

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СИЛОВОГО ИМПУЛЬСНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ИНДУКЦИОННОГО ТИПА С КРИОРЕЗИСТИВНЫМИ ОБМОТКАМИ

Болюх В.Ф. к.т.н., Болюх Е.Г.

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"
Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", кафедра "Общая электротехника",
тел. (0572) 40-04-27, E-mail: bolukh@kpi.kharkov.ua

Запропонована оцінка ефективності силового імпульсного електромеханічного перетворювача індукційного типу на основі величини питомого імпульсу електродинамічної сили. Досліджена ефективність роботи перетворювача, який має якорь у вигляді багатовиткової короткозамкнутої обмотки, при збудженні від джерела постійної напруги, що короткочасно підключається, і ємнісного накопичувача. Визначено вплив криогенного охолодження рідким азотом та головних параметрів обмоток на величину питомого імпульсу електродинамічної сили перетворювача.

Предложена оценка эффективности силового импульсного электромеханического преобразователя индукционного типа на основе величины удельного импульса электродинамической силы. Исследована эффективность работы преобразователя, содержащего якорь в виде многовитковой короткозамкнутой обмотки, при возбуждении от кратковременно подключаемого источника постоянного напряжения и емкостного накопителя. Установлено влияние криогенного охлаждения жидким азотом и основных параметров обмоток на величину удельного импульса электродинамической силы преобразователя.

ВВЕДЕНИЕ

Во многих областях науки и техники используются электромеханические устройства ударного действия с кратковременным рабочим циклом. К ним относятся магнитно-импульсные преобразователи, предназначенные для создания объектов специальных форм, возбуждения силовых импульсов заданного спектра, прессования веществ и объектов, очистки емкостей от остатков различных веществ и др. [1-3]. Основное назначение таких преобразователей заключается в создании значительных электродинамических усилий (ЭДУ) импульсного характера при незначительных перемещениях вторичного якоря. В традиционных силовых электромеханических импульсных преобразователях индукционного типа (ЭИПИТ), имеющих, как правило, дисковую конфигурацию, обмотка возбуждения (ОВ) индукционно взаимодействует с вторичным электропроводящим коаксиально расположенным якорем, выполненным в виде плотно намотанной короткозамкнутой многовитковой обмотки или одновитковой обмотки - массивного элемента [4]. Поскольку эффективная высота массивного элемента ограничена глубиной скин-слоя, будем рассматривать вторичный элемент в виде короткозамкнутой обмотки (КО), обеспечивающей равномерное распределение индуктированного тока по всему сечению.

Один из перспективных путей повышения силовых показателей ЭИПИТ заключается в охлаждении его обмоток криогенным хладагентом, в качестве которого целесообразно использовать жидкий азот - доступный, безопасный и дешевый хладагент, являющийся хорошим изолятором и не требующим сложной системы тепловой защиты и рекуперации [5]. На рис. 1 показана принципиальная схема ЭИПИТ, предназначенного для возбуждения сейсмических импульсов и включающего криорезистивную ОВ 1,

установленную на изоляционном каркасе 2 и присоединенную к упорной стенке 3 диэлектрического корпуса 4, и криорезистивную КО 5, соединенную с промежуточным силовым элементом 6. Корпус 4 выполнен в виде криостата с центральным отверстием 7 для ударного элемента 8, который через теплоизоляционные опоры 9 соединен с силовым элементом 6. Криостат содержит патрубки подачи 10 и выхода 11 хладагента. Элемент 6 содержит внешнюю обечайку 12, соединенную с упорной стенкой 3 при помощи герметичного гибкого сильфона 13. Направляющие стержни 14, на которых установлены возвратные пружины 15, проходят через отверстия в обечайке 12 и присоединены к упорной 3 и внешней 16 стенкам при помощи упорных элементов 17. На торцевых сторонах обмоток 1 и 5 размещены пористые изоляционные прокладки 18, обеспечивающие перемещение хладагента в радиальном направлении.

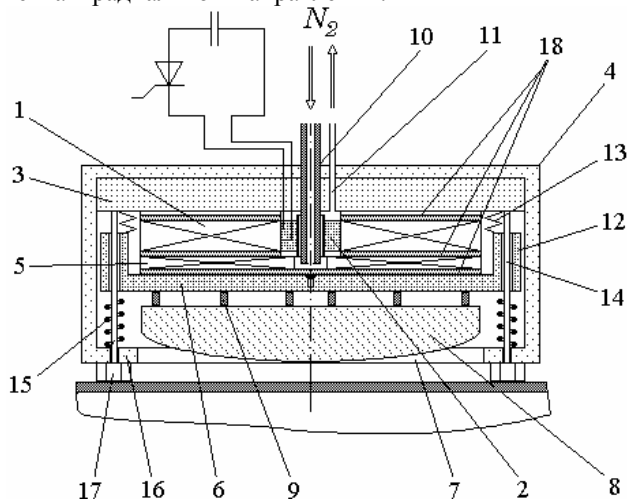


Рис. 1. Принципиальная схема криогенного ЭИПИТ

Для оценки эффективности силового преобразователя используем величину удельного импульса электродинамической силы, равного при использовании источника постоянного напряжения (ИПН) и емкостного накопителя (ЕН), соответственно

