

## ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ИНДУКЦИОННОГО ТИПА

Болух В.Ф., к.т.н., доц., Марков А.М., Лучук В.Ф., к.т.н., Щукин И.С., к.т.н.

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ «ХПИ», кафедры «Общая электротехника» и «Электрические машины», тел. (0572) 40-04-27, 40-02-40, E-mail: bolukh@kpi.kharkov.ua, tech@tetra.kharkiv.com.

*Запропонована інженерна чисельно-аналітична методика розрахунку робочих характеристик і параметрів електромеханічних імпульсних перетворювачів індукційного типу з охолодженням обмоток рідким азотом. Подана структурна схема розрахункового алгоритму, що враховує сильну зміну і взаємозв'язок електричних, магнітних, теплових та механічних параметрів під час короткочасного робочого циклу. Подані всі основні розрахункові параметри з зазначенням допоміжних параметрів, що впливають на похибки розрахунку.*

*Предложена инженерная численно-аналитическая методика расчета рабочих характеристик и параметров электромеханических импульсных преобразователей индукционного типа с охлаждением обмоток жидким азотом. Представлена структурная схема расчетного алгоритма, учитывающего сильное изменение и взаимосвязь электрических, магнитных, тепловых и механических параметров в течение кратковременного рабочего цикла. Представлены все основные расчетные параметры с указанием вспомогательных параметров, влияющих на погрешности расчета.*

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время известен ряд методов по расчету рабочих параметров и характеристик электромеханических импульсных преобразователей индукционного типа (ЭИПИТ) [1-3]. Инженерные методики, предназначенные для широкого пользования, позволяют выполнить оценочные расчеты основных параметров оперативно и с относительно невысоким уровнем точности, как правило, с помощью инженерных калькуляторов [4, 5]. Основной недостаток известных методик состоит в том, что они не учитывают существенного изменения ряда электромагнитных, тепловых и механических параметров в кратковременном рабочем цикле, что характерно для высокоэффективных преобразователей, охлаждаемых, например, жидким азотом. Поскольку за последнее десятилетие произошел определенный скачок в уровне подготовки инженерно-технических специалистов и вычислительной технике, то современная инженерная методика должна быть ориентирована на компьютерные расчеты ЭИПИТ [6]. В настоящее время существует целый комплекс алгоритмических языков и универсальных компьютерных программ для расчетов электромеханических преобразователей (*MathCAD*, *MatLab*, *Maple*, *Mathematica* и др.), в которых довольно легко запрограммировать необходимые выражения и получить результаты в наглядном виде.

Современная инженерная методика, обладая рядом допущений, должна в общем виде устанавливать взаимосвязи между расчетными параметрами, включать упрощенные или аппроксимированные зависимости основных нелинейных величин и представлять результаты расчета с оценкой точности. Такие инженерные методики должны характеризоваться высокой оперативностью: обладать быстродействием и на-

глядностью, показывать изменение расчетных параметров во времени и не быть излишне сложными [7].

В общем случае задача создания функционального электромеханического преобразователя во многом зависит от его назначения и условий функционирования. В качестве примера рассмотрим следующую задачу. Для заданных габаритных размеров преобразователя дисковой конфигурации (наружный диаметр  $D_{ex}$ ), обмотка возбуждения и якорь которого намотаны проводом диаметром  $d_0$ , определить основные параметры и рассчитать рабочие характеристики при воздействии исполнительным элементом массой  $P$  на пружину с коэффициентом упругости  $K_p$ . При возбуждении от емкостного накопителя  $C$  определить его напряжение  $U_0$ , обеспечивающего заданную величину максимального перемещения исполнительного элемента  $\Delta Z_m$ .

### МЕТОДИКА ВЫБОРА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ

1. Полагаем, что наружные диаметры обмоток возбуждения ( $n=1$ ) и якоря ( $n=2$ ) равны

$$D_{exn} = D_{ex}.$$

2. Для выбора внутреннего диаметра  $D_{in}$  обмоток принимаем значение относительной ширины

$$d^* = (D_{ex} - D_{in}) / (D_{ex} + D_{in}),$$

равное 0,7, при котором обеспечивается наибольшая эффективность дискового преобразователя [4]. При этом

$$D_{inn} = D_{in} = 0,18D_{ex}.$$

3. Принимаем значения относительной высоты

$$\varepsilon_{Hn} = H_n / (D_{ex} - D_{in})$$

обмотки возбуждения  $\varepsilon_{H1}=0,20$  и обмотки якоря  $\varepsilon_{H2}=0,05$ .

