

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СХЕМ ВКЛЮЧЕНИЯ ОБМОТОК ЛИНЕЙНОГО ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

*Розглянуто варіанти схем включення обмоток реактора і якоря лінійного електродвигуна, що ударно діє на ґрунт при пошуку корисних копалини. Схеми порівнюються за допомогою розрахунків імпульсного режиму роботи двигуна на основі сформульованих математичних моделей. Їх особливість - нелінійні двух- і трьохпараметричні функції диференціальних індуктивних параметрів обмоток і електромагнітної сили взаємодії реактора і якоря.*

*Рассмотрены варианты схем включения обмоток реактора и якоря линейного электродвигателя, ударно воздействующего на грунт при поиске полезных ископаемых. Схеми сравниваются посредством расчетов импульсного режима работы двигателя на основе сформулированных математических моделей. Их особенность – нелинейные двух- и трехпараметрические функции дифференциальных индуктивных параметров обмоток и электромагнитной силы взаимодействия реактора и якоря.*

**Введение.** Линейный импульсный электродвигатель (ЛИЭД) рассматриваемого типа представлялся в [1-3] и он предназначен для сейсморазведки полезных ископаемых. Упрощенно его конструктивная схема показана на рис. 1.

При подаче импульсов тока в обмотки взаимодействие реактора и якоря порождает электромагнитную силу  $F_{em}$ . Якорь движется со скоростью  $v_a$ , получает смещение  $\zeta_a$  и через опорную плиту производит ударное воздействие на грунт. Инерционный реактор со скоростью  $v_r$  отскакивает вверх, производя свое смещение  $\zeta_r$ . Для электромагнитного взаимодействия реактора и якоря важно их взаимное смещение

$$\zeta = \zeta_r + \zeta_a + \zeta_o,$$

где  $\zeta_o$  – начальное смещение реактора из положения "нейтрали" [4], в котором зубцы расположены против пазов. В исходной позиции  $\zeta_a$  и  $\zeta_r$  равны нулю.

Кроме силы  $F_{em}$  в ЛИЭД достаточно учитывать силу реакции грунта  $F_{gr}$ , силы инерции реактора и якоря  $F_{mr} = m_r a_r$ ,  $F_{ma} = m_a a_a$ , их весовые силы  $P_r = m_r g_{gr}$ ,  $P_a = m_a g_{gr}$ , где  $m_r$ ,  $m_a$ ,  $a_r$ ,  $a_a$  – массы и ускорения движения;  $g_{gr} = 9,81 \text{ м/с}^2$ .

ЛИЭД со всей системой управления и электрооборудования является мобильной установкой и располагается, например, в кузове автомобиля КРАЗ-255. Источником электропитания его обмоток являются конденсаторные накопители энергии, заряжаемые от сравнительно малоомощного синхронного генератора через выпрямитель.

Обмотки реактора и якоря имеют достаточно близкие размерные параметры. В такой ситуации их можно включать различными способами: последовательно, независимо или параллельно, причем каждый из них имеет свои преимущества и недостатки с точки зрения обслуживающего оборудования и эксплуатации. Что же касается рабочих параметров рабочего ударного режима ЛИЭД, то они тоже могут выявиться разными, так как сопротивления и индуктивности обмоток несколько отличаются из-за разных диаметров реактора и якоря.

Целью данной работы является проведение сравнительного анализа эффективности работы ЛИЭД как источника сейсмических колебаний при различных схемах включения обмоток реактора и якоря. При этом общий состав и энергетические параметры емко-

стного накопителя энергии во всех вариантах сохраняются, а подводящие кабели выбираются из условия сохранения плотности тока.

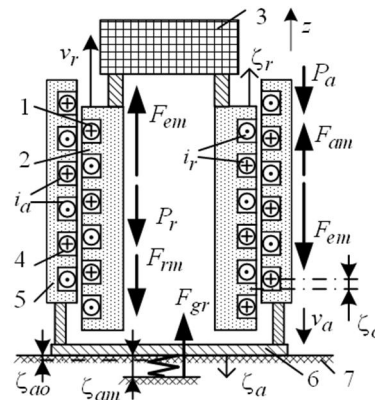


Рис. 1. Схема активной силовой части ЛИЭД: 1, 2, 3 – обмотка, сердечник и инерционная масса реактора; 4, 5, 6 – обмотка, сердечник и опорная плита якоря; 7 – грунт

### Математические модели ЛИЭД при разных схемах включения обмоток.

В качестве исходной принимается **схема последовательного соединения обмоток**, представленная на рис. 2. Причем эта схема может иметь два варианта: с разрядным диодом  $VD$  и без него.