$$\gamma_f = \frac{\int_0^{t_p} f_z(t) dt}{\int_0^{t_p} u(i_1) \cdot i_1(t) dt},$$

$$\gamma_f = \frac{2}{C \cdot U_0^2} \int_0^{t_p} f_z(t) dt,$$

где $f_z(t) = i_1(t) \cdot i_2(t) \frac{dM_{12}}{dz}$ - аксиальные ЭДУ между

обмотками;

$i_1(t)$, $i_2(t)$ - ток в ОВ и КО, соответственно;

$M_{12}(z)$ - взаимоиндуктивность между обмотками;

t_p - длительность импульса;

$u(i)$ - напряжение ИПН;

C , U_0 - емкость и зарядное напряжение ЕН.

Особенностью криорезистивных обмоток ЭИПИТ является зависимость их удельного сопротивления от температуры T и магнитного поля B . Так, для охлаждаемой жидким азотом обмотки, намотанной проводом из технической меди, удельное сопротивление можно описать следующей зависимостью [6]:

$$\lg\left(\frac{\rho(T, B)}{\rho(T)} - 1\right) = -6,821 + 2,537 \cdot \lg\left(\frac{1,668 \cdot 10^{-7} B}{\rho(T)}\right) - 0,1853 \times$$

$$\times \lg^2\left(\frac{1,668 \cdot 10^{-7} B}{\rho(T)}\right),$$

где $\rho(T) = 0,032 \cdot \rho(T_0)(T - 46K)$; $T_0 = 77 K$.

Усредненную по сечению температуру обмоток при наличии теплового контакта между ними, например, через изоляционную прокладку, можно оценить при помощи рекуррентного соотношения [7]

$$T_n(t_{k+1}) = T_n(t_k) \cdot \phi + (1 - \phi) \left\{ \frac{i_n^2(t_k) \cdot d_a \cdot R_n(T_n, B_n)}{\alpha_{Tn}(T_n) F_{ан} d_a + \lambda(T) S} + \frac{T_0 F_{ан} d_a \alpha_{Tn}(T_n) + T_m(t_k) \lambda(T) S}{\alpha_{Tn}(T_n) F_{ан} d_a + \lambda(T) S} \right\},$$

где $\phi = \exp\left(-\frac{F_{ан} \alpha_{Tn}(T_n) d_a + \lambda(T) S}{m_n c_n(T_n) d} \Delta t\right)$;

$n=1, 2$ - индексы ОВ и КО; $m = 2, 1$ при $n=1, 2$;

$F_{ан}$ - поверхность охлаждения n -ой обмотки;

$\alpha_{Tn}(T_n)$ - коэффициент теплоотдачи от n -ой обмотки к хладагенту; d_a - толщина прокладки; S - площадь поверхности прокладки; l - нормаль к элементарному участку прокладки ds ; $\lambda(T)$ - коэффициент теплопроводности прокладки.

Расчет индукции магнитного поля осуществляется при суперпозиции магнитных полей обмоток по известным выражениям [6].

ВОЗБУЖДЕНИЕ ЭИПИТ ОТ ИПН

При возбуждении от ИПН с параметрами U_0 , R_0 , L_0 токи в обмотках ЭИПИТ представим в виде следующих рекуррентных соотношений [8]

$$i_1(t_{k+1}) = \frac{U_0}{R_1} + \frac{U_0 L_2 + M_{12} R_2 i_2(t_k) - R_1 L_2 i_1(t_k)}{(L_0 + L_1)(1 - K_{12}^2)(x_1 - x_2) L_2} \times$$

$$\times [\exp(x_1 \Delta t) - \exp(x_2 \Delta t)] + \frac{U_0 - R_1 i_1(t_k)}{R_1(x_1 - x_2)} \times$$

$$\times [x_2 \exp(x_1 \Delta t) - x_1 \exp(x_2 \Delta t)];$$

$$i_2(t_{k+1}) = \frac{M_{12} R_1 i_1(t_k) - R_2(L_0 + L_1) i_2(t_k) - M_{12} U_0}{(L_0 + L_1)(1 - K_{12}^2)(x_2 - x_1) L_2} \times$$

$$\times [\exp(x_2 \Delta t) - \exp(x_1 \Delta t)] + \frac{i_2(t_k)}{x_2 - x_1} \times$$

$$\times [x_2 \exp(x_1 \Delta t) - x_1 \exp(x_2 \Delta t)];$$

где $R_j = R_1(T_1, B_1) + R_0$; $R_2 = R_2(T_2, B_2)$;

