Иванов С. Н., Колесник М. Б., Колошенко Ю. Б., Просолович А. А., Ким К. К.
S. N. Ivanov, M. B. Kolesnik, Yu. B. Koloshenko, A. A. Prosolovich, K. K. Kim

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ВЫБОРА И АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С УЧЁТОМ ДЕЙСТВУЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ

STATEMENT OF THE PROBLEM OF SELECTION AND ALGORITHM FOR DETERMINING THE PARAMETERS OF THE TRANSFER ELEMENTS OF ELECTROMECHANICAL CONVERTERS TAKING INTO ACCOUNT THE OPERATING VOLTAGES

Иванов Сергей Николаевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: Ivanov.sn@email.knastu.ru.
Sergey N. Ivanov – Doctor of Engineering, Professor, Electromechanics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: Ivanov.sn@email.knastu.ru.

Колесник Максим Борисович – студент кафедры электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: kolmax2001@mail.ru.
Maxim B. Kolesnik – Student, Electromechanics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: kolmax2001@mail.ru.

Колошенко Юлия Борисовна – старший преподаватель кафедры «Авиастроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; тел. 8(4217)241-118. E-mail: koloschenko2011@yandex.ru.
Yulya B. Koloshenko – Senior Lecturer, Aircraft Construction Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str.; tel. 8(4217)241-118. E-mail: koloschenko2011@yandex.ru.

Просолович Алексей Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы автоматизированного проектирования» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; тел. 8(914)185-93-59. E-mail: office@knastu.ru.
Alexey A. Prosolovich – PhD in Engineering, Associate Professor, Computer-Aided Design System Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str.; tel. 8(914)185-93-59. E-mail: office@knastu.ru.

Ким Константин Константинович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электротехники и теплоэнергетики» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, Санкт-Петербург); Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский проспект, 9; тел. 8(903)096-57-70. E-mail: kimkk@inbox.ru.
Konstantin K. Kim – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Theoretical Electrical Engineering Department, Sankt-Petersburg State Transport University Emperor Alexander I (Russia, Sankt-Petersburg); house 9, Moskovsky Av. Sankt-Petersburg, Russia; tel. 8(903)096-57-70. E-mail: kimkk@inbox.ru.

Аннотация. Рассмотрена задача определения минимально допустимого диаметра исполнительного элемента, являющегося валом электромеханического преобразователя. Приведён алгоритм выбора диаметра ротора приводного механизма по заданной осевой нагрузке. Установлены критерии устойчивости резьбового соединения, обеспечивающего линейное перемещение тяги, с учётом напряжений сжатия/растяжения и изгиба.

Summary. The problem of determining the minimum allowable diameter of the actuator, which is the shaft of an Electromechanical Converter, is considered. An algorithm for selecting the rotor diameter of the drive mechanism

for a given axial load is presented. The stability criteria of a threaded connection providing linear traction movement, taking into account compression, tension and bending stresses, are established.

Ключевые слова: электропривод, исполнительный элемент, передача винт-гайка, алгоритм.

Key words: electric drive, executive element, screw-nut transmission, algorithm.

УДК 621.31:621.25

Введение. Автоматизация процессов проектирования и интеграция полученных результатов обеспечивают возможность создания простых и надёжных электроприводов на основе асинхронных короткозамкнутых двигателей с линейным перемещением исполнительного элемента, конструктивное исполнение которых описано в [1-3]. Анализ конструкции передаточного механизма показывает, что используемое в нём сопряжение типа «винт-гайка» является наиболее слабым звеном привода. Поэтому разработка методики выбора размерных соотношений передаточных элементов на основе технических и эксплуатационных характеристик электромеханических преобразователей представляет сложную вариационную задачу, требующую использования современных программных средств.