Обмотки реактора и якоря представлены сопротивлениями  $R_r$  и  $R_a$ , индуктивностями  $L_r$  и  $L_a$ , коэффициентом взаимной индуктивности  $M_{ra}$  учитывается их магнитная связь. Здесь и далее индуктивные параметры рассматриваются как дифференциальные и являются сложными нелинейными функциями ввиду сильного насыщения ферромагнитных сердечников и взаимного смещения реактора и якоря. Представлены также сопротивление  $R_c$  и индуктивность  $L_c$  подводящего кабеля. Все сопротивления тоже являются нелинейными, так как изменяются с нагревом обмоток.

Конденсаторный накопитель энергии имеет емкость  $C_E$  и начальное значение  $U_{Co}$  изменяющегося напряжения  $u_C$ .

Сначала рассмотрим вариант при отсутствии разрядного диода (обозначим схему через  $S1$ ). Тогда для электрической цепи последовательно соединенных обмоток (рис. 2) имеем уравнение электрического равновесия [2]:

$$\frac{d\Psi}{dt} + u_R + L_c \frac{di_s}{dt} = u_C, \quad (1)$$

где  $u_R = (R_r + R_a + R_c)i_s$ ;  $u_C = U_{C0} - \frac{1}{C_E} \int_0^t i_s dt$ ;  $t$  – время.

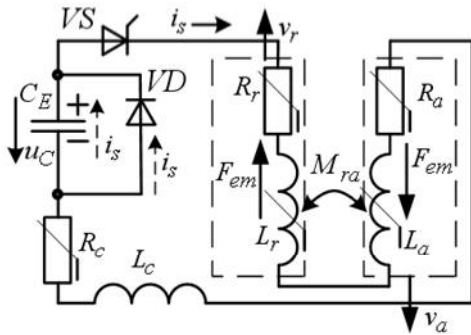


Рис. 2. Электрическая схема замещения ЛИЭД с последовательным соединением обмоток

Результирующее магнитное потокоцепление (МПС)  $\Psi(\zeta, i_s)$  складывается из собственных и взаимных МПС обмоток реактора и якоря и является двухпараметрической функцией. Поэтому производная в (1) преобразуется к виду

$$\frac{d\Psi}{dt} = \frac{\partial\Psi}{\partial\zeta} \frac{d\zeta}{dt} + \frac{\partial\Psi}{\partial i_s} \frac{di_s}{dt} = e_v + e_L,$$

где выделены ЭДС движения и ЭДС самоиндукции

$$e_v = \frac{\partial\Psi}{\partial\zeta} \cdot \frac{d\zeta}{dt} = L_\zeta v_{ra}, \quad e_L = L_{ar} \cdot \frac{di_s}{dt}, \quad (2)$$

определяемые с учетом скорости  $v_{ra} = d\zeta/dt$  относительного перемещения реактора и якоря ( $v_{ra} = v_r + v_a$ ), условно названной индуктивности движения  $L_\zeta = d\Psi/d\zeta$  и дифференциальной индуктивности  $L_{ar} = \partial\Psi/\partial i_s$ , поглотившей  $L_r, L_a$  и  $M_{ra}$ .

При численном решении из уравнения (1) выделяется временная производная тока

$$i_s' = \frac{di_s}{dt} = \frac{u_C - u_R - e_v}{L_{ar} + L_c}. \quad (3)$$

При наличии разрядного диода VD (рис. 2) (обозначим схему через S2) по достижению напряжения  $u_C = 0$  ток обходит конденсатор через этот диод и в уравнениях (1) и (3) выбывает  $u_C$ .

Электрическая схема замещения ЛИЭД при независимом питании обмоток (обозначим схему через S3) представлена на рис. 3, где по обмоткам реактора и якоря проходят собственные токи  $i_r$  и  $i_a$ , а добавки  $r$  и  $a$  в индексных обозначениях параметров, аналогичных представленным на рис. 2, соответствующим цепям питания реактора и якоря.