L_n - индуктивность n -ой обмотки;

$$K_{12} = M_{12} [(L_0 + L_1) L_2]^{0,5};$$

$$x_{1,2} = -\frac{R_1 L_2 + R_2(L_0 + L_1)}{2(L_0 + L_1) L_2 (1 - K_{12}^2)} \pm$$

$$\pm \left[\left(\frac{R_1 L_2 + R_2(L_0 + L_1)}{2(L_0 + L_1) L_2 (1 - K_{12}^2)} \right)^2 - \frac{R_1 R_2}{(L_0 + L_1) L_2 (1 - K_{12}^2)} \right]^{0,5}.$$

Рассмотрим ЭИПИТ при кратковременном возбуждении от ИПН с $U_0 = 1,5$ кВ, у которого первичная ОВ взаимодействует с одной из короткозамкнутых обмоток (табл.). Обмотки выполнены компаундированными с наружным диаметром $D_{ex} = 100$ мм, внутренним диаметром $D_{in} = 20$ мм и плотно намотаны медным проводом диаметром $d_0 = 0,8$ мм. Они выполнены с различной аксиальной высотой H и содержат разное число витков w .

Таблица

Параметры обмоток ЭИПИТ			
Обозначение	Тип обмотки	H , мм	w , шт.
ОВ	Возбуждения	20	968
КО1	Короткозамкнутая	4	176
КО2	Короткозамкнутая	10	440

На рис.2 показаны плотности тока в обмотках ЭИПИТ. Наличие КО несколько снижает амплитуду тока в первичной обмотке, но при этом в ней индуцируется ток, имеющий выраженный импульсный характер. Азотное охлаждение увеличивает амплитуду тока в ОВ более чем в 2,5 раза, а во вторичной обмотке - более чем в 6 раз. По сравнению с комнатной температурой амплитуда ЭДУ f_z возрастает примерно в 20 раз (рис.3). Причем обмотка КО2 при меньшей плотности тока обеспечивает более высокую амплитуду и длительность импульса силы. Индуцируемый ток через определенное время меняет знак, следствием чего является возникновение силы электродинамического притяжения, причем этот эффект особенно проявляется при криогенном охлаждении. Если в КО потери во времени выходят на определенный уровень, то в ОВ они стремительно растут, что сопровождается возрастанием сопротивления и ухудшением теплоотвода из-за перехода в пленочный режим кипения криогенной жидкости.

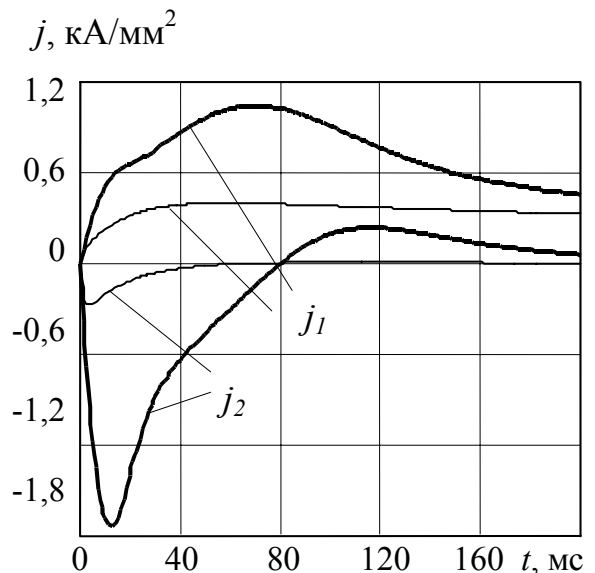


Рис.2. Плотности тока в ОВ j_1 , возбуждаемой от ИПН, и КО1 j_2 при комнатной (тонкие линии) и азотной (жирные линии) температурах

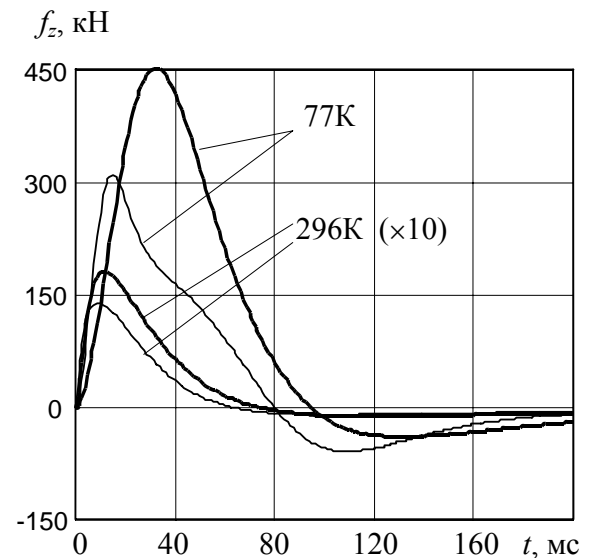


Рис.3. Аксиальные ЭДУ ЭИПИТ, возбуждаемом от ИПН, при наличии КО1 (жирные линии) и КО2 (толстые линии)

При азотной температуре первичная обмотка за 250 мс нагревается примерно на 250 К, а нагрев короткозамкнутых обмоток более слабый: обмотка КО1 нагревается примерно на 80 К, а обмотка КО2 - на 45 К.