4. Определяем число витков  $n$ -ой обмотки по формуле

$$w_n = Ent \left( 0,5 \frac{D_{ex} - D_{in}}{d_0 + 2h_s + ph_p} \right) \cdot Ent \left( \frac{H_n}{d_0 + 2h_s} \right),$$

где  $Ent(f)$  – максимальное целое число из  $f$ ;  $h_s$  – толщина витковой изоляции;  $p$  – число слоев межслойной изоляции толщиной  $h_p$ .

5. Для плоской дисковой обмотки, если значение относительной ширины находится в диапазоне  $d^*=0,2 \dots 0,8$ , с достаточной точностью для инженерных расчетов ( $\delta=2 \dots 6$  %) индуктивность  $n$ -ой обмотки можно рассчитать следующим образом [4]

$$L_n = 3,75 \cdot 10^{-7} w_n^2 (D_{ex} + D_{in})^{1,4} (D_{ex} - D_{in})^{-0,4}.$$

6. Взаимоиндуктивность между обмотками оценим по формуле

$$M_{12}(t) = L_n w_m w_n^{-1} \Theta,$$

$$\text{где } \Theta = \exp \left( -\Xi \frac{\Delta + 0,5(H_1 + H_2) + \Delta Z(t)}{D_{ex} + D_{in}} \right);$$

$\Delta$  – начальный зазор между обмотками, величина которого выбирается в зависимости от напряжения источника  $U_0$  (табл.1);  $\Delta Z(t)$  – величина перемещения якоря;  $\Xi$  – значение параметра, выбираемого в зависимости от относительной ширины обмотки (табл.2) [8]

Таблица 1

Величина начального зазора между обмотками

$U_0$ , кВ	5,0	10,0	15,0	20,0
$\Delta$ , мм	0,5...1,0	1,0...1,5	1,5...2,0	2,0...2,5

Таблица 2

Величина параметра  $\Xi$

$d^*$ , о.е	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$\Xi$ , о.е.	3,65	3,33	3,14	2,92	2,70	2,50	2,43	2,36

7. Ориентировочная глубина скин-слоя для обмотки

$$\delta_n = \sqrt{2\rho(T, B) \mu_0^{-1} \sqrt{(L_n - M_{12}^2 L_m^{-1})}},$$

где  $m=3-n$ .

Для медной обмотки удельное сопротивление при азотной температуре можно описать зависимостью [8]

$$\rho(T, B) = 7 \cdot 10^{-11} (T - 46K) (1 + 10^\xi),$$

где  $\xi = -6,821 + 2,537 \lg v - 0,1853 \lg^2 v$ ;

$$v = 23,8B / (T - 46K).$$

Величину индукции магнитного поля можно оценить следующим образом

$$B_n = B_{on}(t) + B_{om}(t) \Theta,$$

$$\text{где } B_{on}(t) = \frac{\mu_0 i(t) w_n}{(a-1) D_{ex}} \ln \left( \frac{a + \sqrt{a^2 + b_n^2}}{1 + \sqrt{1 + b_n^2}} \right);$$

$$a = D_{ex} / D_{in}, \quad b_n = H_n / D_{ex}.$$

8. Сопротивление обмотки выбирается с учетом глубины скин-слоя. Если  $\delta_n > 0,5d_0$ , то

$$R_n = 2\rho(T, B) w_n d_0^{-2} (D_{ex} + D_{in}).$$

Если  $\delta_n < 0,5d_0$ , то

$$R_n = 0,5\rho(T, B) w_n \delta_n^{-1} (d_0 - \delta)^{-1} (D_{ex} + D_{in}).$$

9. Максимальную величину тока возбуждения можно оценить, считая что якорь при этом переместился на расстояние  $\Delta Z$ , следующим образом

$$i_{lm} = \frac{2U_0 \sqrt{C}}{\sqrt{4(L_1 - M_{12}^2 (\Delta Z) L_2^{-1}) - CR_1^2}},$$

где  $U_0$  – зарядное напряжение емкостного накопителя с энергией  $W_0$

$$U_0 = \sqrt{2W_0 C^{-1}}.$$

При необходимости можно уменьшить амплитуду тока путем уменьшения числа витков  $w_l$  за счет увеличения диаметра провода  $d_0$ .

