

УДК 62-503.55

# ЁНИЛҒИ НАСОСИ ЭЛЕКТР ТИЗИМИНИНГ ИШЛАШ ЖАРАЁНИНИ МАТЕМАТИК МОДЕЛЛАШТИРИШ ВА ОПТИМАЛЬ БОШҚАРИШ

**Бабашев Қ.А.**

доцент Ташкентского государственного технического университета

**Азимов М.Б.**

бакалавр Ташкентского государственного технического университета

Мақолада электрли ёнилғи насосини математик моделлаштириш ва бошқариш усуллари қўллаш орқали ёнилғи насосининг электр тизими параметрларни оптималлаштириш масаласи кўрилган. Марказдан қочма электрли ёнилғи насослари ишлаш жараёнининг иккинчи тур Лагранж тенгламалари асосида математик модели ва Понтрягиннинг максимум принципи асосида оптимал бошқарув алгоритми ишлаб чиқилган. Электрли ёнилғи насосининг ишлаш жараёнини тадқиқ қилиш учун Рунге-Кутта сонли усули қўллаш асосида ҳисоблаш эксперименти ўтказилган ва ёнилғи насосига бериладиган электр токи кўзғалиши орқали бошқариладиган насос босими параметрлари аниқланган.

**Калит сўзлар:** ёнилғи насоси, электр тизими, математик модель, алгоритм, оптимал бошқариш.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ТОПЛИВНОГО НАСОСА

Бабашев К.А., Азимов М.Б.

Рассматривается оптимизация параметров электрической системы топливного насоса с применением методов математического моделирования и управления. Разработаны математические модели на основе уравнений Лагранжа второго рода и алгоритм оптимального управления процессами функционирования электрического центробежного топливного насоса с применением принципа максимума Понтрягина. Для исследования процесса функционирования электрического топливного насоса применяется численный метод Рунге-Кутта, проводится вычислительный эксперимент и определяются параметры давления насоса в зависимости от возмущения электрического тока, управлявшего процессом.

**Ключевые слова:** топливный насос, электрическая система, математическая модель, алгоритм, оптимальное управление.

## MODELING AND OPTIMAL CONTROL OF THE PROCESSES OF FUNCTIONING OF THE ELECTRIC SYSTEM FUEL PUMP

Babashev K.A., Azimov M.B.

The paper proposes a parameter optimization system electric fuel pump with application of methods of mathematical modeling and control. Developed mathematical models based on the Lagrange equations of the second kind and the algorithm for optimal control of the operation of electric centrifugal fuel pump with application of the Pontryagin maximum principle. To study the process of functioning of the electric fuel pump was used the numerical method of Runge-Kutta methods, a computational experiment was conducted and the parameters of the pump pressure depending on perturbations of the electric current driving process.

**Keywords:** fuel pump, electrical system, mathematical model, algorithm, optimal control.

### 1. Кириш

Ҳозирги кунда техникавий ривожланган мамалакатлар саноатида ёнилғи насослари йилига миллион доналаб ишлаб чиқилмоқда. Ишлатилаётган ёнилғи насосларининг асосини электроюриткичли насослар ташкил қилмоқда [1-10]. Кўп сонли илмий манбаалардан маълумки, автомобилларда ишончлилиги кам бўлган тизим бу таъминлаш тизими ҳисобланади. Ёнилғи тизими автомобиль

двигателини таъминлаш ҳамда уни сақлаш ва тозалаш учун мўлжалланган. Двигателнинг умумий ишламай қолишлар сонининг 15-40 % ни ёнилғи узатиш тизимининг ишламай қолиши ташкил қилади [1,9,10]. Шунинг учун электрли ёнилғи насосларининг ишлаш жараёнларини такомиллаштириш ва фойдали иш коэффициентини оширишга йўналтирилган назарий ва экспериментал тадқиқотлар муҳим аҳамиятга эга [9].