Оценим влияние азотного охлаждения на величину удельного импульса ЭДУ при изменении основных параметров обмоток, считая радиальные их размеры неизменными. На рис.4 показаны значения параметров эффективности ЭИПИТ в зависимости от диаметра провода d_0 (и изменения числа витков w_1) ОВ неизменной формы при $\varepsilon_{H1}=0,25$ и $\varepsilon_{H2}=0,05$, где $\varepsilon_{Hn} = H_n / (D_{ex} - D_{in})$ - относительная высота n -ой обмотки. На основании этих зависимостей можно сделать следующие выводы:

- амплитуда ЭДУ за счет криогенного охлаждения повышается примерно в 50...80 раз, а величина

импульса силы - в 100...700 раз, причем большие значения достигаются при более низких напряжениях ИПН и большей индуктивности обмотки возбуждения;

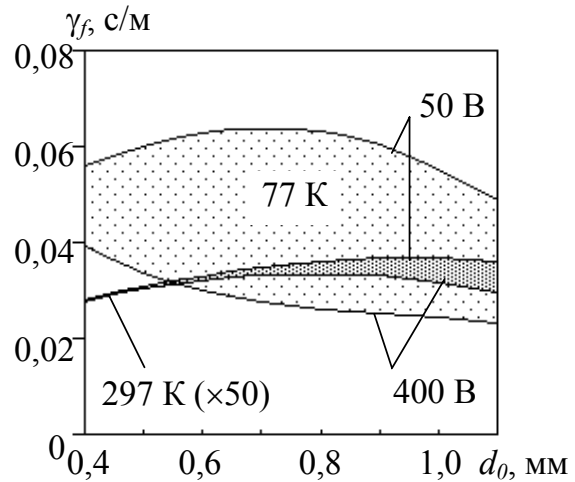


Рис.4. Влияние диаметра провода ОВ на эффективность ЭИПИТ, возбуждаемого от ИПН

- удельный импульс ЭДУ γ_f за счет криогенного охлаждения повышается примерно в 50 раз, причем с повышением напряжения источника происходит снижение его величины;
- максимальная величина удельного импульса ЭДУ достигается только при определенной индуктивности обмотки возбуждения.

При изменении индуктивности первичной обмотки из-за аксиальной высоты H_1 , намотанной медным проводом диаметром $d_0=0,8$ мм, параметры эффективности при неизменных размерах вторичной обмотки ($\varepsilon_{H2}=0,05$) имеют иной характер (рис.5,а):

- рост амплитуды и импульса ЭДУ, обусловленный криогенным охлаждением, слабо зависит от высоты первичной обмотки;
- с увеличением высоты ОВ повышаются эффективность передачи интеграла тока от первичной к вторичной обмотки, и возрастает величина удельного импульса ЭДУ.

Число витков w_2 и диаметр провода d_0 , величина которого не превышает глубину скин-слоя, у вторичной обмотки при сохранении коэффициента заполнения практически не влияют на эффективность ЭИПИТ. На рис.5,б в зависимости от высоты H_2 (и соответствующего числа витков) КО представлены значения параметра γ_f при неизменных размерах ОВ ($\varepsilon_{H1}=0,125$). Здесь проявляются следующие тенденции:

- с увеличением высоты КО уменьшается коэффициент передачи тока во вторичную цепь;
- криогенное охлаждение слабо влияет на зависимости максимального значения и величины импульса ЭДУ от высоты вторичной обмотки;
- наибольшее значение удельного импульса ЭДУ γ_f достигается при определенных размерах КО (примерно при значении геометрического параметра $\varepsilon_{H2}=0,15$).

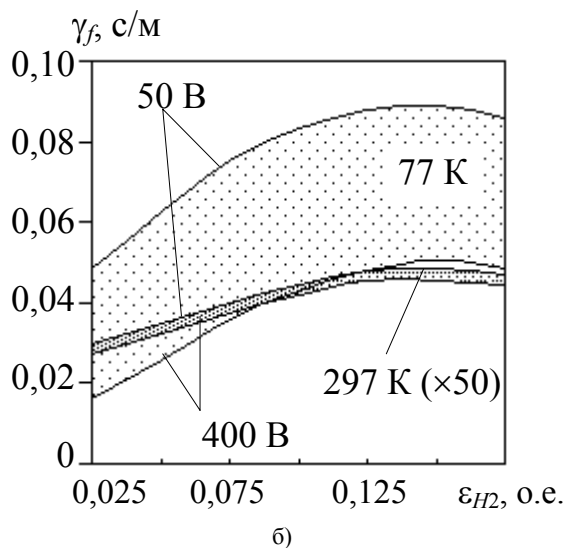
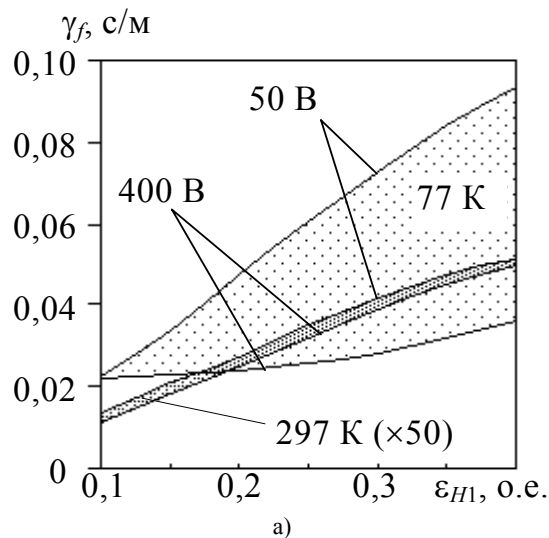