Выбор проектных параметров. Начальный этап проектирования требует установления номенклатуры проектных параметров, включающей следующие величины:

1. определение типа резьбы;
2. осевое усилие, приложенное к винту P;
3. допустимую из условия износа удельную нагрузку на виток q;
4. относительную высоту витка ψ_h. Для трапецеидальной резьбы ψ_h = 0,5;
5. относительную высоту гайки ψ_H. Рекомендуется принимать ψ_H = 1,2…2,5;
6. средний диаметр наружной резьбы d_2;
7. число витков в гайке z (не более 15);
8. шаг резьбы p;
9. допустимое напряжение на срез $[\tau_{ср}]$;
10. прочность витков ψ_a. Для трапецеидальной резьбы ψ_a = 0,67;
11. допустимое напряжение на изгиб $[\sigma_{изг}]$;
12. коэффициент приведения длины, зависящий от способа закрепления концов винта μ. При защемлении верхнего и нижнего концов μ = 0,5;
13. допускаемое напряжение при смятии $[\sigma_{см}]$;
14. коэффициент уменьшения допускаемого напряжения при продольном изгибе φ;
15. гибкость стержня λ, рассчитываемую по формуле

$$\lambda = \frac{\mu L}{i_{\min}},$$

где $i_{\min}$ – минимальный радиус инерции;

16. внутренний диаметр наружной резьбы d_3;
17. длину винта между закреплениями L.

В принятых условиях применения выбирается способ закрепления концов винта, приведённый на рис. 1.

Определение размерных соотношений. Учитывая характер нагрузки, действующей на передаточный элемент электромеханического привода, можем определить внутренний диаметр наружной резьбы винта, выполнив расчёт на устойчивость.

Исходные данные для расчёта в программе Mathcad приведены в табл. 1.

Рис. 1. Способ закрепления концов винта

Таблица 1

Исходные данные для расчёта в программе Mathcad

Критическая сила P, Н	L, мм	μ	$[\sigma_{см}]$, МПа	φ
10 000	1000	0,5	190	0,5

Внутренний диаметр наружной резьбы равен

$$d = \sqrt{\frac{4P}{\pi\varphi[\sigma_{см}]}},$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 10\,000}{\pi \cdot 0{,}5 \cdot 190 \cdot 10^6}} \cdot 1000 = 11{,}576 \text{ мм}.$$

Гибкость винта

$$\lambda = \frac{4\mu L}{d},$$

$$\lambda = \frac{4 \cdot 0{,}5 \cdot 1000}{11{,}576} = 172{,}757.$$

Коэффициент продольного изгиба равен

$$\psi = \varphi_2 + \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\lambda_1 - \lambda_2}(\lambda - \lambda_2),$$

где $\varphi_1, \varphi_2, \lambda_1, \lambda_2$ берутся из [5]: $\varphi_1 = 0{,}26$, $\varphi_2 = 0{,}23$, $\lambda_1 = 170$, $\lambda_2 = 180$.

$$\psi = 0{,}23 + \frac{0{,}26 - 0{,}23}{170 - 180}(172 - 180) = 0{,}251.$$

Относительная погрешность полученного результата

$$\gamma_1 = \frac{|\psi - \varphi|}{\varphi} \cdot 100\ \%,$$

$$\gamma_1 = \frac{|0{,}251 - 0{,}5|}{0{,}5} \cdot 100\ \% = 49{,}654\ \%.$$

Пересчитывается коэффициент продольного изгиба:

$$\varphi = \frac{\varphi + \psi}{2},$$

$$\varphi = \frac{0{,}5 + 0{,}251}{2} = 0{,}375.$$

Расчёт продолжается до получения заданного значения относительной погрешности результата γ_1.

Определяется критическая сила для полученного диаметра. При этом, если $\lambda > 100$, то критическая сила определится как

$$P_{\text{кр}} = \frac{\pi^3 \cdot E \cdot d^2}{4 \cdot \lambda^2},$$

где E – модуль Юнга,
если $\lambda < 100$, то критическая сила рассчитывается по выражению

$$P_{\text{кр}} = (a - b \cdot \lambda)\frac{\pi \cdot d^2}{4}.$$

Относительная погрешность полученного результата равна

$$\gamma_2 = \frac{\left|P_{\text{кр}} - P_0\right|}{P_0} \cdot 100\ \%,$$

где P_0 принимается равным заданному значению критической силы, которое не изменяется в процессе расчётов.

