидкость гидросистемы экскаватора ЭО-5126, а гидроаккумулятор с жидкостной пружиной упрощает его эксплуатацию [4].

Это техническое решение существенно упростило конструкцию и повысило надежность эксплуатации опытных образцов гидромолотов, а применение гидроаккумулятора с жидкостной пружиной упрощает эксплуатацию – не нужен контроль зарядки аккумулятора.

ОАО "Тверьтехоснастка" предлагает четыре модели гидромолотов: НМ-120, НМ-230, НМ-330 и НМ-440. Первые две предназначены для навески на одноковшовые экскаваторы-погрузчики. Модели НМ-330 и НМ-440 агрегатируют с одноковшовыми экскаваторами на колесном и гусеничном ходу.

Гидромолот НМ-120 устанавливают на экскаваторы-погрузчики и он может заменить зарубежные аналоги на всех видах работ, так как он имеет следующие особенности:

- увеличенный ресурс;
- возможность выполнять горизонтальные и вертикальные работы с обеспечением устойчивости базовой машины на максимальном вылете рабочего оборудования, а также более точные работы при сохранении высокой эффективной мощности гидромолота;
- исключение вредного воздействия виброскорости и виброускорения на металлоконструкцию базовой машины;
- снижение утомляемости оператора благодаря пониженному уровню шума и вибраций;
- минимальные требования к напорно-расходным характеристикам базовой машины;
- автономная зарядка пневмоаккумулятора воздухом.

У аналогичного по конструкции гидромолота НМ-230 те же достоинства, а производительность выше.

Навесной гидромолот повышенной мощности НМ-330 с минимальным воздействием на гидравлическую систему и металлоконструкцию базовой машины разработан для экскаваторов типов ЭО-3323А, ЕК-14 и их аналогов. Он заменяет зарубежные аналоги на всех видах работ и наряду с достоинствами моделей НМ-120 и НМ-230 обеспечивает круговой сектор работы базовой машины, высокую эффективность при рыхлении мерзлых грунтов, минимальные требования к напорно-расходным характеристикам базовой машины.

Гидромолот НМ-440 рассчитан на выполнение больших объемов работ на прочных материалах, его навешивают на экскаваторы типов ЭО-4225, ЭО-4121 (г. Ковров), ЭО-4321В (г. Киев), ЕК-18, ЕТ-25 (г. Тверь).

Устройство ударного действия

Устройство ударного действия [5] можно использовать для разрушения скальных пород и искусственных материалов, рыхления мерзлого и уплотнения насыпного грунтов, т.е. в горной промышленности, металлургии и строительстве, а также при создании сваебойных и штамповочных молотов.

Устройство работает следующим образом (рис. 10).

В исходном состоянии ударник *9* и клапан *6* находятся в крайнем нижнем положении. Аккумуляторная камера *23* с корпусом *1* заполнена сжатым газом. Взводящая *12* и напорная *16* камеры сообщены между собой широкой круговой щелью, ширина которой $B = l_1 - l_2$. Переливная *2* камера через радиальные каналы *18*, канавку *20*, канал *3* сообщена со сливной линией *4*.

Жидкость от источника давления *8* по напорной линии *7* канала *5* поступает в напорную камеру *16*, откуда через щель шириной *B*, канал *11* – во взводящую