Рис.5. Влияние относительной высоты первичной (а) и вторичной (б) обмоток, на эффективность ЭИПИТ, возбуждаемого от ИПН

Таким образом, для обеспечения максимального электродинамического воздействия в ЭИПИТ, возбуждаемом от ИПН, необходимо выбирать первичную обмотку с геометрическим параметром $\varepsilon_{H1}=0,35...0,4$, намотанную проводом диаметром 0,8 мм, а вторичную обмотку с параметром $\varepsilon_{H2}=0,14...0,16$.

ВОЗБУЖДЕНИЕ ЭИПИТ ОТ ЕН

При возбуждении от ЕН емкостью C характер токов в обмотках ЭИПИТ зависит от знака параметра

$$D = G^3/27 + Q^2/4,$$

$$\text{где } G = \frac{R_1 R_2 + L_2 C^{-1}}{\nu} - \frac{\chi^2}{3\nu^2}; \quad \nu = L_1 L_2 - M_{12}^2;$$

$$Q = \frac{2\chi^3}{27\nu^3} - \chi \frac{R_1 R_2 + L_2 C^{-1}}{3\nu^2} + \frac{R_2}{\nu C}; \quad \chi = R_1 L_2 + R_2 L_1.$$

Если $D < 0$, токи в обмотках ЭИПИТ можно описать рекуррентными соотношениями [9]:

$$i_n(t_{k+1}) = \{i_n(t_k)(\alpha_1 x_2 x_3 + \alpha_2 x_1 x_3 + \alpha_3 x_1 x_2) -$$

$$- [i_m(t_k)M_{12}R_m - i_n(t_k)R_n L_m - u_c(t_k)\gamma_n] \cdot \nu^{-1} \times \\ \times [\alpha_1(x_2 + x_3) + \alpha_2(x_1 + x_3) + \alpha_3(x_1 + x_2)] + \Theta_n \times \\ \times (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) \} [x_2 x_3(x_3 - x_2) + x_1 x_3(x_1 - x_3) + \\ + x_1 x_2(x_2 - x_1)]^{-1},$$

где $\alpha_1 = (x_1 - x_2)\exp(x_1 \Delta t)$; $\alpha_2 = (x_1 - x_3)\exp(x_2 \Delta t)$;

$$\alpha_3 = (x_2 - x_1)\exp(x_3 \Delta t); \quad \gamma_1 = L_2; \quad \gamma_2 = -M_{12};$$

$$x_p = 2\sqrt[3]{\nu} \cos\left(\frac{\phi + 2\pi(p-1)}{3}\right) - \frac{\chi}{3\nu}; \quad p = 1, 2, 3;$$

$$\nu = \sqrt{-\frac{G^3}{27}}; \quad \phi = \arccos\left(-\frac{Q}{2\nu}\right);$$

u_c – напряжение ЕН;

$$\Theta_1 = \nu^{-2} \{i_1(t_k) [R_1(R_2 M_{12}^2 + R_1 L_2^2) - L_2 C^{-1} \nu] - i_2(t_k) \times \\ \times R_2 M_{12} \chi + u_c(t_k) (R_2 M_{12}^2 + R_1 L_2^2)\};$$

$$\Theta_2 = \nu^{-2} \{i_2(t_k) R_2 (R_1 M_{12}^2 + R_2 L_1^2) - i_1(t_k) M_{12} \times \\ \times (R_1 \chi - C^{-1} \nu) - u_c(t_k) M_{12} \chi\}.$$

Если величина $D > 0$, то токи в обмотках можно описать следующими рекуррентными соотношениями:

$$i_n(t_{k1}) = g^{-1} [g^2 + (f - d)^2]^{-1} \{g \cdot \exp(d \Delta t) [i_n(t_k) \times \\ \times (g^2 + f^2) - 2\varepsilon_n f + \Theta_n] + \exp(f \Delta t) \{ [i_n(t_k) d (f^2 - g^2 - \\ - f d) + \varepsilon_n (g^2 + d^2 - f^2) + \Theta_n (f - d)] \sin(g \Delta t) + \\ + g [i_n(t_k) d (d - 2f) + 2\varepsilon_n f - \Theta_n] \cos(g \Delta t) \},$$