10. Масса  $n$ -ой обмотки

$$m_n = 0,25\pi k_p \gamma H_n (D_{ex}^2 - D_{in}^2),$$

где  $k_p=1,1 \dots 1,5$  – в зависимости от заполнения обмотки конструкционными материалами;  $\gamma$  – усредненная плотность материала обмотки.

10. Превышение температуры обмотки, определяемое на каждом расчетном шаге [9]

$$\theta_n(t_{k+1}) = \zeta + [\theta_n(t_k) - \zeta] \exp \left( -\frac{4F_{cn} \alpha_T(T) \Delta t}{\pi \gamma H_n c^*(T) (D_{ex}^2 - D_{in}^2)} \right),$$

где  $\zeta = R_n(T, B) i_n^2(t_k) F_{cn}^{-1} \alpha_T^{-1}(T)$ ;

$c^*(T) = 0,32 \cdot \sqrt[3]{T - T^*} v_n c(T_0) + v_u c_u(T) + (1 - v_n - v_u) \cdot c_k(T)$  – усредненная удельная теплоемкость охлаждаемой жидким азотом медной обмотки, включающей проводники, изоляцию и пропиточный компаунд;  $v_n, v_u$  – объемное содержание проводника и изоляции;  $c(T_0)$  – теплоемкость проводника при температуре жидкого азота;  $c_u(T), c_k(T)$  – коэффициенты теплоемкости изоляции и компаунда;

$F_{cn} = \pi [0,5(D_{ex}^2 - D_{in}^2) + H_n D_{ex}]$  – поверхность охлаждения обмотки.

В общем случае величина коэффициента теплоотдачи  $\alpha_T$  при кипении жидкого азота зависит от целого ряда факторов и условий. Для инженерных расчетов можно воспользоваться значениями, представленными в табл.3.

Таблица 3

Значения коэффициента теплоотдачи жидкого азота в зависимости от превышения температуры обмотки

$\theta$ , К	1...10	10...15	15...20	20...30	30...100
$\alpha_T$ , Вт/(м <sup>2</sup> К)	800- $\theta$	6800 + +1200- $\theta$	16400 - -520- $\theta$	14000 - -400- $\theta$	2514 - -17- $\theta$

11. Расход жидкого азота за  $q$  рабочих циклов преобразователя можно оценить по результатам расчета следующим образом

$$v_{N2}^* = r_{N2}^{-1} q \sum_{n=1}^2 \int_0^{t_p} i_n^2(t) R_n(T, B) dt,$$

$r_{N2}=159$  кДж/л – удельная теплота испарения жидкого азота.

12. Величины перемещения и скорости якоря с исполнительным элементом, учитывающих их массу и коэффициент упругости буферного элемента можно рас-

считать на каждом шаге по времени при помощи рекуррентных соотношений [10]

$$\Delta Z(t_{k+1}) = \Delta Z(t_k) + V(t_k)\Delta t + \iota \Delta t^2 (P + m_2)^{-1},$$

$$V(t_{k+1}) = V(t_k) + \iota \Delta t (P + m_2)^{-1},$$

где  $\iota = i_1(t_k)i_2(t_k)\Delta z_p^{-1} [M_{12}(\Delta Z + 0,5\Delta z_p) - M_{12}(\Delta Z - 0,5\Delta z_p)] - K_p \Delta Z(t_k)$ ;

$\Delta z_p$  – расчетная величина для градиента взаимной индуктивности.

На основании выбора основных параметров можно осуществить расчет рабочих характеристик ЭИПИТ традиционной формы при наличии и отсутствии охлаждения жидким азотом.

### СТРУКТУРНАЯ СХЕМА РАСЧЕТНОГО АЛГОРИТМА

Предлагается следующая структурная схема по расчету рабочих параметров и характеристик с указанием взаимосвязи между основными расчетными параметрами (рис.1).



Рис.1. Структурная схема для расчета рабочих параметров и характеристик криогенного ЭИПИТ

В данном расчетном алгоритме используются следующие начальные условия:  $T(0)=T_0$  – температура;  $i_n=0$  – ток;  $\Delta z=\Delta z_0$  – аксиальное смещение якорной относительно статорной обмотки;  $f_c(0)=f_0$  – сила сопротивления;  $U_c(0)=U_0$  – напряжение источника;  $V(0)=0$  – скорость якоря.