Если относительная погрешность полученного результата γ_2 не удовлетворяет заданным требованиям, то переопределяется исходная сила P:

$$P = \frac{P \cdot P_0}{P_{\text{кр}}}.$$

Затем производится пересчёт диаметра по новому циклу. Циклы повторяются, пока конечная относительная погрешность γ_2 не достигает необходимого значения, то есть пока P_0 не становится равной $P_{\text{кр}}$.

Расчёты в Mathcad обеспечивают точность $\gamma_2 = 5{,}96 \cdot 10^{-4}$ %. При заданной исходной критической силе P = 10 000 Н величина критической силы составила $P_{\text{кр}} = 9999{,}4$ Н, этой силе соответствует и критический диаметр $d = 12{,}673$ мм.

Полученное значение d позволяет перейти к выбору типового электромеханического преобразователя с использованием информационных справочных ресурсов [6].

Алгоритм расчёта представлен на рис. 2.

Построение графика зависимости $d = f(P, L)$. Для ускорения процесса подбора диаметров под требуемые проектные параметры использована программа на языке программирования Java. Для получения максимальной вычислительной точности таблица зависимости коэффициентов понижения φ допускаемого напряжения от гибкости λ аппроксимирована полиномом десятой степени, полученным в программе Matlab.

Полином принимает следующий вид:

$$\varphi(\lambda) = -9{,}6776 \cdot 10^{-21} \cdot \lambda^{10} + 8{,}9196 \cdot 10^{-18} \cdot \lambda^9 - 3{,}465 \cdot 10^{-15} \cdot \lambda^8 +$$
$$+7{,}4505 \cdot 10^{-13} \cdot \lambda^7 - 9{,}8715 \cdot 10^{-11} \cdot \lambda^6 + 8{,}5518 \cdot 10^{-9} \cdot \lambda^5 -$$
$$-4{,}945 \cdot 10^{-7} \cdot \lambda^4 + 1{,}799 \cdot 10^{-5} \cdot \lambda^3 - 3{,}6578 \cdot 10^{-4} \cdot \lambda^2 +$$
$$+1{,}0999 \cdot 10^{-3} \cdot \lambda - 1{,}0003.$$

Фрагмент программы представлен на рис. 3.

Расчёт, произведённый в Mathcad, был повторён в написанной программе. В данном случае была получена величина критического диаметра $d = 12{,}673$ мм.

Относительная погрешность полученных диаметров составила $\gamma = 1{,}489 \cdot 10^{-4}$ %. Ввиду существенно малой величины погрешности программа использована для построения зависимости внутреннего диаметра винта от силы, приложенной к нему, и от расстояния между закреплениями. Зависимость $d = f(P, L)$ представлена на рис. 4.

Внешний вид графика наглядно показывает, как изменяется величина требуемого внутреннего диаметра винта при изменении прилагаемой силы или изменении расстояния между закреплениями.