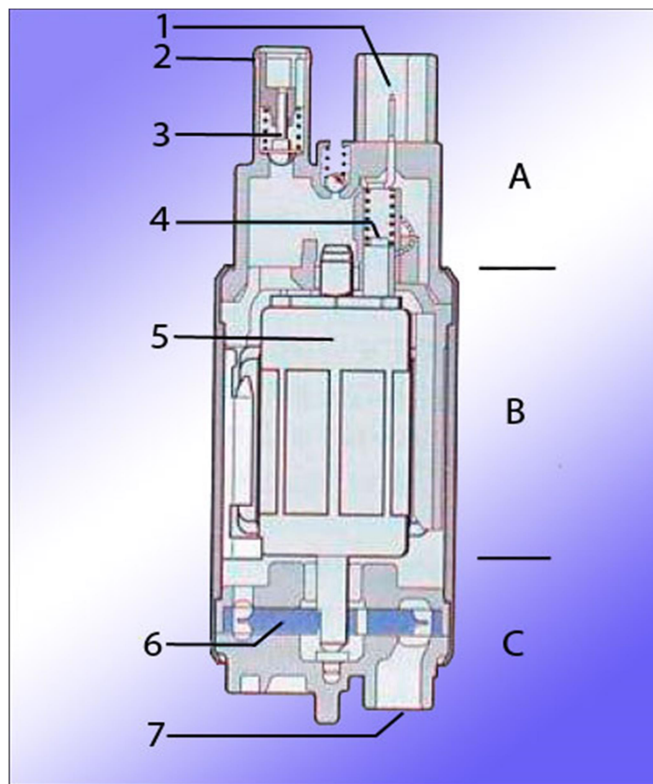
Электрли ёнилғи насоси двигательнинг барча режимларда ишлаши учун берилган босимда керакли ёнилғи билан таъминлаб бериши керак.

Электрли ёнилғи насоси куйидагилардан тузилган [10]:

А. Корпусдан, унда радиоҳалақитлардан химоя қилувчи элементлар ўрнатилиши мумкин;

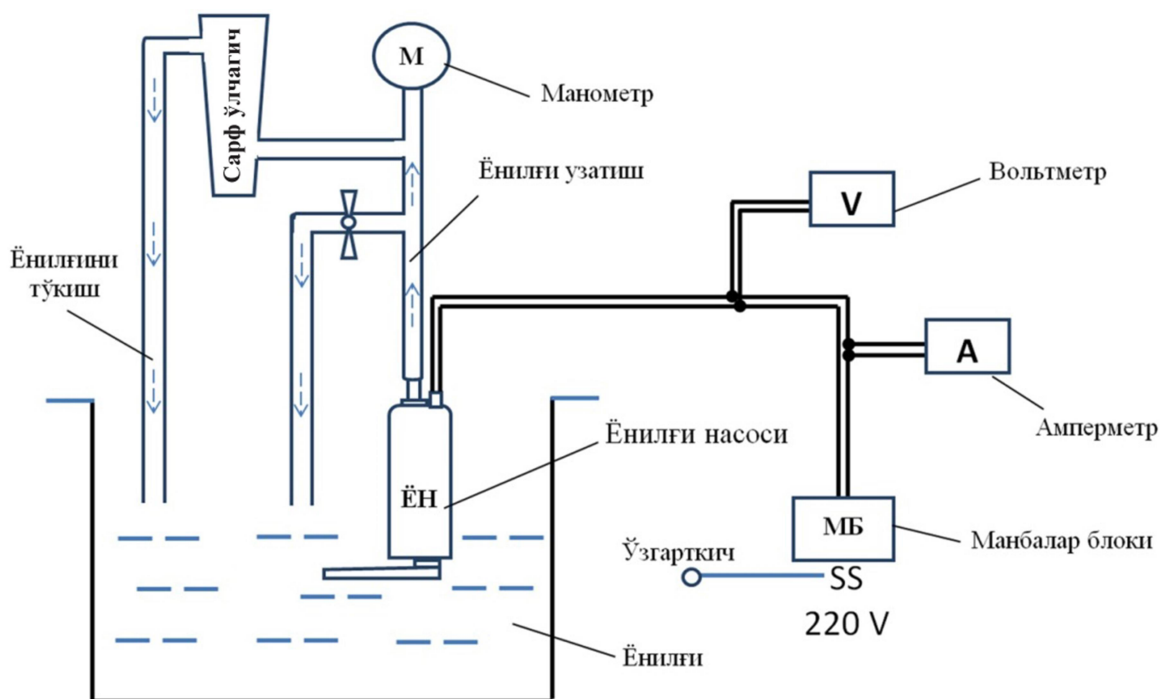
В. Электр двигателидан;

С. Бевосита насоснинг ўзидан иборат. У турига қараб поршенли ёки марказдан қочма бўлиши мумкин.



