

УДК 621.313

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА РОЗРАХУНКОВО-ТЕОРЕТИЧНОЇ МОДЕЛІ РОБОЧОГО РЕЖИМУ ЛІНІЙНОГО ІМПУЛЬСНОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА

В. І. Мілїх

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків
вул. Фрунзе, 21, м. Харків, Україна. E-mail: mvikpi@kpi.kharkov.ua

Ю. А. Бару, А. К. Мельник, С. В. Ткаченко

Відкрите акціонерне товариство завод «Потенціал», м. Харків
вул. Індустріальна, 17, м. Харків, Україна. E-mail: potencial@potencial.kharkov.com

Сформульована математична модель лінійного електродвигуна для сейсмозв'язки, яка відповідає режиму ударного силового імпульсу. Її особливість – нелінійні трипараметричні функції диференціальних індуктивних параметрів обмоток, а також електромагнітної сили взаємодії реактора і якоря. Виконано розрахунок робочого режиму і результати зіставлені з експериментальними даними.

Ключові слова: лінійний електродвигун, математична модель, розрахунок, експериментальні дані.

EXPERIMENTAL VERIFICATION OF CALCULATION-THEORETICAL MODELS OF OPERATING CONDITION OF LINEAR IMPULSIVE ELECTRIC MOTOR

V. Milykh

National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», Kharkiv
vul. Frunze, 21, Kharkov, Ukraine. E-mail: mvikpi@kpi.kharkov.ua

Ju. Baru, A. Melnik, S. Tkachenko

Open Corporation Work «Potential», Kharkiv
vul. Industrialna, 17, Kharkov, Ukraine. E-mail: potencial@potencial.kharkov.com

Formulated a mathematical model of linear motor for seismic exploration, which corresponds to the regime of shock schaya power pulse. Her feature – the three-parameter nonlinear function of differential inductive winding parameters and the electromagnetic force interaction between the reactor and the anchor. The calculation of operating conditions and results are compared with experimental data.

Key words: linear electric motor, mathematical model, calculation, experimental information.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАБОЧЕГО РЕЖИМА ЛИНЕЙНОГО ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

В. И. Милых

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков
ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина. E-mail: mvikpi@kpi.kharkov.ua

Ю. А. Бару, А. К. Мельник, С. В. Ткаченко

Открытое акционерное общество завод «Потенциал», г. Харьков
ул. Индустриальная, 17, г. Харьков, Украина. E-mail: potencial@potencial.kharkov.com

Сформулирована математическая модель линейного электродвигателя для сейсмозв'язки, соответствующая режиму ударного силового импульса. Ее особенность – нелинейные трехпараметрические функций дифференциальных индуктивных параметров обмоток и электромагнитной силы взаимодействия реактора и якоря. Проведен расчет рабочего режима и результаты сопоставлены с экспериментальными данными.

Ключевые слова: линейный электродвигатель, математическая модель, расчет, экспериментальные данные.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Линейный импульсный электродвигатель (ЛИЭД) рассматриваемого типа [1] предназначен для сейсмозв'язки полезных ископаемых. ЛИЭД, имеет цилиндрическую структуру, и его упрощенная схема показана на рис. 1, а подробнее он представлен в [1–3].

При подаче импульсов токов i_r и i_a в обмотки взаимодействия реактора и якоря порождает электромагнитную силу F_{em} [2]. Якорь движется со скоростью v_a и через опорную плиту ударяет в грунт, а инерционный реактор со скоростью v_r отскакивает вверх. Грунт может деформироваться на глубину ζ_{am} (порядка 5..15 мм в зависимости от свойств и состояния грунта), а после обратного отскока якоря под воздействием упругой реакции грунта возможна остаточная деформация на ζ_{ao} .