Представленные на рис.1 **расчетные параметры** подразделяются на **вспомогательные** ( $n_r, n_z$  – число разбиений обмотки на элементарные катушки,

$\Delta t$  – элементарный расчетный шаг по времени,  $\Delta z_p$  – расчетная величина для градиента взаимной индуктивности), **постоянные** ( $F_{сн}, m_n$  – поверхность охлаждения и масса обмотки,  $\Delta s_n$  – площадь поперечного сечения проводника и др.) и **изменяемые** ( $R_n, c_n$  – сопротивление и теплоемкость  $n$ -ой обмотки,  $M_{12}$  – взаимоиндуктивность между обмотками,  $\alpha_n(T)$  – коэффициент теплоотдачи обмотки). В качестве **текущих параметров** процесса выступают:  $i_n$  или  $j_n$  – ток или плотность тока в обмотке;  $T_n$  – температура или  $\theta$  – превышения температуры обмотки;  $u_c, u_k$  – напряжения на емкостном накопителе и обмотке;  $W$  – энергия (кинетическая, потери в обмотках, магнитная, источника);  $V, \Delta Z$  – скорость и перемещения якоря с исполнительным элементом;  $f_z$  – результирующая осевая сила;  $K_M=M_{12}L_1^{-0,5}L_2^{-0,5}$  – коэффициент магнитной связи между обмотками.

Для того чтобы учесть комплекс взаимосвязанных процессов и различные нелинейные зависимости параметров используется следующий расчетный алгоритм циклического действия (рис.2). Весь переходный процесс при численном расчете разбивается на определенное число малых интервалов времени  $\Delta t = t_{k+1} - t_k$ , в пределах которых все величины считаются неизменными. При циклическом изменении на каждом шаге по времени осуществляется расчет текущих значений параметров с формированием рабочих характеристик. Величина параметра  $t_p \rho^*$  оценивается по конечным значениям расчета и, при необходимости, осуществляется процесс корректировки эффективного сечения провода обмотки, влияющего на ее сопротивление. При таком подходе для расчета токов на численно малом временном интервале можно использовать линейные дифференциальные уравнения.

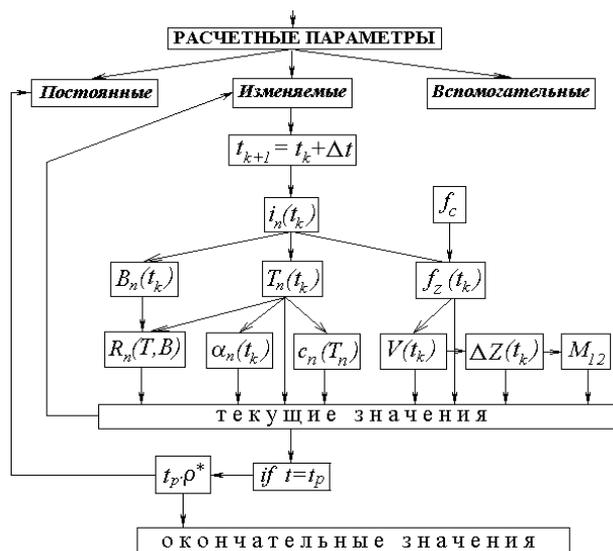


Рис.2. Взаимосвязь расчетных параметров криогенного ЭИПИТ

Параметр  $t_p \rho^*$  – равный произведению  $t_p$  – длительности однополупериодного импульса возбуждения и удельного сопротивления  $\rho^* = 0,5 \cdot [\rho(0) + \rho(t_p)]$  учи-

тывает уменьшение сечения проводника из-за скин-эффекта. Так, при использовании круглого провода диаметром  $d_0$ , если значение указанного параметра меньше величины  $0,392\mu_0 d_0^2$ , Гн·м, то его расчетная площадь поперечного сечения выбирается равной

$$\Delta s^* = 2,5d_0\sqrt{t_p\rho^*/\mu_0} - 2 \cdot t_p\rho^*/\mu_0.$$

На основе выбора основных параметров и расчетного алгоритма можно легко рассчитать рабочие характеристики ЭИПИТ.

#### РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Заданы исходные параметры ЭИПИТ: наружный диаметр  $D_{ex}=0,11$  м, диаметр медного провода  $d_0=0,97$  мм, масса исполнительного элемента  $P=1$  кг и коэффициент упругости пружины  $K_p=50$  кН/м. При этом имеется два конденсатора емкостью  $C=100$  мкФ. При возбуждении однополупериодным импульсом от емкостного накопителя определить его напряжение  $U_0$ , при котором обеспечивается перемещение исполнительного элемента  $\Delta Z_m$  на расстояние 50 мм при функционировании в условиях комнатной и азотной температур.