1-расм. Марказдан қочма ёнилғи насосининг конструкцияси:

1 – электр ажраткич; 2 – гидравлик ажраткич (ёнилғининг чиқиши); 3 – қайтиши клапани; 4 – графитли чўтка; 5 – доимий магнитли двигатель якори; 6 – парракли насос ишчи гилдираги; 7 – ёнилғи кириши



2-расм. Электрли насоснинг принципал схемаси

Ускунанинг ишлаши ва лаборатория жиҳозлари учун қуйидаги техник талаблар қўйилади:

1. Ёнилғи насосига бериладиган электр кучланиши 8-13,2 В.
2. Токни назорат қилиш 0 - 7 А.
3. Ёнилғи сарфини назорат қилиш 5-180 л/с.
4. Босимни назорат қилиш 0-650 кПа.

## 2. Масаланинг қўйилиши

2-расмда кўрсатилган стенднинг принципиал схемаси асосида ёнилғи насоси ишлаш жараёнининг математик моделини иккинчи тур Лагранж тенгламасидан фойдаланиб тузамиз [5,7].

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_i} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_i} = Q_i, \quad (1)$$

Бу ерда  $T$ ,  $\Pi$  – тизимнинг кинетик ва потенциал энергияси;  $\Phi$  – Рэлейнинг диссипатив функцияси;  $q_i, \dot{q}_i$  – тизимнинг умумлашган координата ва тезлиги;  $Q_i$  – умумлашган куч.

Қуйидаги белгилашларни киритамиз:  $q_i$  – электр заряди;  $\dot{q}_i = i_i$  – электр токи.

Қаралаётган электрли ёнилғи насоси учун кинетик ва потенциал энергия ҳамда Рэлейнинг диссипатив функциясини аниқлаймиз [7]:

$$T = \frac{1}{2} L_i i_i^2, \quad \Pi = \frac{1}{2} c (q_1 - q_2)^2, \quad \Phi = \frac{1}{2} R (i_1 - i_2)^2.$$

Лагранж ҳадларини координата, тезлик, вақт ва умумлашган куч бўйича хусусий ҳосилаларини оламиз:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Pi}{\partial q} &= c(q_1 - q_2), & \frac{\partial T}{\partial i_i} &= L_i i_i, \\ \frac{\partial \Phi}{\partial i} &= R(i_1 - i_2), & \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial i_i} \right) &= L_i \frac{di_i}{dt}, \\ Q_1 &= E_{\text{эюк}}, & Q_2 &= R_k i_2. \end{aligned}$$

Бу ерда  $L_i$  – индукция,  $L = \frac{D^2 + n^2}{45 \cdot D + 100 \cdot l}$ , Гн;  $D$  –

ғалтак диаметри, см;  $n$  – ўрамлар сони;  $l$  – ғалтакка ўралган сим узунлиги, см;  $c$  – конденсатор сиғими,

$\Phi$ ;  $R$  – актив қаршилик, Ом;  $R_k = \frac{M_k}{i_2}$  – конструктив

ўзгармас;  $E_{\text{эюк}}$  – электр юритувчи куч, В.

Аниқланган Лагранж ҳадларини (1) тенгламага қўйиб, қуйидаги электрли ёнилғи насоси ишлаш жараёнининг математик моделини оламиз:

$$\left. \begin{aligned} L_1 \frac{di_1}{dt} &= E_{\text{эюк}} - R(i_1 - i_2) - c(q_1 - q_2), \\ L_2 \frac{di_2}{dt} &= R(i_1 - i_2) + c(q_1 - q_2) - R_k i_2. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

## 3. Оптималь бошқариш масаласи

Юқорида келтирилганлардан келиб чиққан ҳолда оптималь бошқариш масаласини шакллантирамиз [2,3,5].