Электромагнитные процессы в рабочем режиме ЛИЭД в соответствии с его электрической схемой замещения (рис. 3) описываются уравнениями [3]

$$\frac{d\Psi_r}{dt} + u_{Rr} + L_{cr} \frac{di_r}{dt} = u_{Cr}; \quad (4)$$

$$\frac{d\Psi_a}{dt} + u_{Ra} + L_{ca} \frac{di_a}{dt} = u_{Ca}, \quad (5)$$

где  $\Psi_r, \Psi_a$  – МПС обмоток реактора и якоря, включая их собственные и взаимные МПС;

$$u_{Cr} = U_{Cro} - \frac{1}{C_{Er}} \int_0^t i_r dt; \quad u_{Ca} = U_{Ca0} - \frac{1}{C_{Ea}} \int_0^t i_a dt$$

– напряжения конденсаторов;  $u_{Rr} = i_r(R_r + R_{cr})$ ,  $u_{Ra} = i_a(R_a + R_{ca})$  – падения напряжения.

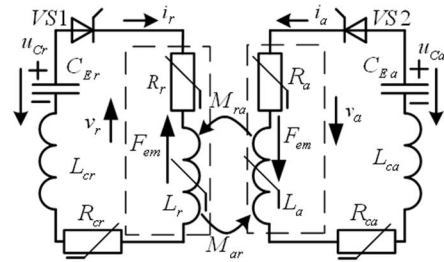


Рис. 3. Электрическая схема замещения ЛИЭД с независимым соединением обмоток

По сравнению с аналогом (1), математическая модель ЛИЭД многократно усложняется, так как теперь нелинейные функции МПС  $\Psi_r(\zeta, i_r, i_a)$  и  $\Psi_a(\zeta, i_r, i_a)$  являются трехпараметрическими. Поэтому производные МПС преобразуется к виду

$$\frac{d\Psi_r}{dt} = \frac{\partial\Psi_r}{\partial\zeta} \cdot \frac{d\zeta}{dt} + \frac{\partial\Psi_r}{\partial i_r} \cdot \frac{di_r}{dt} + \frac{\partial\Psi_r}{\partial i_a} \cdot \frac{di_a}{dt};$$

$$\frac{d\Psi_a}{dt} = \frac{\partial\Psi_a}{\partial\zeta} \cdot \frac{d\zeta}{dt} + \frac{\partial\Psi_a}{\partial i_r} \cdot \frac{di_r}{dt} + \frac{\partial\Psi_a}{\partial i_a} \cdot \frac{di_a}{dt},$$

где выделяются дифференциальные собственные и взаимные индуктивности обмоток  $L_r = \partial\Psi_r/\partial i_r$ ;  $L_a = \partial\Psi_a/\partial i_a$ ;  $M_{ra} = \partial\Psi_r/\partial i_a$ ;  $M_{ar} = \partial\Psi_a/\partial i_r$ , а также коэффициенты, уже названные условно индуктивностями движения  $L_{r\zeta} = \partial\Psi_r/\partial\zeta$ ;  $L_{a\zeta} = \partial\Psi_a/\partial\zeta$ , с учетом чего ЭДС движения, аналогично (2),

$$e_{vr} = L_{r\zeta} v_{ra}; \quad e_{va} = L_{a\zeta} v_{ra}. \quad (6)$$

Обозначим как  $i_r' = di_r/dt$ ,  $i_a' = di_a/dt$  производные токов и уравнения (4), (5) представим в виде

$$(L_r + L_{cr}) \cdot i_r' + M_{ra} \cdot i_a' = u_{Cr} - u_{Rr} - e_{vr}; \quad (7)$$

$$M_{ar} \cdot i_r' + (L_a + L_{ca}) \cdot i_a' = u_{Ca} - u_{Ra} - e_{va}. \quad (8)$$

При численном решении отсюда выражается пара производных токов:

$$i_r' = \frac{\Delta_r}{\Delta_{ar}}; \quad i_a' = \frac{\Delta_a}{\Delta_{ar}}, \quad (9)$$

где общий и частные определители имеют вид

$$\Delta_{ar} = (L_r + L_{cr}) \cdot (L_a + L_{ca}) - M_{ra} \cdot M_{ar};$$

$$\Delta_r = (u_{Cr} - u_{Rr} - e_{vr})(L_a + L_{ca}) -$$

$$-(u_{Ca} - u_{Ra} - e_{va})M_{ra};$$

$$\Delta_a = (u_{Ca} - u_{Ra} - e_{va})(L_r + L_{cr}) -$$

$$-(u_{Cr} - u_{Rr} - e_{vr})M_{ar}.$$

Электрическая схема замещения ЛИЭД при параллельном питании обмоток представлена на рис. 4, где обозначения параметров соответствуют представленным на рис. 2 и рис. 3.