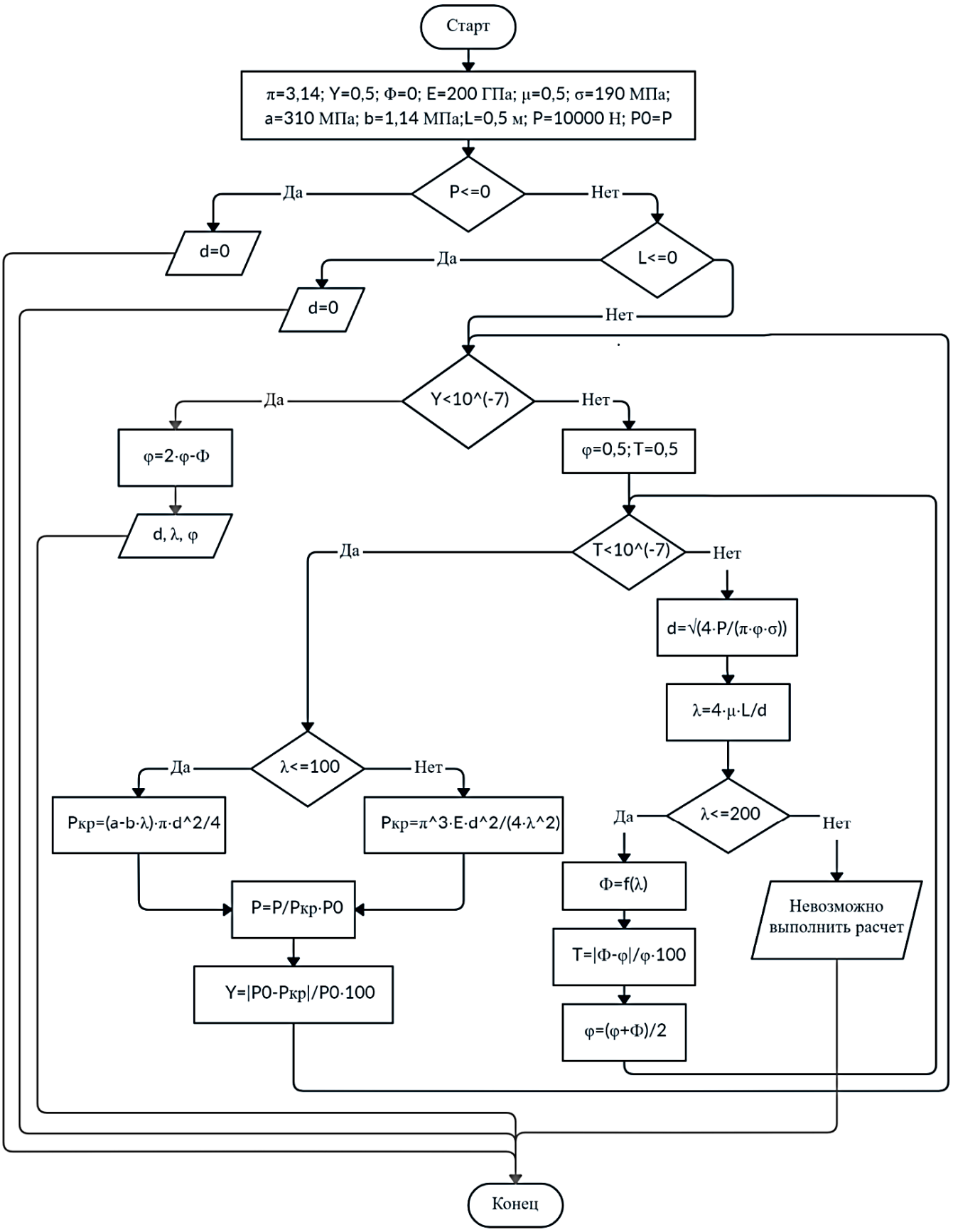


Рис. 2. Алгоритм расчёта внутреннего диаметра наружной резьбы винта

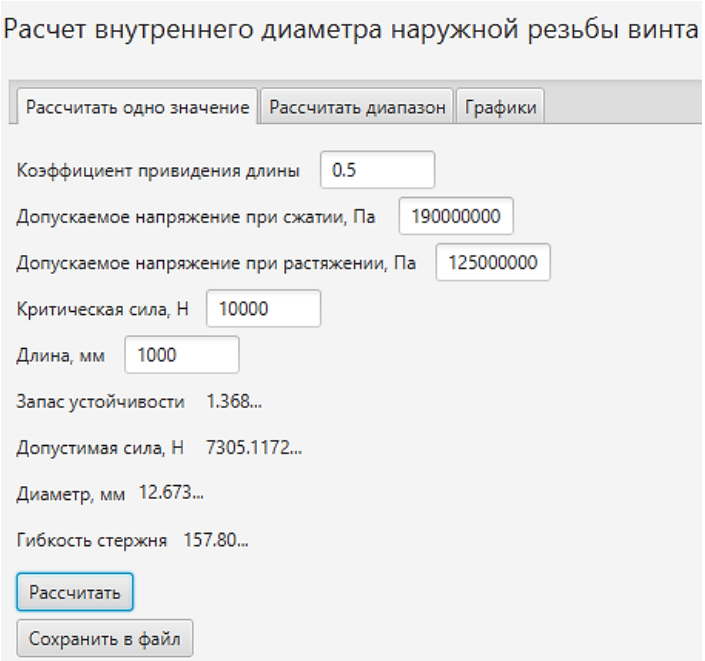


Рис. 3. Фрагмент программы по расчёту внутреннего диаметра наружной резьбы винта

Разработка алгоритма по расчёту сопряжения. Подбор сопряжения осуществляется на основе ГОСТ 24737-81 по алгоритму, представленному на рис. 5 и учитывающему работу сопряжения на износ (проверка витков резьбы на прочность, определение действующего в опасном сечении напряжения среза, определение действующего в опасном сечении напряжения изгиба, расчёт на устойчивость).