где $g = -0,5\sqrt{3}(u - \nu)$; $f = -0,5(u + \nu) - \chi/3\nu$;

$$d = u + \nu - \chi/3\nu; \quad u = \sqrt[3]{-0,5Q + \sqrt{D}};$$

$$\nu = \sqrt[3]{-0,5Q - \sqrt{D}};$$

$$\varepsilon_n = \nu^{-1} (i_m(t_k) M_{12} R_m - i_n(t_k) R_n L_m - u_c(t_k) \gamma_n).$$

Рассмотрим ЭИПИТ, возбуждаемый от ЕН с параметрами: емкость $C=1$ мФ, зарядное напряжение $U_0=7,5$ кВ. При комнатной температуре КО несколько уменьшает амплитуду тока в первичной обмотке (рис.6), но при азотной температуре ситуация становится не столь однозначной: при наличии «низкой» КО1, амплитуда немного снижается, а при наличии «высокой» КО2 - амплитуда повышается примерно на 25 %. Кроме того, криогенное охлаждение сильнее влияет на вторичную обмотку: при использовании КО1 ток повышается в 3 раза, а в ОБ - в 1,5 раза; при наличии КО2 ток в ней повышается в 2,5 раза, а в ОБ - в 1,8 раза. В ЭИПИТ с ЕН токи изменяются негармонически со значительным фазовым сдвигом. Это приводит к тому, что между обмотками помимо ЭДУ отталкивания, действует и сила притяжения, хотя и меньшей величины (рис.7). Величина силы отталкивания за счет криогенного охлаждения повышается более чем в 6 раз при использовании КО1 и в 5 раз при использовании КО2, причем для «высокой» обмотки максимум ЭДУ возникает в 2 раза быстрее.

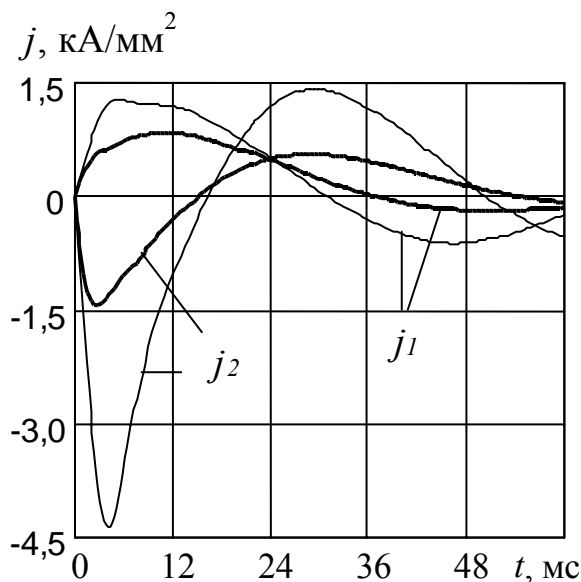


Рис.6. Плотности тока в ОВ j_1 и КО1 j_2 при комнатной (жирные линии) и азотной (тонкие линии) температурах ЭИПИТ с емкостным возбуждением

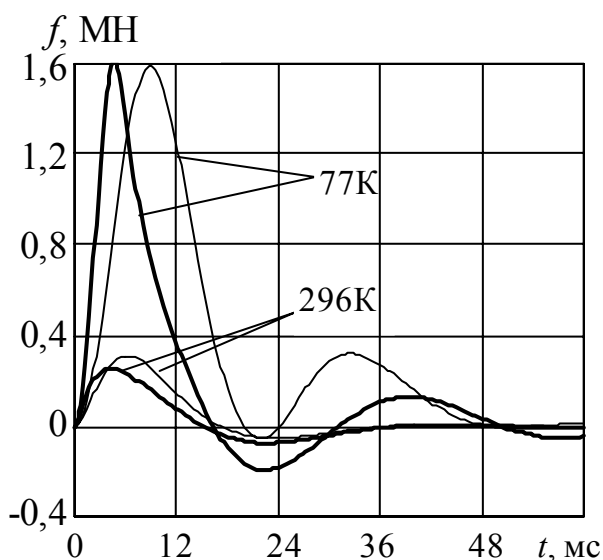


Рис.7. Аксиальные ЭДУ ЭИПИТ, возбуждаемое от ЕН, при наличии КО1 (толстые линии) и КО2 (тонкие линии)

Энергетические процессы в ЭИПИТ с емкостным возбуждением заметно отличаются от аналогичных процессов системы, использующей ИПН. Если в последнем случае потери в ОВ могут многократно превышать потери в КО, то при использовании ЕН указанные потери одного порядка и их соотношение существенно зависит от температурных условий. Так, в ЭИПИТ с КО1 при комнатной температуре потери ОВ превышают потери КО почти в 4 раза, а при азотной температуре, наоборот, потери во вторичной превосходят потери в первичной обмотке почти в 2 раза.