С учетом того, что через источник проходит суммарный ток  $i_s = i_r + i_a$ , электромагнитные процессы в рабочем режиме ЛИЭД в соответствии с его электрической схемой замещения (рис. 4) описываются уравнениями

$$\frac{\partial \Psi_r}{\partial t} + L_c \frac{d(i_r + i_a)}{dt} + i_r R_r + (i_r + i_a) R_c = u_C; \quad (10)$$

$$\frac{\partial \Psi_a}{\partial t} + L_c \frac{d(i_r + i_a)}{dt} + i_a R_a + (i_r + i_a) R_c = u_C, \quad (11)$$

где  $u_C = U_{Co} - \frac{1}{C_E} \int_0^t (i_r + i_a) dt$  – общее напряжение на конденсаторе.

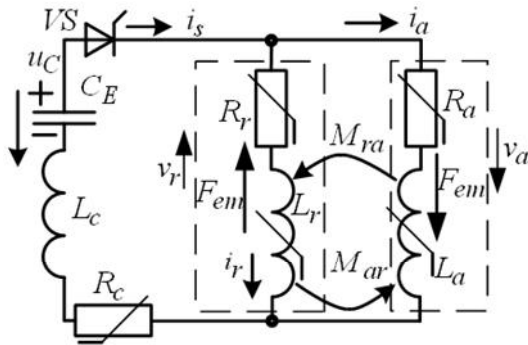


Рис. 4. Электрическая схема замещения ЛИЭД с параллельным соединением обмоток

Здесь нелинейные функции МПС  $\Psi_r(\zeta, i_r, i_a)$  и  $\Psi_a(\zeta, i_r, i_a)$  являются опять трехпараметрическими, как и в случае независимого соединения обмоток. Поэтому, с учетом уже представленных величин, а также введя обозначения  $u_{Rc} = (i_r + i_a)R_c$ ;  $u_{Rr} = i_r R_r + u_{Rc}$ ;  $u_{Ra} = i_a R_a + u_{Rc}$ , уравнения (10), (11) представляются в виде

$$(L_r + L_c) \dot{i}_r + (M_{ra} + L_c) \dot{i}_a = u_C - u_{Rr} - e_{vr}; \quad (12)$$

$$(M_{ar} + L_c) \dot{i}_r + (L_a + L_c) \dot{i}_a = u_C - u_{Ra} - e_{va}, \quad (13)$$

и разрешаются в форме (9), где определители теперь имеют модификацию

$$\Delta_{ar} = \begin{vmatrix} L_r + L_c & M_{ra} + L_c \\ M_{ar} + L_c & L_a + L_c \end{vmatrix};$$

$$\Delta_r = \begin{vmatrix} u_C - u_{Rr} - e_{vr} & M_{ra} + L_c \\ u_C - u_{Ra} - e_{va} & L_a + L_c \end{vmatrix};$$

$$\Delta_a = \begin{vmatrix} L_r + L_c & u_C - u_{Rr} - e_{vr} \\ M_{ar} + L_c & u_C - u_{Ra} - e_{va} \end{vmatrix}.$$

Во всех рассматриваемых случаях уравнения электрического равновесия (1), (4) и (5), (10) и (11) дополняются одинаковыми уравнениями баланса сил в механической системе ЛИЭД (рис. 1):

$$F_{em} = P_r + F_{mr}; \quad F_{em} = F_{ma} + F_{gr} - P_a. \quad (14)$$

Здесь для силы реакции грунта использовалась одна из введенных в [4] и принятая в [2, 3] гипотетическая ее зависимость от осевого смещения якоря  $F_{gr}(\zeta_a)$ .

Тепловой процесс в обмотках и кабелях в течение кратковременного рабочего импульса считается адиабатическим и описывается уравнениями, аналогично изложенному в [2].