Для данной задачи при  $T_0=77$  К получены следующие рабочие параметры при использовании одного конденсатора с  $W_0=2,5$  кДж:  $D_{in}=0,02$  м;  $H_1=0,019$  м;  $H_2=0,004$  м;  $w_1=700$ ;  $w_2=150$ ;  $L_1=2,69 \cdot 10^{-2}$  Гн;  $L_2=1,23 \cdot 10^{-3}$  Гн;  $M_{12}(0)=4,57 \cdot 10^{-3}$  Гн;  $K_M(0)=0,79$ ;  $\Delta=1$  мм;  $\delta=1,85$  мм;  $R_1(0)=0,437$  Ом;  $R_2(0)=0,095$  Ом;  $i_{1m}=450$  А;  $c=187$  Дж/(кг·К);  $c_u=440$  Дж/(кг·К);  $c_k=300$  Дж/(кг·К);  $m_1=1,7$  кг;  $m_2=0,37$  кг;  $F_{a1}=0,0251$  м<sup>2</sup>;  $F_{a2}=0,0199$  м<sup>2</sup>.

На рис.3 для этого преобразователя показаны рассчитанные электромеханические и тепловые характеристики. В данном преобразователе на обмотку якоря воздействует импульсная электродинамическая сила отталкивания. Но поскольку между токами в обмотках имеется заметный фазовый сдвиг, на якорь через определенное время действует как электродинамическая, так и механическая тормозные силы, ограничивающие его перемещение на определенную величину  $\Delta Z_m$ . Здесь крестиками и кружками показаны значения, рассчитанные по предлагаемой инженерной методике. На основе данных характеристик построены зависимости максимальной величины перемещения якоря с исполнительным элементом  $\Delta Z_m$  от величины напряжения источника  $U_0$  для преобразователя, работающего при комнатной и азотной температурах (рис.4). При этом используются последовательное ( $C=50$  мкФ) и параллельное ( $C=200$  мкФ) соединение двух емкостных накопителей. Вследствие этого по полученным кривым можно определить напряжение источника, обеспечивающего заданное перемещение.

Так, для обеспечения  $\Delta Z_m=50$  мм при работе в условиях азотной температуры необходимо выбирать  $U_0$ : 1,6 кВ (одиночный накопитель), 1,05 кВ (параллельное соединение), 2,8 кВ (последовательное соединение).

При отсутствии криогенного охлаждения необходимо выбирать повышенные значения напряжений  $U_0$ : 4,4 кВ (одиночный накопитель), 3,5 кВ (параллельное соединение), 7,5 кВ (последовательное соединение).

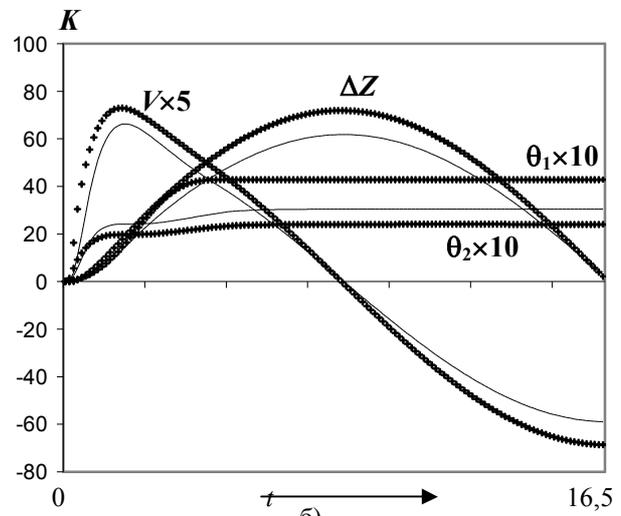
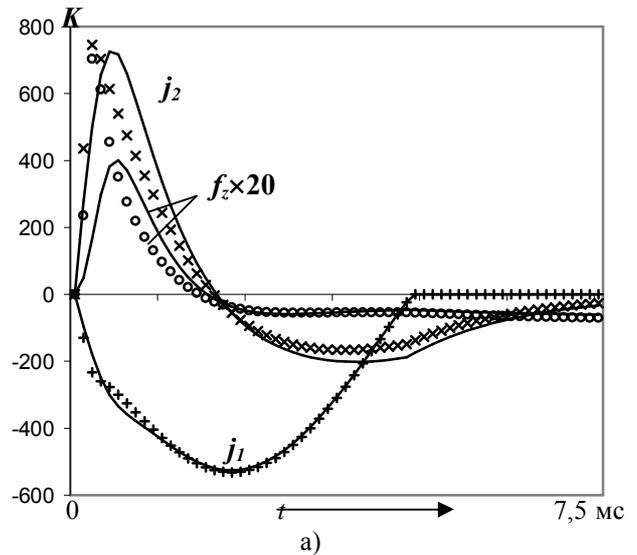