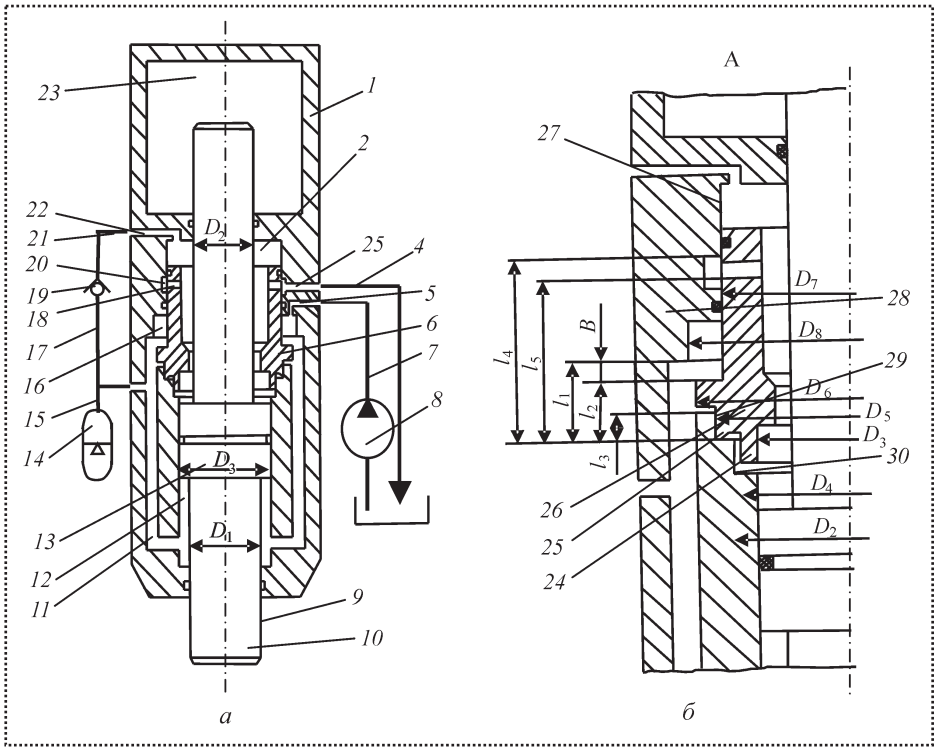

Рис. 10. Схемы ударного устройства:
а – конструктивная схема; *б* – размерная схема

камеру *12*, в которой давление жидкости повышается. Это давление действует на кольцевую площадь поршня *13*.

Ударник *9* перемещается вверх. Жидкость из переливной камеры *2* через каналы *18*, кольцевую канавку *20*, канал *3*, сливную линию *4* поступает в сливной бак. Давление газа в аккумуляторной камере *23* будет повышаться за счет уменьшения объема газа при входе в нее штока *10*.

В этот момент взводящая камера *12* изолирована от переливной камеры *2* клапаном *6*. Боковая поверхность ступени *26* клапана *6* сопряжена с поверхностью ступени *29* ступенчатой расточки корпуса *1*, а уплотнительный выступ *25* клапана *6* контактирует с торцевой поверхностью ступенчатой расточки корпуса *1*. На клапан *6* со стороны напорной камеры *16* действует осевая сила

$$P_{кл1} = p_ж \, \pi(D_5^2 - D_7^2)/4,$$

где $p_ж$ – давление жидкости в напорной *16* и взводящей *12* камерах;

D_5, D_7 – диаметры ступеней *26* и *28* клапана *6* соответственно.

В конце своего движения вверх ударник *9*, поршнем *13* войдя в кольцевую расточку клапана *6* и соприкоснувшись своим торцом с торцом упомянутой расточки, увлекает клапан *6* за собой непосредственно перед тем, как уплотнительный выступ *25* ступени *26* клапана *6* выйдет из ступени *29* расточки корпуса *1*. Произойдет перекрытие радиальных каналов *18* поверхностью *27* расточки корпуса *1*, и ступень *29* своим верхним торцом войдет в напорную камеру *16*. С этого момента переливная камера *2* будет изолирована от сливной линии, а взводящая *12* и напорная *16* камеры будут сообщены между собой посредством щели, образованной боковыми поверхностями напорной *16* камеры и ступени *29* клапана *6*.

Ширина этой щели

$$B_1 = 1/2(D_8 - D_6),$$

где D_6 – диаметр ступени *29* клапана *6*;

D_8 – диаметр напорной камеры.

Эта щель между упомянутыми камерами создает значительное сопротивление, которое выражается перепадом давления p_1 жидкости между этими камерами. Под действием этого перепада давления на клапан *6* со стороны напорной камеры *16* будет действовать сила $P_{кл2}$, определяемая выражением

$$P_{кл2} = \Delta p_1 \, \pi(D_6^2 - D_7^2)/4,$$

где Δp_1 – перепад давления жидкости между напорной *16* и взводящей *12* камерами.

При дальнейшем движении ударника *9* совместно с клапаном *6* вверх, когда каналы *18*, связывающие переливную камеру *2* со сливной линией, перекрыты, жидкость из этой камеры по каналам *21* и *22*, обратный клапан *19*, каналам *15* и *17* будет поступать гидроаккумулятор *14*.

После выхода уплотнительного выступа *25* ступени *26* клапана *6* из ступени *29* расточки корпуса *1* давление жидкости в переливной *2* и взводящей *12* камерах становится примерно одинаковым, и равновесие сил, действующих на ударник *9*, нарушается, а равнодействующая этих сил будет направлена вниз, т.е. против его движения, и ее величина $P_{уд}$ будет равна

$$P_{уд} = p_г \, 0{,}25 \, \pi D_2^2 + p_ж \, \pi(D_1^2 - D_2^2)/4,$$

где $p_г$ – давление газа в газовой камере *23*;

D_1 и D_2 – диаметры нижнего *6* и верхнего штоков *4* ударника.