Необходимые для решения системы представленных уравнений двухпараметрическая  $\Psi(\zeta, i_s)$  и трехпараметрические  $\Psi_r(\zeta, i_r, i_a)$ ,  $\Psi_a(\zeta, i_r, i_a)$  функции МПС были подготовлены, как и в [2, 3, 5], численно-полевыми

расчетами по программе FEMM [6] при весьма значительном количестве сочетаний аргументов. Принципы оперирования с этими функциями с целью получения дифференциальных индуктивных параметров были представлены в [3, 5]. Аналогичные функции силы  $F_{em}(\zeta, i_s)$  и  $F_{em}(\zeta, i_r, i_a)$  также были подготовлены посредством численных расчетов магнитных полей [2, 3, 7].

Соответственно представленным математическим моделям расчеты импульсного рабочего режима ЛИЭД проводятся на ЭВМ, при этом численное определение производных токов (3), (9) проводится на основе метода Рунге-Кутты IV порядка.

#### Расчетный вариант ЛИЭД.

Конструктивные параметры ЛИЭД соответствуют показанному в [1-4, 7], т.е. длина сердечников реактора и якоря – 533 мм; зазор между ними – 2 мм; диаметр по зазору – 416 мм;  $m_r = 1500$  кг,  $m_a = 750$  кг; массы меди обмоток реактора и якоря 50 и 58 кг; масса меди одиночного кабеля (рис. 2) 5,5 кг; общая высота ЛИЭД – около 2,6 м.

При температуре обмоток 140 °С, устанавливающейся после продолжительной работы, когда рабочие импульсы повторяются с периодом  $T_{imp} = 6$  с, а также с приближенным учетом скин-эффекта, приняты их сопротивления  $R_r = 6,59$  мОм и  $R_a = 6,88$  мОм.

Температура кабелей принята равной 75 °С и соответственно в вариантах на рис. 2 и рис. 3 сопротивления были одинаковыми для каждого из кабелей, т.е.  $R_c = R_{cr} = R_{ca} = 1,1$  мОм, что, в принципе, соизмеримо с сопротивлениями обмоток. В варианте с параллельным соединением (рис. 4) по кабелю проходит суммарный ток обмоток, поэтому его сечение и масса увеличиваются в два раза, а сопротивление уменьшается в такой же пропорции до  $R_c = 0,55$  мОм.

Индуктивность двухпроводных кабелей во всех вариантах принята одинаковой и определялась по классической методике:  $L_c = L_{cr} = L_{ca} = 2,5$  мкГн. Эта величина, в отличие от сопротивлений, была менее влиятельной, так как она более чем на порядок меньше дифференциальных индуктивных параметров обмоток.

В основу расчетов положены две конденсаторные батареи, каждая емкостью  $C_b = 0,17$  Ф с исходным напряжением заряда  $U_o = 590$  В. Во всех случаях запасаемая энергия конденсаторов  $W_{elo}$  была одинаковой, но в случае на рис. 2 батареи соединялись последовательно и тогда  $U_{Co} = 1180$  В,  $C_E = 0,085$  Ф; при независимом питании обмоток каждая питается от одной батареи, поэтому  $U_{Cro} = U_{Cao} = 590$  В,  $C_{Er} = C_{Ea} = 0,17$  Ф. При параллельном включении обмоток аналогично включались две батареи конденсаторов и тогда  $U_{Co} = 590$  В,  $C_E = 0,34$  Ф.

В остальном, сочетание заданных величин для всех вариантов схем соединений обмоток приняты одинаковыми.

#### Расчетный анализ рабочего режима ЛИЭД при разных схемах питания его обмоток.

Результаты расчетов для четырех вариантов схем представлены на рис. 5-8 временными функциями избранных величин. Значения функций даны в относительных единицах (о.е.), но для числовой оценки назовем их масштабы, т.е. значения на 1 о.е.: токи – 5 А, силы – 400 кН, напряжения – 400 В, скорость – 1 м/с.