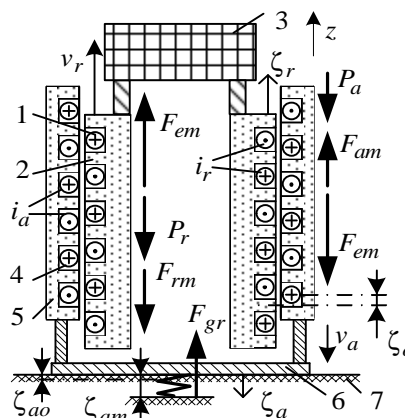


Рисунок 1 – Схема активной силовой части ЛИЭД: 1, 2, 3 – обмотка, сердечник и инерционная масса реактора; 4, 5, 6 – обмотка, сердечник и опорная плита якоря; 7 – грунт

Математическая модель и расчетный анализ ударного режима работы ЛИЭД были представлены в [3], где рассматривался вариант его питания от одного источника – емкостного накопителя электрической энергии при последовательном соединении обмоток реактора и якоря, а также в [1], где обмотки питались от аналогичных источников, но уже независимо.

Последний вариант был принят и в созданном на заводе «Потенциал» экспериментальном образце ЛИЭД, поэтому именно этот вариант и рассматривается в данной работе. При независимом питании обмоток уровень напряжения уменьшается в два раза и, тем самым, повышается электробезопасность в условиях эксплуатации.

Целью данной работы является представление расчетно-экспериментальных исследований ЛИЭД с независимым питанием обмоток с учетом совокупности электромагнитных, механических и тепловых процессов. Для адекватного восприятия этих исследований также кратко представляется математическая модель импульсного рабочего режима ЛИЭД, разработанная и изложенная ранее в [1, 3].

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Математическая модель ЛИЭД. Электрическая схема замещения ЛИЭД при независимом питании обмоток дана на рис.2, где индексы *r* и *a* в обозначениях соответствуют реактору и якорю.

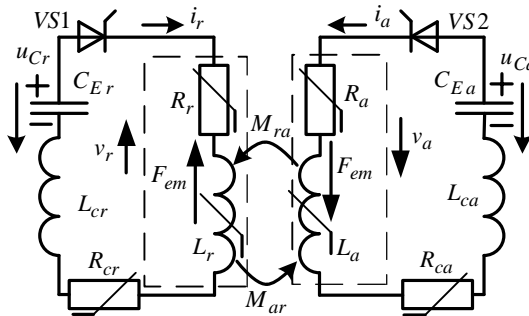


Рисунок 2 – Электрическая схема замещения ЛИЭД

Обмотки реактора и якоря представлены сопротивлениями R_r и R_a , индуктивностями L_r и L_a , а также через коэффициенты взаимной индуктивности M_{ra} и M_{ar} учитывается их магнитная связь. Индуктивные параметры рассматриваются как дифференциальные и являются сложными нелинейными трехпараметрическими функциями, т.к. ввиду движения и наличия сильнонасыщенных ферромагнитных сердечников зависят от токов i_r и i_a , а также от взаимного смещения ζ реактора и якоря. Это смещение $\zeta = \zeta_r + \zeta_a + \zeta_o$ складывается из их индивидуальных смещений, а также имеется начальный сдвиг реактора ζ_o против его дальнейшего движения из положения «геометрической нейтрали», что рассматривалось в [1–3].

В схеме на рис.2 учтены еще сопротивления R_{cr} , R_{ca} и индуктивности L_{cr} , L_{ca} подводящих кабелей. Все сопротивления являются нелинейными, так как

зависят от температур обмоток.

Конденсаторные накопители энергии имеют емкости C_{Er} , C_{Ea} и заряжаются до начальных значений напряжений U_{Cro} и U_{Cao} . Естественно, что в процессе работы ЛИЭД конденсаторы разряжаются и их напряжения u_{Cr} и u_{Ca} изменяются.