Под действием этой силы ударник *9* сначала затормаживается, а затем ускоренно движется вниз на удар, совершая рабочий ход. Во время торможения ударника *9* его кинетическая энергия преобразуется в потенциальную энергию сжатия газа в гидроаккумуляторе *14*, а затем, во время последующего рабочего хода, вновь преобразуется в кинетическую энергию ударника. Клапан *6* до остановки ударника *9* в крайнем верхнем положении движется совместно с последним, а с началом движения ударника *9* вниз клапан *6* продолжает двигаться вверх до момента, пока поршень *13* не выйдет из кольцевой расточки клапана *6*. После того как произойдет разделение поршня *13* и расточки клапана *6*, между нижним торцом клапана *6* и верхним торцом ступени *29* кольцевой расточки корпуса *1* образуется широкая щель, через которую жидкость из взводящей *12* и напорной *16* камер, а также из гидроаккумулятора *14* будет поступать в освобождающуюся полость за верхней частью поршня *13* ударника *9* переливную камеру *2*.

С момента перекрытия сливных каналов *18* во взводящей *12* и переливной *2* камерах устанавливается давление жидкости, определяемое гидроаккумулятором *14*, которое больше, чем максимальное давление жидкости при взводе ударника *9*, поэтому на ударник *9* при разгоне, помимо силы со стороны газовой камеры *23*, будет действовать в том же направлении сила давления жидкости $P_{ж}$, равная

$$P_{ж} = p_{ж}\,\pi(D_1^2 - D_2^2)/4,$$

где $p_{ж}$ – давление жидкости в гидравлической полости.

Клапан *6* после разделения с ударником *9* под действием силы $P_{кл2}$ со стороны напорной камеры *16* начнет перемещаться вниз на закрытие. Перемещение вниз клапана *6* будет происходить до того момента, пока между торцом ступени *24* клапана *6* и торцом, определяющим ступени *29* и *30* расточки корпуса *1*, не образуется такая кольцевая щель, при которой перепад давления жидкости p_2 между взводящей *12* и переливной *2* камерами не уравновесит силу, действующую на клапан *12* со стороны напорной *16* камеры. Это условие можно выразить уравнением

$$\Delta p_1\ \pi\,(D_6^2 - D_7^2)/4 = \Delta p_2\,\pi(D_5^2 - D_9^2)/4,$$

где D_9 – диаметр ступени *28* клапана *6*.

По мере увеличения скорости ударника *9* переток жидкости между упомянутыми полостями увеличивается, поэтому ширина упомянутой щели будет возрастать до конца рабочего хода ударника *9*.

Перепады давления p_1 и p_2 невелики по сравнению с давлением жидкости в напорной *16* и взводящей *12* камерах и, учитывая, что эти перепады давления существуют только во время рабочего хода ударника *9*, потери энергии незначительны, т.е. КПД устройства высокий.

В начале рабочего хода, пока скорость ударника *9* мала, рабочая жидкость от источника давления *8* большей частью будет поступать в гидроаккумулятор *14*, а в конце рабочего хода, кроме жидкости от источника давления, в переливную камеру *2* поступает практически вся жидкость, запасенная в начале хода в гидроаккумулятор *14*.

После удара ударника *9* по обрабатываемому материалу происходит его остановка, прекращается поток подачи жидкости в переливную камеру *2*, так как объем ее становится постоянным, перепад давления p_2 между камерами *12* и *2* исчезает. Перепад p_1 между напорной *16* и взводящей *12* камерами остается, так как поток жидкости между этими камерами остается постоянным.

Жидкость при неподвижном ударнике *9* поступает в гидроаккумулятор *14*. На клапан *6* в это время будет действовать только одна сила – сила давления жидкости со стороны напорной камеры *16*, определяемая перепадом давления p_1. Под действием этой силы клапан *6* перемещается вниз; сначала уплотнительный выступ *25* ступени *26* входит в цилиндрическую ступень *30* расточки корпуса, тем самым разобщая взводящую *12* и переливную *2* камеры, а затем начинается открытие каналов *18*, сообщая переливную камеру *11* со сливной линией *4*, и одновременно образуется щель между верхним торцом ступени *29* клапана *6* и торцом, разделяющим взводящую *12* и напорную *16* камеры. В связи с тем, что к концу рабочего хода в гидравлической полости гидроаккумулятора *14* остается некоторый небольшой запас рабочей жидкости, давление жидкости во взводящей *12* и напорной *16* камерах будет близко к максимальному значению.

Под действием этого давления на передний торец поршня *13* начинается движение ударника *9* вверх – холостой ход.