Электрли ёнилғи насосининг бошланғич вақтдаги ҳолати

$$q_i(0) = q_{i0}(0), \quad i_i(0) = i_{i0}(0). \quad (3)$$

Шундай бошқаришни  $u(t)$  топиш керакки, электрли ёнилғи насоси ҳаракатини аввалдан белгиланган ҳолатга ўтказсин

$$\begin{aligned} q_i(t) &= q_{i0}(t), & q_i(t) &= q_{i0}(t), \\ 0 \leq t \leq T & & (i = \overline{1, n}). \end{aligned} \quad (4)$$

Бунда бошланғич ҳолатдан белгиланган ҳолатга ўтиш жараёнига сарфланадиган вақт қисқа бўлсин. У ҳолда бошқаришдан мақсад

$$J(\phi_0, u(t), \phi(t)) = \int_{t_0}^T f^0(\phi(t), u(t), t) dt \quad (5)$$

функционални берилган (3)-(7) шартлар бўйича минималлаштиришдан иборат бўлади:

$$\dot{\phi}(t) = f(\phi(t), u(t), t), \quad (6)$$

$$u \in U, \quad t_0 \leq t \leq T, \quad (7)$$

бу ерда  $f(\dots)$  – узлуксиз-дифференциалланувчи функция;  $u(t) - [t_0, T]$  ораликдаги бўлакли-узлуксиз функция.

Қаралаётган электрли ёнилғи насосини оптималь бошқаришнинг зарурий шартини тадқиқ қилиш учун Понтрягиннинг максимум принциpidан фойдаланамиз [2,3].

Максимум принципини шакллантириш учун Гамильтон-Понтрягин функциясини

$$H = (q, u, t, \psi_i, \psi_0) = -f^0(q, u, t) + \langle \psi, u \rangle \quad (8)$$

ва қўшма тизимни

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\psi_1}{dt} &= -\frac{\partial H_1}{\partial y_1} = -L_1^{-1} c \psi_2, \\ \frac{d\psi_2}{dt} &= -\frac{\partial H_1}{\partial y_2} = -\psi_1 + L_1^{-1} R \psi_2 \\ \frac{d\psi_3}{dt} &= -\frac{\partial H_2}{\partial y_3} = -L_2^{-1} c \psi_2, \\ \frac{d\psi_4}{dt} &= -\frac{\partial H_2}{\partial y_4} = -\psi_1 + L_2^{-1} R \psi_2 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

бошқаришга қўйилган  $|u| \leq 1$  чегара билан киритамиз.

Қаралаётган тизимни ечиш учун қуйидаги зарурий шарт бажарилиши керак

$$\begin{aligned} H(\phi_i(t), u(t), t, \psi_i, \psi_0) &= \\ &= \max_{u \in U} H(\phi_i(t), u, t, \psi_i(t), \psi_0). \end{aligned} \quad (10)$$

Оптималь бошқаришни аниқлашга ўтишда (8) асосида функцияни шакллантириб:

$$\left. \begin{aligned} q_1 &= y_1, & \dot{q}_1 &= y_2, & q_2 &= y_3, & \dot{q}_2 &= y_4, \\ \dot{y}_2 &= u_1 - \frac{1}{L_1} [R(y_2 - y_4) + c(y_1 - y_3)], \\ y_4 &= \frac{1}{L_2} [R(y_2 - y_4) + c(y_1 - y_3)] - u_2, \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

насос ҳаракатини бошқаришнинг  $u_1 = L_1^{-1}E$ ,  
 $u_2 = L_2^{-1}R_k i_2 \sin \omega t$  характерловчи математик  
 моделини оламиз.

Худди шундай, агар  $f^0 \equiv 1$  бўлса,  
 $J(\phi_0, u(t), \phi(t)) = T - t_0$  ўринли бўлади ва у ҳолда (2)-  
 (6) тез ҳаракат масаласи бўлади.

Қаралаётган объект стационар тизим ҳисобланади  
 ва (5) масала шуни кўрсатадики,  $f$  ва  $U$  вақтга  
 боғлиқ эмас, яъни

$$f(t, y, u) = f(y, u), \quad U(t) = U. \quad (12)$$

Агар стационар масала (5), (11) оптимал  
 бошқариш  $u(t)$  ва оптимал траектория  $\phi_0(t)$  га эга  
 бўлса, у ҳолда (10) шартни қониктирувчи, тривиал  
 бўлмаган кўшма ўзгарувчилар  $(\psi_1(t), \psi_2(t))$ ,  
 $\psi(t) \in R^n$  вектори мавжудки, (8) максимум шarti  
 бажарилади:

$$\psi_0(t) = const \leq 0. \quad (13)$$

Худди шундай (9) кўшма тизим  $\psi_i$  га нисбатан  
 бир жинсли ҳисобланади, (13) тенгламадаги  
 ўзгармасни ихтиёрий танлаш мумкин, шундай қилиб

$$\psi_0(t) = -1 \quad 0 \leq t \leq T. \quad (14)$$

$\psi_2 \neq 0$  да  $\max_{|u| \leq 1} H$  шартидан  $u = sign \psi_2$  келиб  
 чиқади, агар  $\psi_2 \neq 0$  бўлса, унда максимум