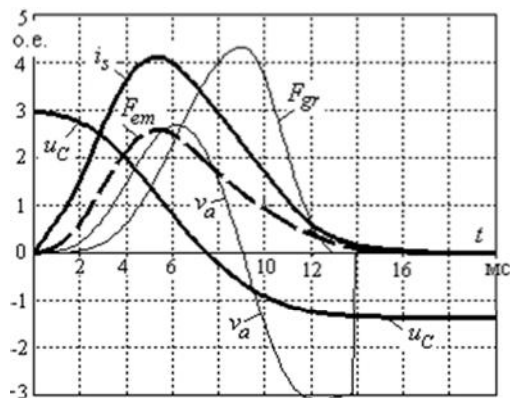


Рис. 5. Временные функции величин при последовательном питании обмоток без диода

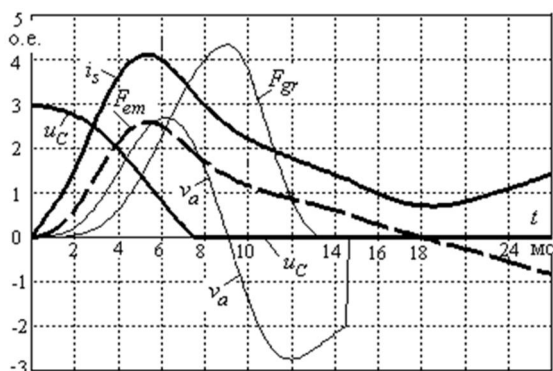


Рис. 6. Временные функции величин при последовательном питании обмоток с диодом

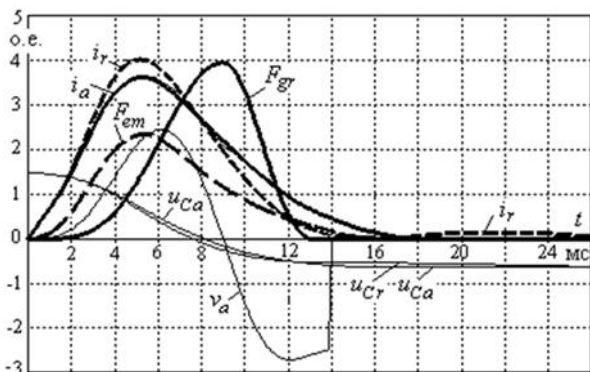


Рис. 7. Временные функции величин при независимом питании обмоток

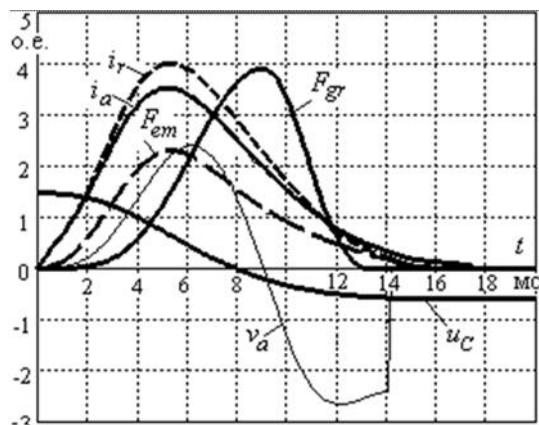


Рис. 8. Временные функции величин при параллельном питании обмоток

Отметим, что полезную ударную работу ЛИЭД производит пока якорь еще идет в грунт, т.е. скорость  $v_a > 0$ . Затем, при  $v_a < 0$ , происходит его отскок вверх до упора со сбросом скорости до нуля.

В табл. 1-2 представлены наиболее существенные рабочие параметрами ЛИЭД, а именно: максимумы токов  $i_r$  и  $i_a - I_{rmax}$  и  $I_{amax}$ ; максимумы сил электромагнитной  $F_{em} - F_{emmax}$  и реакции грунта  $F_{gr} - F_{grmax}$ , длительности импульсов этих сил  $t_{ime}$  и  $t_{img}$ , принцип определения которых дан в [2].

Важным функциональным параметром ЛИЭД, наряду с  $F_{emmax}$ ,  $F_{grmax}$ ,  $t_{ime}$  и  $t_{img}$ , и даже главным, считают импульс силы  $F_{em}$  [1-4]

$$S_{em} = \int_0^{t_{ime}} F_{em}(t) \cdot dt \quad (15)$$

Но более объективную оценку дает введенный нами [2-4] импульс силового воздействия непосредственно на грунт

$$S_{gr} = \int_0^{t_{img+}} F_{gr} dt \quad (16)$$

где  $t_{img+}$  – время действия силы  $F_{gr}$  до того момента, пока якорь еще движется в грунт (т.е. на рис. 5-8 пока еще  $v_a > 0$ ).