Электромагнитные процессы в рабочем режиме ЛИЭД в соответствии с его электрической схемой замещения (рис. 2) описываются уравнениями

$$\frac{d\Psi_r}{dt} + L_{cr} \frac{di_r}{dt} + \frac{1}{C_{Er}} \int i_r dt = U_{Cro} - u_{Rr}; \quad (1)$$

$$\frac{d\Psi_a}{dt} + L_{ca} \frac{di_a}{dt} + \frac{1}{C_{Ea}} \int i_a dt = U_{Cao} - u_{Ra} \quad (2)$$

где Ψ_r , Ψ_a – магнитные потокоцепления (МПС) обмоток реактора и якоря, складывающиеся из собственных и взаимных МПС; $u_{Rr} = i_r(R_r + R_{cr})$, $u_{Ra} = i_a(R_a + R_{ca})$ – падения напряжения.

С учетом трехпараметрических зависимостей МПС их производные преобразуется к виду

$$\frac{d\Psi_r}{dt} = \frac{\partial \Psi_r}{\partial \zeta} \cdot \frac{d\zeta}{dt} + \frac{\partial \Psi_r}{\partial i_r} \cdot \frac{di_r}{dt} + \frac{\partial \Psi_r}{\partial i_a} \cdot \frac{di_a}{dt}; \quad (3)$$

$$\frac{d\Psi_a}{dt} = \frac{\partial \Psi_a}{\partial \zeta} \cdot \frac{d\zeta}{dt} + \frac{\partial \Psi_a}{\partial i_a} \cdot \frac{di_a}{dt} + \frac{\partial \Psi_a}{\partial i_r} \cdot \frac{di_r}{dt} \quad (4)$$

где выделяем $L_r = \frac{\partial \Psi_r}{\partial i_r}$; $L_a = \frac{\partial \Psi_a}{\partial i_a}$; $M_{ra} = \frac{\partial \Psi_r}{\partial i_a}$;

$M_{ar} = \frac{\partial \Psi_a}{\partial i_r}$ – дифференциальные собственные и

взаимные индуктивности; $L_{r\zeta} = \frac{\partial \Psi_r}{\partial \zeta}$; $L_{a\zeta} = \frac{\partial \Psi_a}{\partial \zeta}$ – условные индуктивности движения [1, 3].

Баланс сил в механической системе ЛИЭД (рис.1) описывается раздельно для реактора и якоря

$$F_{em} = P_r + F_{mr}; \quad F_{em} = F_{ma} + F_{gr} - P_a, \quad (5)$$

где, кроме движущей силы F_{em} , представлены силы инерции реактора и якоря $F_{mr} = m_r a_r$, $F_{ma} = m_a a_a$ и 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 ускорение движения реактора и якоря; g_{gr} – гравитационная постоянная; F_{gr} – сила реакции грунта.

Сила реакции грунта является основной противодействующей силой при прямом ходе якоря (в грунт), и становится движущей при обратном ходе. Для этой силы была принята введенная и апробированная в [1, 3] гипотетическая зависимость от осевого смещения якоря $F_{gr}(\zeta_a)$, имеющая различный характер при его прямом и обратном ходах.

Движущая сила, как и МПС, является нелинейной трехпараметрической функцией $F_{em}(\zeta, i_r, i_a)$.

Необходимые для решения системы уравнений (1), (2), (5) трехпараметрические функции МПС

$\Psi_r(\zeta, i_r, i_a)$, $\Psi_a(\zeta, i_r, i_a)$ и силы $F_{em}(\zeta, i_r, i_a)$ были подготовлены, как и в [1], численно-полевыми расчетами по программе FEMM. Это и последующее оперирование с частными производными МПС в (3), (4), оказалось наиболее сложной частью расчета переходного процесса – импульсного рабочего режима ЛИЭД. Принципы преодоления этой проблемы показаны в [1, 3].

Тепловой процесс в обмотках и подводящих кабелях при кратковременном рабочем импульсе ЛИЭД считается адиабатическим и описывается аналогично тому, что изложено в [3].