принципининг чегаравий масаласи куйидаги  
 кўринишда ёзилади:

$$\left. \begin{aligned} q_1 = y_1, \quad \dot{q}_1 = y_2, \quad q_2 = y_3, \quad \dot{q}_2 = y_4, \\ \dot{y}_2 = sign \psi_2 - L_1^{-1} [b_v(y_2 - y_4) + c_v(y_1 - y_3)], \\ \dot{y}_4 = L_2^{-1} [b_v(y_2 - y_4) + c_v(y_1 - y_3)] - sign \psi_2. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Бундан келиб чиқадики, (10) шарт  
 $u = sign \psi_2$ ,  $\psi_2 \neq 0$  функцияни ажратади, яъни

$$H_i = -f^0 u + \psi_2(t) u. \quad (16)$$

Унда

$$u_k = sign \psi_2(t) = \begin{cases} 1, & \psi_2(t) > 1 \\ -1, & \psi_2(t) < -1 \end{cases} \quad (17)$$

$$k = 2, 4, \dots, 2n,$$

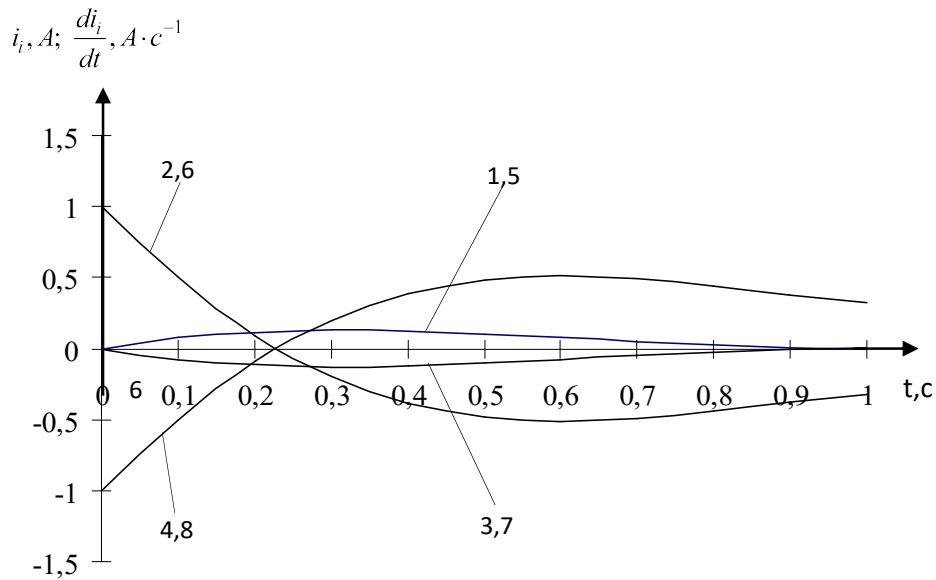
ўринли, яъни бошқариш  $u_k(t)$  битта нуқтада  
 алмашлаб улаш имкониятига эга.

Электрли ёнилги насоснинг ишлаш жараёнини  
 тадқиқ қилиш учун Рунге-Кутта сонли усулини  
 қўллаб бошланғич  $t = 0$  шарт асосида ҳисоблаш  
 эксперименти ўтказилди ва натижалар жадваллар ва  
 графиклар кўринишида олинди. 1-жадвалда  
 максимум принципи чегаравий масаласи (15) нинг  
 ечими кўринишида олинган, 2-жадвалда математик  
 модель (2) ни ечишдан олинган натижалар  
 келтирилган. Уларнинг чизмалари 3,4-расмлар  
 кўринишида келтирилган.