Рис.3. Характеристики ЭИПИТ:  $j_{1,2}$ , А/мм<sup>2</sup>;  $f_z$ , кН;  $V$ , м/с;  $\Delta Z$ , мм;  $\theta_{1,2}$ , К

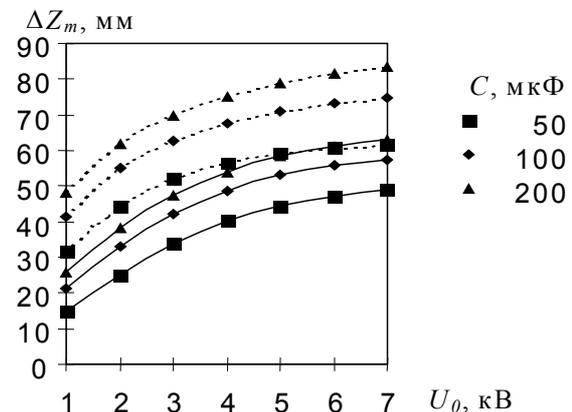


Рис.4. Зависимость величины максимального перемещения от напряжения источника при  $T_0$ : 297 К (сплошные линии) и 77 К (штриховые линии)

Работа при пониженных напряжениях источника с использованием электроизоляционной жидкости – жидкого азота, обеспечивает повышение надежности криогенного преобразователя по сравнению с «теплым» вариантом, работающим при комнатной температуре.

На рис.3 сплошными линиями показаны значения, полученные при использовании уточненной методики расчета параметров собственной и взаимной индуктивности [9], по которой используется разбиение обмоток на элементарные катушки в радиальном и аксиальном направлениях ( $nr=10$  и  $nz=5$ ). Поскольку при увеличении числа разбиений возрастает точность расчета с одновременным и значительным увеличением расчетного времени, необходимо найти оптимальное их соотношение, что важно для инженерной методики.

#### ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ВЫЧИСЛЕНИЙ

При использовании данной численно-аналитической методики, реализуемой с использованием ЭВМ, оценим влияние вспомогательных расчетных параметров на погрешности расчета. На рис.5 для указанного ЭИПИТ, работающего без возвратной пружины, показано влияние величины расчетного шага по времени  $\Delta t$ , нормированного на длительность импульса возбуждения  $t_p$ . В табл. 4 представлены относительные погрешности рассчитанных величин при наиболее грубом из рассмотренных вариантов. В целом можно отметить более высокие погрешности параметров якорной обмотки по сравнению с параметрами статорной обмотки возбуждения. При этом параметры, получаемые в конце рабочего цикла, меньше подвержены влиянию расчетного шага, чем амплитудные значения, достигаемые в течение рабочего процесса. На основании полученных результатов можно рекомендовать величину  $\Delta t^* = 4\%$ , что составляет 25 циклов изменения текущих расчетных параметров за время длительности импульса возбуждения.

Таблица 4

Относительные погрешности  $\varepsilon$ , % параметров ЭИПИТ при  $\Delta t^* = 6\%$

T, K	279	77	T, K	279	77
$\varepsilon(j_{1m})$	0,06	0,48	$\varepsilon(\eta)$	0,54	0,11
$\varepsilon(j_{2m})$	21,21	32,49	$\varepsilon(V)$	1,64	2,68
$\varepsilon(f_{zm})$	37,87	61,73	$\varepsilon(\theta_1)$	2,35	2,41
$\varepsilon(\eta_m)$	11,03	3,69	$\varepsilon(\theta_2)$	18,33	27,07

Число разбиений обмоток на элементарные катушки  $nr$ ,  $nz$  также оказывает влияние на точность получаемых результатов (рис.6). При этом наблюдаются практически те же тенденции, характерные при выборе расчетного шага по времени  $\Delta t$ . Однако в этом случае необходимо учитывать конфигурацию обмоток. Так, для дисковых обмоток можно использовать разбиения только в радиальном направлении (табл.5), что позволяет существенно сократить длительность расчетного цикла и обеспечить необходимый для ин-

женерных расчетов уровень точности результатов. Практически здесь реализуется квадратная форма элементарного сечения, при которой, как установлено в работе [11], наблюдается наименьшая погрешность. Погрешность возрастает в случае прямоугольных расчетных элементов, причем тем сильнее, чем сильнее вытянуты прямоугольники независимо от ориентации сторон относительно координатных осей.