Таблица 1

Электрические параметры ЛИЭД

Схема	$I_{rmax}$ , кА	$I_{amax}$ , кА	$U_{rel}$ , В	$\eta_{elmec}$
S1	20,5	20,5	550	0,214
S2	20,5	20,5	0	0,168
S3	20,0	18,0	244	0,170
S4	20,0	17,6	236	0,163

Таблица 2

Механические параметры ЛИЭД

Схема	$F_{emmax}$ , кН	$t_{ime}$ , мс	$S_{em}$ , Н·с	$F_{grmax}$ , кН	$t_{img}$ , мс	$S_{gr}$ , Н·с
S1	1032	12,6	6688	1724	9,4	5621
S2	1032	16,5	7929	1727	9,7	5661
S3	935	13,5	6264	1576	9,4	5084
S4	919	13,7	6289	1558	9,5	5112

Работа ЛИЭД также оценивается условным КПД  $\eta_{elmec} = W_{gr}/W_{el}$  [2-4], где механическая энергия де-

формации грунта –  $W_{gr} = \int_0^{t_{img+}} F_{gr} v_a dt$ ; отданная конденсаторами электрическая энергия

$$W_{el} = 0,5[C_{Er}(U_{Cro}^2 - U_{Crel}^2) + C_{Ea}(U_{Cao}^2 - U_{Carel}^2)],$$

где  $U_{Crel}$ ,  $U_{Carel}$  – остаточные их напряжения.

Проведем сравнительную оценку рассмотренных вариантов схем S1-S4.

Варианты S1 и S2 с точки зрения воздействия на грунт (по импульсу  $S_{gr}$ ) практически равноценны, но оба они эффективней по сравнению вариантами S3 и S4, в которых из-за имеющегося рассогласования токов обмоток силовое взаимодействие якоря и реактора несколько ослаблено. Но, с точки зрения эксплуатации, последние два варианта безусловно выигрывают по уровню используемого напряжения, хотя и требуют удвоенного расхода подводящего кабеля. Некоторое

различие параметров этих вариантов вызвано текущим различием напряжений конденсаторов.

Отличие варианта S2 заключается в затягивании импульса тока после завершения ударного воздействия на грунт. Этот ток поддерживается сначала за счет ЭДС самоиндукции, а затем за счет самовозбуждения обмоток посредством ЭДС движения.

В вариантах S1, S3 и S4 конденсаторы перезаряжаются и остаточное напряжение способствует ускоренному завершению импульсов, а остаточная энергия, в принципе, может использоваться в следующих импульсах. Интересно, что в варианте S3 возникает повторный незначительный импульс тока реактора за счет более поздно гасящегося импульса якоря, а потому он поддерживается за счет ЭДС движения.

За один рабочий импульс нагрев обмоток оказывается менее 1°C, несмотря на значительный максимум плотности тока – порядка 130 А/мм<sup>2</sup>. Но при многократном повторении импульсов с указанным периодом  $T_{imp}$  нагревы становятся критичными. В этом отношении худшим является вариант S2, в котором из-за бесполезной затяжки импульса тока нагрев обмоток оказывается наибольшим.

**Выводы.** Представленные математические модели рабочего режима ЛИЭД при разных схемах включения обмоток позволяют объективно оценивать процесс ударного импульса, а также параметры его эффективности как источника сейсмических колебаний.

Численные расчеты в соответствии с этими моделями позволили выявить, что рассмотренные варианты схемы питания обмоток в целом равноценны и дают различия в эффективности ЛИЭД до 10 %, но при этом также выявлены характерные особенности каждого из вариантов.

С учетом всех факторов для практической реализации избрана схема с независимым питанием обмоток реактора и якоря. В расчетном отношении этот вариант является наиболее трудоемким. Но на предварительных этапах расчетного исследования ЛИЭД может использоваться схема с последовательным соединением обмоток (временные затраты уменьшаются более чем на порядок), а итоговые расчеты уже следует проводить на конкретно избранной схеме независимого включения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бару Ю.А., Мельник А.К., Ткаченко С.В., Милых В.И. Выбор типа и основных параметров линейного импульсного электродвигателя для невзрывных сейсмоисточников // *Электротехника і електромеханіка*. – 2008. – № 3. – С. 41-44.
2. Милых В.И., Ткаченко С.В. Алгоритмизована математическая модель линейного импульсного электродвигателя как ударного источника слабых сейсмических колебаний // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2011. – № 1. – С. 33-38.
3. Милых В.И., Ткаченко С.В. Математическая модель и анализ импульсного режима работы линейного электродвигателя при независимом питании его обмоток // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2011. – № 2. – С. 31-36.