Расчет и его сравнение с экспериментальными данными. Параметры ЛИЭД в общем представлялись в [1–3]: $U_{Cro} = U_{Cao} = 600$ В; зазор между сердечниками реактора и якоря – 2 мм; диаметр по зазору – 416 мм; $C_{Er} = C_{Ea} = 0,17$ Ф; длина сердечников – 533 мм; $\zeta_o = 4$ мм; $m_a = 750$ кг; $m_r = 1500$ кг. Эти параметры соответствуют созданному экспериментальному образцу ЛИЭД.

В соответствии с представленной здесь и в [1, 3] математической моделью, расчеты проводились на ЭВМ на основе метода Рунге-Кутты IV порядка. Графики целого ряда функций, рассчитанных для импульсного рабочего режима ЛИЭД при указанных параметрах, приведены на рис. 3.

Значения функций даны в относительных единицах (о.е.), а их масштабы, т.е. значения на 1 о.е.: токи – 5 А, силы – 300 кН, перемещения – 20 мм, скорости – 1 м/с, ускорения – 300 м/с².

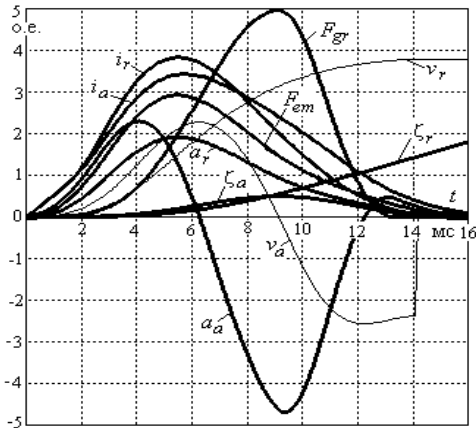


Рисунок 3 – Графики изменения величин в импульсном режиме ЛИЭД при $U_{Co} = 600$ В

Базовыми варьируемыми величинами при расчетах и экспериментах были напряжения заряда конденсаторов U_{Cro} и U_{Cao} , или, в общем, U_{Co} . Они принимались в пределах от 200 до 600 В. Сравнение вариантов ЛИЭД для трех значений напряжений проведено в табл.1, где I_{rm} , I_{am} , t_{ir} , t_{ia} – максимумы и длительности импульсов токов i_r и i_a ; F_{emm} , F_{grm} , t_{ie} , t_{ig} – максимумы и длительности импульсов сил F_{em} и F_{gr} , a_{rm} – максимум ускорения реактора. Принцип определения длительности импульсов соответствует [3].

Основная оценка эффективности работы ЛИЭД проводится по вырабатываемому силовому импульсу и силовому импульсу воздействия на грунт:

$$S_{em} = \int_0^{t_{img}} F_{em} dt \quad ; \quad S_{gr} = \int_0^{t_{img+}} F_{gr} dt \quad (6)$$

где t_{img+} – время, пока якорь еще движется в грунт (на рис.3 пока $v_a > 0$).

Условный КПД ЛИЭД [1, 3]:

$$\eta = W_{gr} / W_{el} \quad (7)$$

где $W_{gr} = \int_0^{t_{img+}} F_{gr} v_a dt$ – механическая энергия деформации грунта; W_{el} – отданная конденсаторами электрическая энергия.

Таблица 1 – Расчетные параметры ЛИЭД в рабочем режиме при разных значениях U_{Co}

U_{Co}	I_{rm}	t_{ir}	I_{am}	t_{ia}	F_{em}	t_{ie}
В	кА	мс	кА	мс	кН	мс
200	4,6	19,8	4,5	19,8	159	17,0
400	11,7	15,0	10,6	17,6	504	15,4
600	19,2	12,9	17,1	15,0	878	13,3
U_{Co}	a_{rm}	S_{em}	F_{gm}	t_{ig}	S_{gr}	η
В	м/с ²	Н·с	кН	мс	Н·с	–
200	96	1521	272	14,9	1107	0,063
400	325	4097	874	10,1	3075	0,134
600	575	5902	1490	9,5	4841	0,161

При напряжении $U_{Co} = 600$ В максимальная плотность тока в обмотках реактора и якоря составляла 121 и 108 А/мм². За один рабочий импульс расчетный нагрев обмоток реактора и якоря составляет 0,65 и 0,56 °С, соответственно, что, как показали далее эксперименты, в долго текущем повторно-кратковременном режиме приводило к значительным, но допустимым нагревам обмоток.