Таблица 5

Относительные погрешности  $\varepsilon$ , % параметров ЭИПИТ в зависимости от числа разбиений обмоток  $nr$  и  $nz$

$nr; nz$	1; 1		4; 1	
T, K	279	77	279	77
$\varepsilon(j_{1m})$	1,21	0,70	0,22	0,12
$\varepsilon(j_{2m})$	4,99	12,43	2,42	3,93
$\varepsilon(f_{zm})$	50,1	35,07	4,61	1,43
$\varepsilon(\eta_m)$	59,82	11,87	7,09	1,97
$\varepsilon(\eta)$	40,50	9,14	6,64	1,62
$\varepsilon(V)$	18,18	6,04	3,10	0,97
$\varepsilon(\theta_1)$	0,23	0,67	0,02	0,01
$\varepsilon(\theta_2)$	24,65	28,18	5,20	3,90

При выполнении якоря в виде массивного элемента и замене его на совокупность индуктивно связанных контуров особое внимание должно быть уделено разбиению его поперечного сечения на элементарные участки, так как их вид непосредственно влияет на точность расчета, объем требуемой памяти и время счета. При ограниченных ресурсах ЭВМ и корректном учете скин-эффекта разбиение должно учитывать особенности конфигурации поперечного сечения якоря и ориентацию относительно обмотки возбуждения. Для повышения точности расчета дискретизацию якоря целесообразно осуществлять в направлении проявления скин-эффекта неравномерно в соответствии со степенью его проявления: с возрастанием от поверхности в глубь якоря [12]. Неравномерность разбиения площадей элементарных участков целесообразно осуществлять обратно пропорционально плотности тока в данном элементе, предварительно полученной при равномерном разбиении площадей. При этом размер первого элемента разбиения целесообразно задавать пропорциональным глубине проникновения поля в якорь на частоте воздействия. В зависимости от требований к точности расчета можно варьировать параметры вычислительного процесса, изменяя коэффициент пропорциональности между размером первого элемента разбиения и глубиной проникновения поля в якорь.

Таким образом, используя разработанную инженерную методику, можно рассчитать параметры и характеристики ЭИПИТ, работающих в различных температурных условиях, для которых характерно существенное изменение расчетных параметров в течение короткого рабочего цикла, с использованием компьютерной техники оперативно и с необходимой точностью.

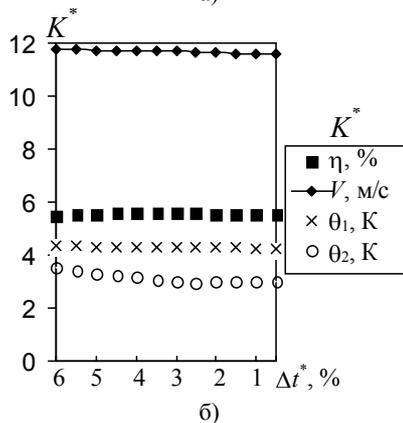
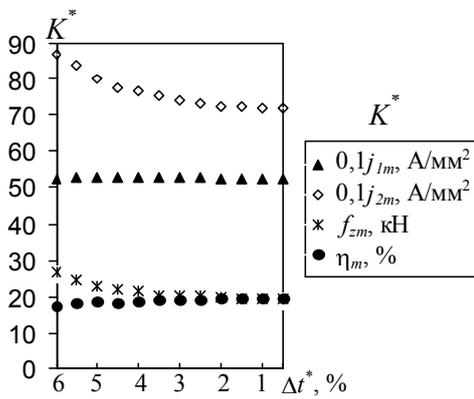


Рис.5. Относительные значения максимальных (а) и конечных (б) параметров ЭИПИТ, работающих при комнатной температуре, в зависимости от расчетного шага по времени