4. Милых В.И., Ткаченко С.В. Аналіз впливу механічних параметрів лінійного електродвигуна на ефективність його роботи як джерела сейсмічних коливань // *Електроінформ*, Львів: ЕКОінформ. – 2010. – № 4. – С. 10-12.

5. Милых В.И., Ткаченко С.В. Математическое обеспечение численного анализа импульсного возбуждения линейного электродвигателя с двухпараметрической функцией магнитного потокоцепления // *Вісник Кременчуцького державного університету ім. М. Остроградського*. – Кременчук: КДУ. – 2010. – Вип. 3/2010(62). Ч. 2. – С. 70-73.

6. Meeker D. Finite Element Method Magnetics. Version 4.2. User's Manual, Sept. 26, 2006 // <http://femm.berlios.de>, 2005.

7. Милых В.И., Ткаченко С.В. Силовые взаимодействия в линейном электродвигателе для источников сейсмических колебаний // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2008. – № 6. – С. 36-39.

**Bibliography (transliterated):** 1. Baru Yu.A., Mel'nik A.K., Tkachenko S.V., Milyh V.I. Vybora tipa i osnovnykh parametrov linejnogo impul'snogo `elektrodvigatelya dlya nevzryvnykh sejsmoistochnikov // *Elektrotehnika i elektromehaniika*. - 2008. - № 3. - S. 41-44. 2. Milyh V.I., Tkachenko S.V. Algoritmizirovannaya matematicheskaya model' linejnogo impul'snogo `elektrodvigatelya kak udarnogo istochnika slabyyh sejsmicheskikh kolebanij // *Elektrotehnika i elektromehaniika*. - 2011. - № 1. - S. 33-38. 3. Milyh V.I., Tkachenko S.V. Matematicheskaya model' i analiz impul'snogo rezhima raboty linejnogo `elektrodvigatelya pri nezavisimom pitanii ego obmotok // *Elektrotehnika i elektromehaniika*. - 2011. - № 2. - S. 31-36. 4. Milyh V.I., Tkachenko S.V. Analiz vplivu mehanichnykh parametrov linijnogo elektrodviguna na effektivnist' jogo roboti yak dzhherela sejsmichnykh kolivan' // *Elektroinform*, L'viv: EKOinform. - 2010. - № 4. - S. 10-12. 5. Milyh V.I., Tkachenko S.V. Matematicheskoe obespechenie chislennogo analiza impul'snogo vzbuzhdeniya linejnogo `elektrodvigatelya s dvuhparametricheskoj funkciej magnitnogo potokoscepleniya // *Visnik Kremenchuc'kogo derzhavnogo universitetu im. M. Ostrogradskogo*. - Kremenchuk: KDU. - 2010. - Vip. 3/2010(62). Ch. 2. - S. 70-73. 6. Meeker D. Finite Element Method Magnetics. Version 4.2. User's Manual, Sept. 26, 2006 // <http://femm.berlios.de>, 2005. 7. Milyh V.I., Tkachenko S.V. Silovye vzaimodejstviya v linejnom `elektrodvigateli dlya istochnikov sejsmicheskikh kolebanij // *Elektrotehnika i elektromehaniika*. - 2008. - № 6. - S. 36-39.

Поступила 14.04.2011

*Милых Владимир Иванович, д.т.н., проф.*

*Ткаченко Сергей Валериевич*

Национальный технический университет

"Харьковский политехнический институт"

кафедра "Электрические машины"

61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21

тел. (057) 707-65-14; e-mail: mvikpi@kpi.kharkov.ua

*Milykh V.I., Tkachenko S.V.*

#### **Comparative analysis of winding connection diagrams of a linear pulse electric motor.**

Variants of reactor and armature windings connection diagrams for a linear electric motor of percussion action on ground under exploration are considered. The connection diagrams are compared by means of the motor pulsed operation computation on the basis of formulated mathematical models. Their feature is nonlinear two- and three-parameter functions of the windings differential inductive parameters and electromagnetic force of the reactor and the armature interaction.

**Key words – linear electric motor, windings, pulsed operation, mathematical models, calculation and analysis.**