На рис.8 представлены значения параметров эффективности ЭИПИТ с емкостным возбуждением в зависимости от индуктивности плотно намотанной первичной обмотки неизменной формы (при изменении диаметра провода d_0 и соответствующего числа витков w_1).

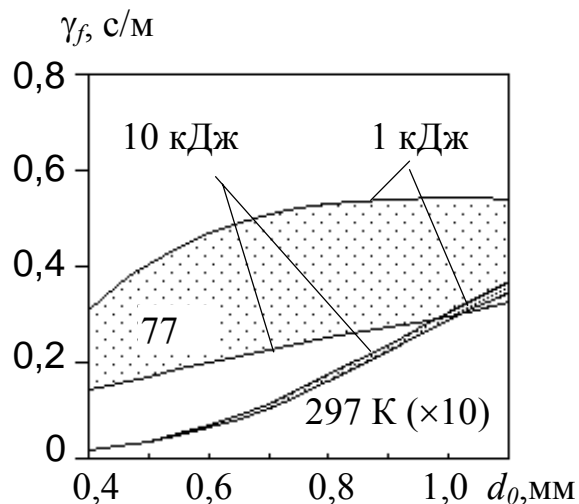


Рис.8. Влияние диаметра провода ОВ на эффективность ЭИПИТ, возбуждаемого от ЕН

На основании этих зависимостей можно отметить следующие тенденции и закономерности:

- относительное увеличение амплитуды и импульса ЭДУ, достигаемое за счет криогенного охлаждения, при использовании ЕН существенно ниже, чем при использовании ИПН; при уменьшении индуктивности обмотки возбуждения, а также с повышением энергии ЕН снижается эффективность криогенного охлаждения для ЭИПИТ;
- удельный импульс ЭДУ γ_f при использовании ЕН примерно на 2 порядка выше, чем при использовании ИПН, и повышается при уменьшении индуктивности ОВ;
- при криогенном охлаждении диапазон изменения параметра эффективности в зависимости от энергии ЕН существенно шире, чем при комнатной температуре, и максимальные значения реализуются при меньших энергиях источника.

При изменении индуктивности первичной обмотки за счет аксиальной высоты H_1 и соответствующего числа витков обмотки w_1 , намотанной проводом с $d_0=0,8$ мм, параметры эффективности при $\epsilon_{H2}=0,05$ имеют иной характер (рис.9,а):

- наименьшее увеличение амплитуды и импульса ЭДУ, вызванное криогенным охлаждением, происходит при определенной высоте обмотки возбуждения ($\epsilon_{H1}=0,15\dots 0,25$);
- в электромагнитной системе, возбуждаемой от ЕН, удельный импульс ЭДУ γ_f максимален при значении $\epsilon_{H1}\approx 0,15$ в условиях комнатной температуры; при криогенном охлаждении и малой энергии ЕН этот параметр повышается, а при высокой энергии - понижается при увеличении геометрического параметра ϵ_{H1} до 0,2, в дальнейшем оставаясь практически неизменным;
- с увеличением индуктивности первичной обмотки эффективность криогенного охлаждения для ЭИПИТ, особенно при низких энергиях ЕН, существенно возрастает.

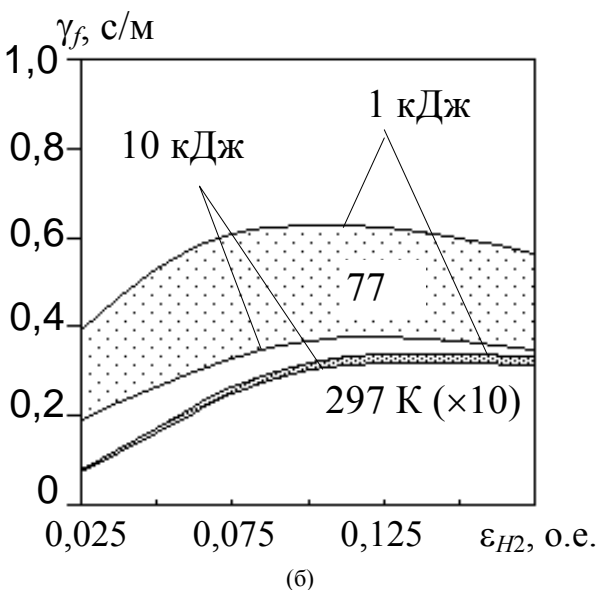
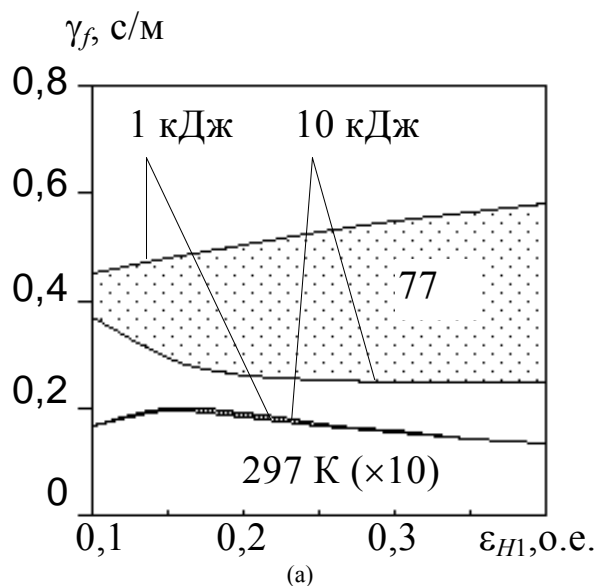