1-жадвал

Электрли ёнилги насосини ишга тушириш вақтидаги ўтиши жараёнида  
 манбадаги ва насосдаги токнинг ўзгариши  $i_i$  ва унинг ўзгариши тезлиги  $\frac{di_i}{dt}$

| T, c | $i_1, A$ | $\frac{di_1}{dt}, Ac^{-1}$ | $i_2, A$ | $\frac{di_2}{dt}, Ac^{-1}$ | $i_1, A$ | $\frac{di_1}{dt}, Ac^{-1}$ | $i_2, A$ | $\frac{di_2}{dt}, Ac^{-1}$ |
|------|----------|----------------------------|----------|----------------------------|----------|----------------------------|----------|----------------------------|
|      | u=+1     |                            |          |                            | u=-1     |                            |          |                            |
| 0    | 0        | 1                          | 0        | -1                         | 0        | -1                         | 0        | 1                          |
| 0.1  | 0.078    | 0.5                        | -0.078   | -0.5                       | -0.078   | -0.5                       | 0.078    | 0.5                        |
| 0.2  | 0.11     | 0.09                       | -0.11    | -0.09                      | -0.11    | -0.09                      | 0.11     | 0.09                       |
| 0.3  | 0.13     | -0.2                       | -0.13    | 0.2                        | -0.13    | 0.2                        | 0.13     | -0.2                       |
| 0.4  | 0.12     | -0.39                      | -0.12    | 0.39                       | -0.12    | 0.39                       | 0.12     | -0.39                      |
| 0.5  | 0.1      | -0.48                      | -0.1     | 0.48                       | -0.1     | 0.48                       | 0.1      | -0.48                      |
| 0.6  | 0.076    | -0.51                      | -0.076   | 0.51                       | -0.076   | 0.51                       | 0.076    | -0.51                      |
| 0.7  | 0.05     | -0.49                      | -0.05    | 0.49                       | -0.05    | 0.49                       | 0.05     | -0.49                      |
| 0.8  | 0.027    | -0.44                      | -0.027   | 0.44                       | -0.027   | 0.44                       | 0.027    | -0.44                      |
| 0.9  | 0.0099   | -0.38                      | -0.0099  | 0.38                       | -0.0099  | 0.38                       | 0.0099   | -0.38                      |
| 1    | -0.0028  | -0.322                     | 0.0028   | 0.322                      | 0.0028   | 0.322                      | -0.0028  | -0.322                     |

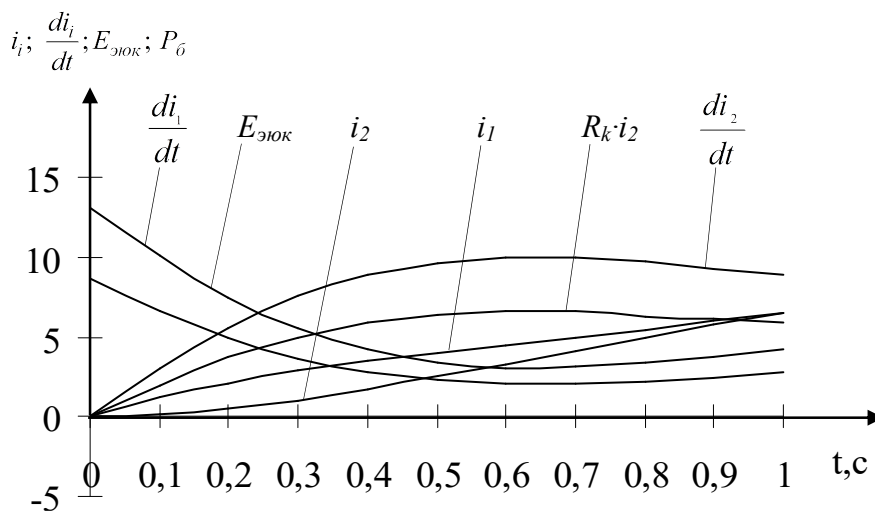


3-расм. Электрли ёнилги насосини ишга тушириш жараёнининг ўтиш вақтида манбаадаги ва насосдаги токнинг ўзгариши  $i_1$  ва ўзгариш тезлиги  $\frac{di_1}{dt}$ : 1,3 ва 2,4 -  $u(t)=+1$ да; 5,7 ва 6,8 -  $u(t)=-1$  даги чизмалари