Результаты расчетов подтверждены рядом функций и параметров, которые были измерены на созданном действующем натурном образце ЛИЭД. Он располагался на КрАЗе и испытания проводились в полевых условиях на промерзшем грунте.

На рис. 4 приведены графики импульсов токов реактора и якоря при различных напряжениях U_{Co} , а на рис. 5 – графики ускорений реактора. Графики фиксировались на осциллографе типа С8-11 (класс точности 5,0), а для измерения ускорений применялся пьезоэлектрический датчик типа Д30/1000.

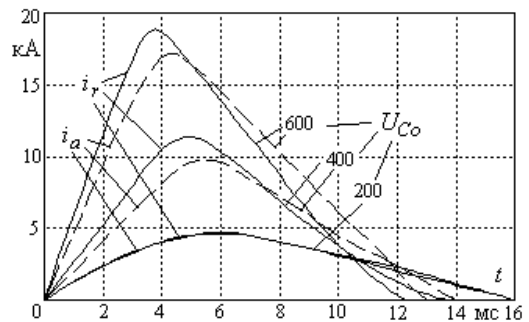


Рисунок 4 – Измеренные осциллограммы токов реактора и якоря при разных напряжениях U_{Co}

По осциллограммам (рис.4) были определены максимумы токов реактора и якоря и длительности их импульсов. Зависимости этих величин от напряжения U_{Co} конденсаторов даны на рис. 6.

Для сравнения с экспериментальными данными на рис. 7 даны аналогичные, но расчетные графики токов реактора и якоря, а на рис. 5 вместе с экспериментальными – также расчетные графики ускорения реактора.

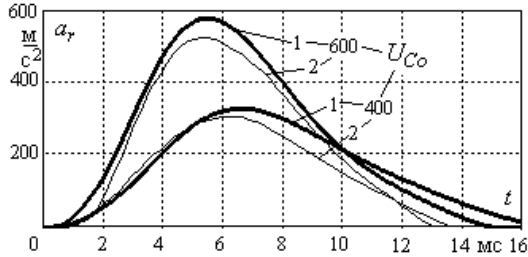


Рисунок 5 – Зависимости ускорений реактора от времени при разных напряжениях U_{Co} :
1 – расчет, 2 – эксперимент

Очевидна близость экспериментальных и расчетных данных, как по величине, так и по характеру. Имеющиеся отклонения естественны ввиду недостаточного высокого класса точности измерительной аппаратуры, а также из-за возможных отклонений конструктивных параметров и свойств материалов созданного ЛИЭД по сравнению с исходными расчетными параметрами.

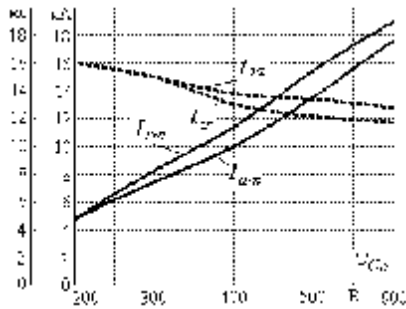


Рисунок 6 – Измеренные зависимости максимумов и времен импульсов токов от напряжения U_{Co}