В первый момент, пока скорость мала, часть жидкости от источника давления *8* будет поступать в гидроаккумулятор *14* и после того, когда скорость ударника достигнет величины, равной

$$v_{уд} = Q_{нас}/0{,}25\,\pi(D_3^2 - D_1^2),$$

где $Q_{нас}$ – производительность гидронасоса источника давления *8*, аккумулятор *14* начнет разряжаться.

Так как скорость взвода ударника мала, ускорение разгона велико, объем жидкости, поступившей в аккумулятор, мал, то разрядка аккумулятора происходит уже в самом начале пути разгона, и до конца холостого хода ударника *9* аккумулятор будет оставаться разряженным. Далее цикл работы устройства повторяется.

Таким образом, в камерах взвода *12* и напорной *16* в течение всего рабочего цикла будет поддерживаться максимальное давление жидкости, что обеспечивает максимальную мощность устройства при минимальных мощности привода и размерах устройства. При этом гидронасос источника давления *8* работает практически при постоянном давлении, что благоприятно сказывается на работе как самого насоса, так и пускорегулирующей гидроаппаратуры и трубопроводов, особенно рукавов.

Устройство обеспечивает использование кинетической энергии ударника, запасенной им при холостом ходе для последующего разгона ударника при рабочем ходе. Благодаря большим проходным сечениям, по которым жидкость перетекает между камерами, как во время холостого, так и во время рабочего ходов потери энергии за счет сопротивлений незначительны, поэтому КПД устройства высокий.

Библиографический список

1. **Патент РФ № 2188296.** Буровая установка УБР 2А2 / В.Н. Шамшин, В.С. Исаков, Н.П. Чухряев, Д.С. Каратаев, А.П. Раксин, Н.А. Чухряева, Т.А. Ларченко. Опубл. 27.08.2002. Бюл. № 32. URL: http://www.drillings.ru/page 177.

2. **Патент РФ № 2131039.** Гидропривод секции механизированной крепи / Ю.Н. Казак, Н.Г. Жучкова, В.К. Демин. Опубл. 27.05.1999. Бюл. № 31.

3. **Патент** на полезную модель РФ № 2171375. Горный комбайн / Ю.Д. Федоровский, М.П. Кутья, Ю.П. Дубовский, Г.Н. Зинин, Г.Г. Фишер. Опубл. 27.07.2001.

4. **Петров Ю.** Гидромолот в России //Основные средства. 2005. № 3. URL: http://www.os1.ru/article/service/2005 03 A 2005 05 20-12 37 21.

5. **Патент РФ № 20395566.** Устройство ударного действия / П.Я. Фадеев, В.Я. Фадеев, М.М. Гусельников. Опубл. 10.11.1997. Бюл. № 1.

(Окончание следует)

ПРОДОЛЖАЕТСЯ ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ

"СБОРКА В МАШИНОСТРОЕНИИ, ПРИБОРОСТРОЕНИИ"

Издательство "Машиностроение" принимает заявки для оформления подписки на журнал **"Сборка в машиностроении, приборостроении"** *по:*

почте: 107076, Москва, Стромынский пер., д. 4;
факсу: (499) 269 48 97;
E-mail: *realiz@mashin.ru.*

В заявке необходимо указать:

- ☒ название журнала;
- ☒ период подписки;
- ☒ количество экземляров;
- ☒ название организации;
- ☒ почтовый и юридический адреса;
- ☒ ИНН, КПП, банковские реквизиты;
- ☒ телефон (с кодом города), факс, e-mail;
- ☒ ФИО контактного лица.

Доставка журналов производится после оплаты за счет издательства.

По вопросам подписки и доставки просим обращаться по телефонам:
(499) 269 66 00; (499) 269 52 98

По вопросам размещения рекламы в журнале можно обращаться по телефону *(499) 269 52 98*

ООО "Издательство **Машиностроение**", 107076, Москва, Стромынский пер., 4
Учредитель ООО "Издательство **Машиностроение**". Адрес электронной почты издательства: **mashpubl@mashin.ru**;
редакции журнала: **sborka@mashin.ru, http://www.mashin.ru** Телефон редакции журнала: (499) 268-38-42;
тел./факс (499) 268-85-26; факс 269-48-97.
Технический редактор *Жиркина С.А.* Корректоры *Сажина Л.И., Сонюшкина Л.Е.*
Сдано в набор 09.10.13 г. Подписано в печать 06.11.13 г. Формат 60×88 1/8.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Издательство Машиностроение".
Отпечатано в ООО "Белый ветер", 115407, г. Москва, Нагатинская наб., д. 54, пом. 4.