2-жадвал

Электрли ёнилги насоснинг ишлаш жараёнини математик моделини ечишдан олинган натижалар

| T, с | $i_1$ , А | $\frac{di_1}{dt}$ , А·с <sup>-1</sup> | $E_{эюк}$ , В | $i_2$ , А | $\frac{di_2}{dt}$ , А·с <sup>-1</sup> | $E_{эюк}=R_k \cdot i_2$ , В |
|------|-----------|---------------------------------------|---------------|-----------|---------------------------------------|-----------------------------|
| 0    | 0         | 13.06                                 | 8.66          | 0         | -0.000027                             | -0.000018                   |
| 0.1  | 1.178     | 10.05                                 | 6.66          | 0.127     | 3.01                                  | 1.99                        |
| 0.2  | 2.12      | 7.5                                   | 4.97          | 0.489     | 5.57                                  | 3.7                         |
| 0.3  | 2.88      | 5.53                                  | 3.66          | 1.04      | 7.53                                  | 4.99                        |
| 0.4  | 3.5       | 4.178                                 | 2.77          | 1.7       | 8.88                                  | 5.89                        |
| 0.5  | 4.028     | 3.4                                   | 2.25          | 2.5       | 9.67                                  | 6.41                        |
| 0.6  | 4.51      | 3.07                                  | 2.04          | 3.3       | 9.99                                  | 6.62                        |
| 0.7  | 4.98      | 3.1                                   | 2.06          | 4.16      | 9.95                                  | 6.6                         |
| 0.8  | 5.47      | 3.368                                 | 2.23          | 4.98      | 9.7                                   | 6.27                        |
| 0.9  | 5.98      | 3.75                                  | 2.48          | 5.77      | 9.31                                  | 6.17                        |
| 1    | 6.53      | 4.17                                  | 2.767         | 6.53      | 8.9                                   | 5.9                         |



4-расм. Электрли ёнилги насоси ишлаш жараёнининг характеристикаси

#### 4. Хулоса

Электр тизимининг принципиал схемаси асосида ёнилғи насосини тадқиқ қилиш жараёнини математик моделлаштириш ва оптимал бошқаришдан олинган натижалар насос босими  $P_0=650 \text{ кПа}=6.628 \text{ кгк/см}^2$  тенг бўлганда қуйидаги параметрларни оптималлаштириш имконини берди:

- электр юритувчи куч -  $E_{\text{эюк}}=8.66 \text{ В}=\kappa\sigma\cdot M^2/(c^3\cdot A)$ ;  
 - конденсатор сизими -  $c=6.628 \text{ Ф}=\kappa\sigma^4\cdot A^2/(\kappa\sigma\cdot M^2)$ ;  
 - электр қаршилиги -  $R=1.6 \text{ Ом}=\kappa\sigma\cdot M^2/(c^3\cdot A^2)$ ;  
 - манбадаги  $L_1$  насосга келтирилган  $L_2$  индукция -  $L_1=L_2=0.6 \text{ Ген}=\kappa\sigma\cdot M^2/(c^2\cdot A^2)$ .

Шуни таъкидлаб ўтиш жоизки, ушбу математик модель илк маротаба ишлаб чиқилган ва камчиликлардан ҳоли эмас.

#### Адабиётлар

- [1] *Азимов Б.М., Бабашев Қ.А., Жўраев Б.Б., Азимов М.Б.* Ёнилғи насоси электр тизимининг ишлаш жараёнини математик моделлаштириш ва бошқариш // Бошқарувда ахборот технологияларини қўллашнинг ҳозирги ҳолати ва истиқболи: Республика илмий-техника анжумани маърузалари тўплами. 5-6 сентябрь 2016. - Дижизак, 2016. - 23-29 б.
- [2] *Афанасьев В.Н., Колмановский В.Б., Носов В.Р.* Математическая теория конструирования систем управления. - М.: Высшая школа, 1989. - С.162-163.
- [3] *Васильев Ф.П.* Численные методы решения экстремальных задач. - М.: Наука, 1988. - С. 421-485.
- [4] Конденсаторы, их назначение и устройство // <http://electrono.ru/peremennyj-tok/52-kondensatory-ix-naznachenie-i-ustrojstvo>.
- [5] Кочубиевский И.Д. Системы нагружения для исследования и испытаний машин и механизмов. - М.: Машиностроение, 1985. - С. 64-75.
- [6] Кухлинг Х. Справочник по физике / Пер. с нем. - М.: Мир. 1982. - 222 с.
- [7] Маркеев А.П. Теоретическая механика. - М: Наука, 1990. - 416 с.
- [8] Расчет катушек индуктивности // <http://admhome.narod.ru/tech/induktivnost/>.
- [9] <https://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=35665>
- [10] Электрический топливный насос. [http://systemsauto.ru/fuel/fuel\\_pump.html](http://systemsauto.ru/fuel/fuel_pump.html)