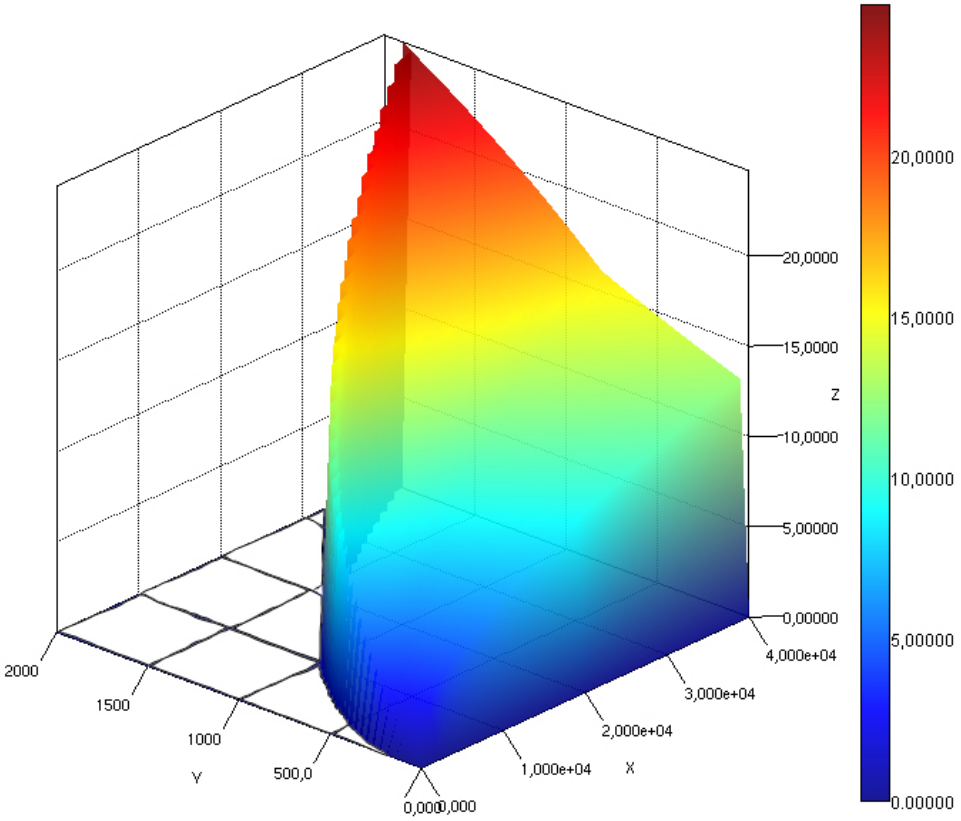


Рис. 4. Зависимость $d = f(P, L)$

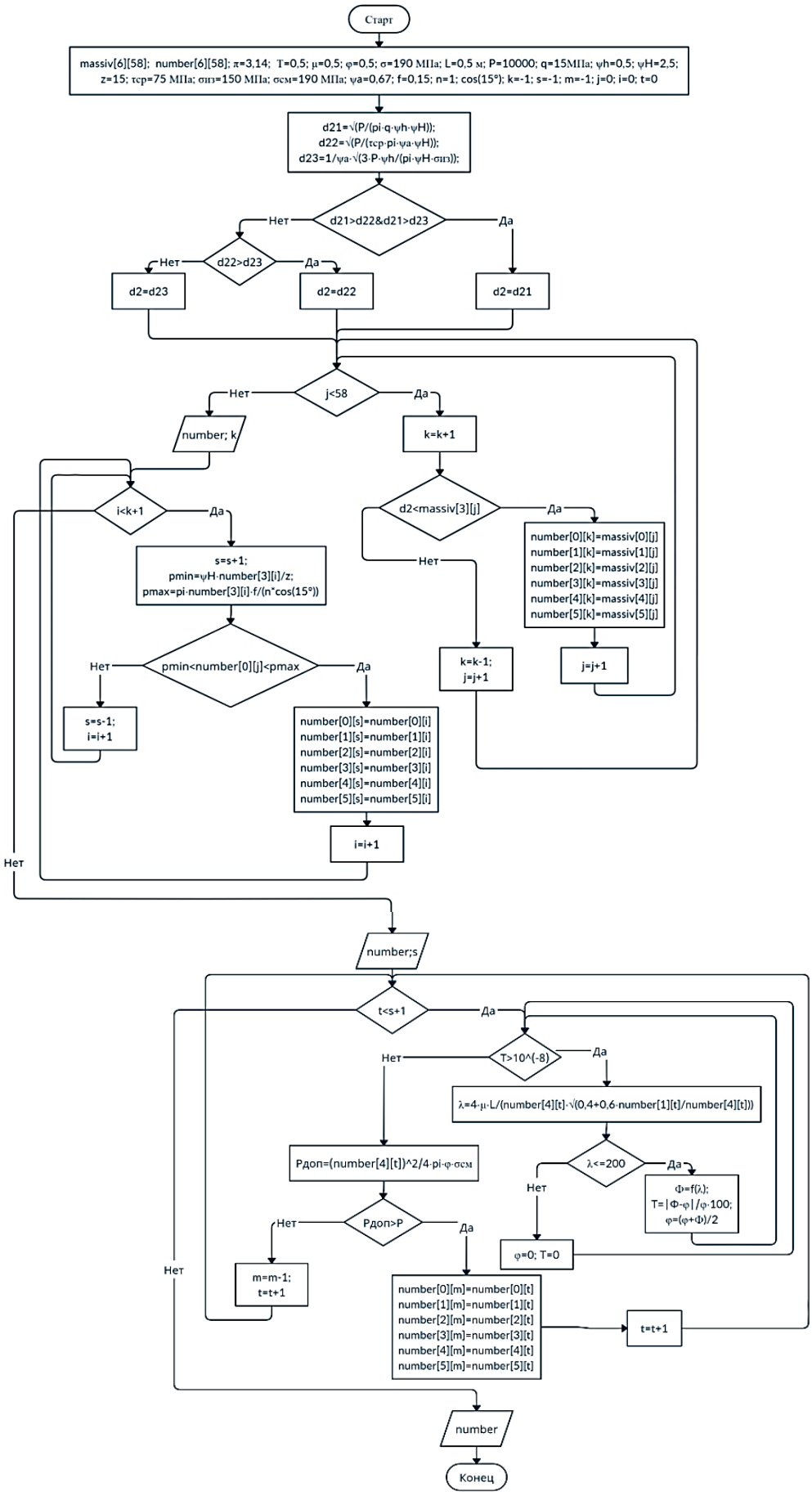