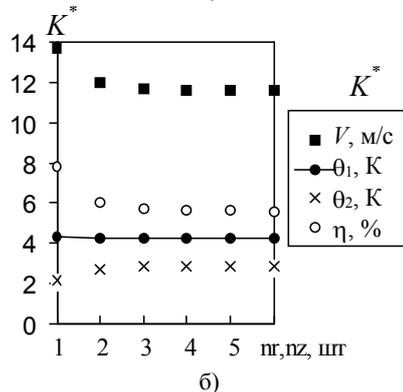
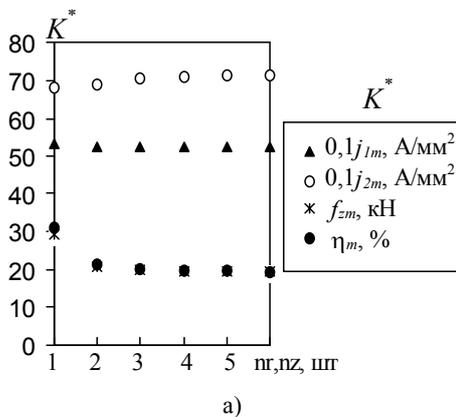


Рис.6. Относительные значения максимальных (а) и конечных (б) параметров ЭИПИТ, работающих при комнатной температуре в зависимости от числа разбиений обмоток на элементарные катушки

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана инженерная методика расчета основных параметров и характеристик криогенного преобразователя, охлаждаемого жидким азотом, ориентированная на использование вычислительной техники. Методика позволяет учесть изменение и взаимосвязь электромагнитных, тепловых и механических параметров в кратковременном рабочем цикле. Проведена оценка вспомогательных расчетных параметров на погрешности численных расчетов.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Балтаханов А.М., Бондалетов В.Н. Расчет электромагнитных и электромеханических переходных процессов в индукционно-динамических системах // Электричество. - 1981. - № 2. - С. 64-67.
- [2] Васьковский Ю.Н., Нестыкайло Л.Л. Определение параметров индуктора при расчете рабочих характеристик импульсного индукционно-динамического преобразователя // Техн. электродинамика.-1985. - № 5. - С. 23-27.
- [3] Борткевич С.П., Кравец И.А., Матвиенко О.В. Численно-аналитическое моделирование процессов в магнитно-импульсных установках с плоским индуктором и движущимся диском // Техн. электродинамика. - 1995. - № 3. - С. 6-8.
- [4] Бондалетов В.Н., Тюткин В.А. Инженерный метод расчета индукционно-динамического привода // Электротехника. - 1979. - № 10. - С. 28-31.
- [5] Булавина Т.Г., Карпенко Л.Н. К вопросу о проектировании оптимальных индукционно-динамических приводов // Изв. вузов. Электромеханика. - 1985. - № 12. - С. 105-108.
- [6] Птах Г.К. Методологические аспекты разработки компьютерных моделей электромеханических преобразователей // Изв. вузов. Электромеханика. - 2003. - № 1. - С. 7-11.
- [7] Barmada S. Field analysis in tubular coilguns by wavelet transform // IEEE Transactions on Magnetics. - 2003. - Vol. 39, № 1. - P. 120-124.
- [8] Сильные и сверхсильные магнитные поля и их применение / Под ред. Ф.Херлаха. - М.: Мир, 1988. - 456 с.
- [9] Боллох В.Ф., Марков А.М., Лучук В.Ф., Щукин И.С. Математическое моделирование электродинамического двигателя ударного действия // Техн. электродинамика. - Спец. выпуск № 2. - 1998. - Т. 2. - С. 147-152.
- [10] Боллох В.Ф., Марков А.М., Лучук В.Ф., Щукин И.С. Исследование электромеханического цилиндрического ускорителя индукционного типа с импульсным возбуждением // Техн. электродинамика. Тем.выпуск: Силовая электроника та енергоефективність.-2000.-Ч.1.-С. 39-44.
- [11] Лучкин О.В., Михайлов В.М., Панасенко О.Т. О вычислении диагональных элементов матриц, аппроксимирующих интегральные операторы в уравнениях плотности тока // Электронное моделирование. - 2001. - Т. 23, № 3. - С. 116-123.
- [12] Чертков И.А. Расчет поверхностного эффекта в многовитковых катушках методом связанных контуров при неравномерном разбиении // Методы и средства физического и математического моделирования для решения задач энергетики, электротехники, электромеханики. - Сборник науч. трудов Моск. энергетич. ин-та. - М.: МЭИ, 1988. - № 158. - С. 46-51.

Поступила 28.08.2003