Рис.9. Влияние относительной высоты первичной (а) и вторичной (б) обмоток на эффективность ЭИПИТ, возбуждаемого от ЕН

На рис.9,б в зависимости от высоты H_2 и соответствующего числа витков w_2 вторичной обмотки представлены параметры эффективности ЭИПИТ при неизменных параметрах первичной обмотки, имеющей $\epsilon_{H1}=0,125$. Здесь проявляются следующие тенденции:

- с увеличением индуктивности короткозамкнутой обмотки происходит меньший рост амплитуды и импульса ЭДУ за счет криогенного охлаждения;
- максимальное значение удельного импульса ЭДУ достигается при определенных параметрах вторичной обмотки ($\epsilon_{H2}=0,1...0,12$).

Таким образом, при использовании ЭИПИТ с емкостным возбуждением необходимо выбирать первичную обмотку с параметрами $\epsilon_{H1}=0,35...0,4$, намотанную проводом диаметром $d_0=0,8$ мм, а вторичную обмотку с параметрами $\epsilon_{H2}=0,1...0,12$.

В целом же, использование жидкого азота в качестве низкотемпературного хладагента и изоляцион-

ной жидкости для обмоток ЭИПИТ, выполненных их традиционных электротехнических проводников, позволяет многократно уменьшить потери в преобразователе, повысить силовые импульсные нагрузки, снизить температурные градиенты и обеспечить необходимую надежность при отсутствии специальной высоковольтной изоляции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложена конструктивная схема силового импульсного преобразователя индукционного типа с криорезистивными обмотками, в котором жидкий азот используется как охлаждающая и изоляционная жидкость.
2. Предложено эффективность силового импульсного преобразователя оценивать при помощи величины удельного импульса электродинамической силы.
3. Установлено влияние криогенного охлаждения жидким азотом и основных параметров обмоток на эффективность силового ЭИПИТ, работающего при возбуждении от источника постоянного напряжения и от емкостного накопителя.
4. Показано, что эффективность силового ЭИПИТ с емкостным возбуждением примерно на порядок выше, чем при использовании источника постоянного напряжения.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Гури́н А.Г. Автокорреляционные характеристики и разрешающая способность электродинамических излучателей // Сборник научных трудов Харьковского государственного политехнического университета. - Харьков: ХГПУ. - 1999. - Вып. 7. - Ч.3. - С. 197-201.
- [2] Пат. 2018377 РФ, МКИ В06В1/04. Преобразователь электрических импульсов в механические / И.А.Левин (РФ). - № 4828961/10. Заявлено 12.06.90; Опубл. 30.08.94, Бюл. № 16. - 5 с.
- [3] Пат. 62623А Україна, МПК В65G65/49, В06В1/04. Індукційно-динамічний технологічний пристрій / Боллюх В.Ф., Марков О.М., Лучук В.Ф., Щукін І.С. (Україна). № 2003043468; Заявлено 17.04.03; Надрук. 15.12.03, Бюл. № 12. - 4 с.
- [4] Тюткин В.А. Магнитно-импульсный способ разрушения сводов и очистки технологического оборудования от налипших материалов // Электротехника. - 2002. - № 11. - С. 24-28.
- [5] Боллюх В.Ф., Данько В.Г. Электромеханические импульсные преобразователи с криорезистивными обмотками. - Харьков: Изд. ХНАДУ, 2001. - 215 с.
- [6] Сильные и сверхсильные магнитные поля и их применение / Под ред. Ф.Херлаха. - М.: Мир, 1988. - 456 с.
- [7] Боллюх В.Ф. Переходные процессы в электромагнитной системе возбуждения с криорезистивными нелинейностями и магнитными связями // Известия РАН. Энергетика. - 2001. - № 5. - С. 103-113.
- [8] Боллюх В.Ф. Электродинамическое взаимодействие короткозамкнутых катушек с криорезистивной обмоткой, возбуждаемой от источника постоянного тока // Электричество. - 2001. - № 7. - С. 59-66.
- [9] Боллюх В.Ф. Исследование индукционно-динамического двигателя // Электротехника. - 2000. - № 10. - С. 28-35.

Поступила 13.02.2004