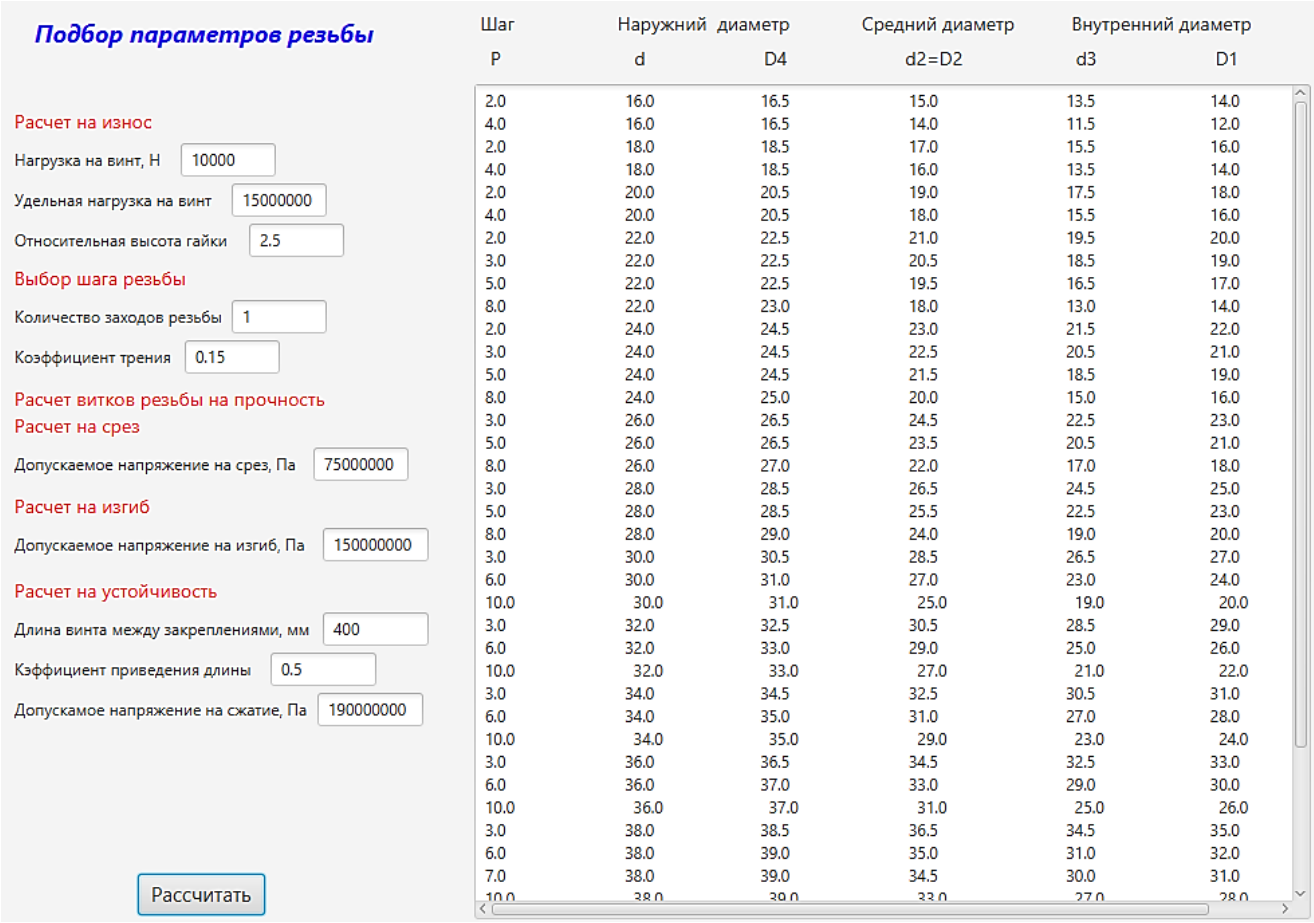


Рис. 5. Алгоритм работы программы

Разработанный алгоритм реализован в программе на языке программирования Java. Файл вывода результатов расчёта представлен на рис. 6.



Шаг	Наружний диаметр		Средний диаметр	Внутренний диаметр	
P	d	D4	d2=D2	d3	D1
2.0	16.0	16.5	15.0	13.5	14.0
4.0	16.0	16.5	14.0	11.5	12.0
2.0	18.0	18.5	17.0	15.5	16.0
4.0	18.0	18.5	16.0	13.5	14.0
2.0	20.0	20.5	19.0	17.5	18.0
4.0	20.0	20.5	18.0	15.5	16.0
2.0	22.0	22.5	21.0	19.5	20.0
3.0	22.0	22.5	20.5	18.5	19.0
5.0	22.0	22.5	19.5	16.5	17.0
8.0	22.0	23.0	18.0	13.0	14.0
2.0	24.0	24.5	23.0	21.5	22.0
3.0	24.0	24.5	22.5	20.5	21.0
5.0	24.0	24.5	21.5	18.5	19.0
8.0	24.0	25.0	20.0	15.0	16.0
3.0	26.0	26.5	24.5	22.5	23.0
5.0	26.0	26.5	23.5	20.5	21.0
8.0	26.0	27.0	22.0	17.0	18.0
3.0	28.0	28.5	26.5	24.5	25.0
5.0	28.0	28.5	25.5	22.5	23.0
8.0	28.0	29.0	24.0	19.0	20.0
3.0	30.0	30.5	28.5	26.5	27.0
6.0	30.0	31.0	27.0	23.0	24.0
10.0	30.0	31.0	25.0	19.0	20.0
3.0	32.0	32.5	30.5	28.5	29.0
6.0	32.0	33.0	29.0	25.0	26.0
10.0	32.0	33.0	27.0	21.0	22.0
3.0	34.0	34.5	32.5	30.5	31.0
6.0	34.0	35.0	31.0	27.0	28.0
10.0	34.0	35.0	29.0	23.0	24.0
3.0	36.0	36.5	34.5	32.5	33.0
6.0	36.0	37.0	33.0	29.0	30.0
10.0	36.0	37.0	31.0	25.0	26.0
3.0	38.0	38.5	36.5	34.5	35.0
6.0	38.0	39.0	35.0	31.0	32.0
7.0	38.0	39.0	34.5	30.0	31.0
10.0	38.0	39.0	33.0	27.0	28.0

Рис. 6. Результаты расчёта

Заключение. В результате работы разработан алгоритм и реализована программа определения характеристик сопряжения исполнительного элемента электропривода. Полученные результаты могут быть использованы в системах автоматизированного проектирования и анализа электротехнических комплексов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Определение потерь в передаточных механизмах специальных электромеханических приводов / С. Н. Иванов, М. Б. Колесник, В. А. Макаренко, Т. К. Фискова // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № V-1 (45). – С. 107-114.
2. Ivanov, S. Synthesis of the Control Device of the Electromechanical Drive of the Main Valve / S. N. Ivanov, K. K. Kim, A. V. Gorbunov // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 18-22 May. 2020, DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.911 2086.
3. Автоматизированный электромеханический привод вагонных дверей / К. К. Ким [и др.] // Электротехника. – 2019. – № 10. – С. 11-16.
4. Колесник, М. Б. Анализ совместимости в задаче управления безредукторным приводом стрелочного перевода / М. Б. Колесник, Ю. Б. Колошенко, А. А. Просолович // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № VII-1 (47). – С. 14-19.
5. Биргер, И. А. Расчёт на прочность деталей машин: справочник / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Г. Б. Иосилевич. – М.: Машиностроение, 1979. – 702 с.
6. Технический каталог электродвигателей [Электронный ресурс] / ООО ЭДС, 2012-2020. – Режим доступа: https://www.eds-msk.ru/index.php?site_page=motors (дата обращения: 21.12.2020).