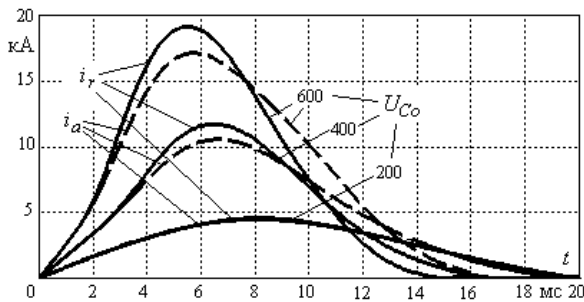


Рисунок 7 – Рассчитанные временные функции токов при разных напряжениях U_{Co}

На основе экспериментальных данных по рис.5 определялась амплитуда механической силы

$$F_{emne} = m_r \cdot a_{rm} \quad (8)$$

Из измеренных осциллограмм ускорения можно также определить значение импульса силы

$$S_{re} = m_r \cdot \int_0^{t_{iF}} a_r dt \quad (9)$$

Рассчитанные по экспериментальным данным величины приведены в табл.2.

Таблица 2 – Параметры ЛИЭД, определенные через измерения ускорения реактора

U_{Co} , В	a_{rm} , м/с ²	F_{rme} , кН	t_{ie} , мс	S_{re} , Н·с
400	305	457,5	11,8	2800
600	520	780	11,2	4300

Среднее значение механической силы, развиваемой ЛИЭД, и импульс силы определялись также при помощи измерения величины максимального смещения – «подброса» реактора ζ_{rm} , а именно:

$$F_{av} = \frac{4,43 \cdot m_r \cdot \sqrt{\zeta_{rm}}}{t_{iF}} + m_r \cdot g_{gr} \quad (10)$$

где t_{iF} – длительность импульса силы, принятая равной меньшей из длительностей импульсов токов двух обмоток ЛИЭД – в обмотке реактора;
– импульс силы

$$S_{re} = F_{av} t_{iF} = 4,43 \cdot m_r \sqrt{\zeta_{rm}} + m_r g_{gr} t_{iF} \quad (11)$$

Для оценки эффективности работы ЛИЭД используются еще коэффициенты преобразования энергии в силу и импульс силы:

$$K_{prF} = \frac{F_{av}}{W_{elo}}; \quad K_{prS} = \frac{S_{re}}{W_{elo}} \quad (12)$$

где $W_{elo} = C_E U_{Co}^2 \cdot 10^{-3}$ – суммарная энергия, запасаемая в накопителях якоря и реактора, кДж; емкости конденсаторов $C_E = C_{Er} = C_{Ea}$.

Результаты измерений и вычислений по «подбросу» реактора для различных значений напряжения заряда конденсаторов приведены в табл. 3, а также на рис. 8 и 9.

Таблица 3 – Параметры ЛИЭД, определенные по «подбросу» реактора в процессе эксперимента

U_{Co} , В	ζ_{rm} , мм	t_{iF} , мс	F_{av} , кН	S_{re} , Н·с	K_{prF} , кН/кДж	K_{prS} , Н·с/кДж
200	21	16,0	74,9	1200	11,01	176,5
400	203	13,1	243,2	3190	8,94	117,3
600	527	11,7	427	5000	6,98	81,7

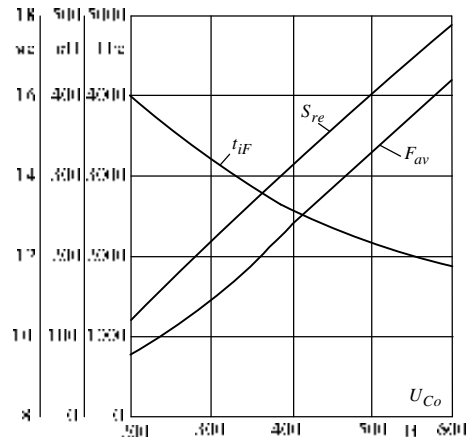


Рисунок 8 – Экспериментальные зависимости параметров, характеризующих рабочий режим ЛИЭД, от напряжения заряда конденсаторов

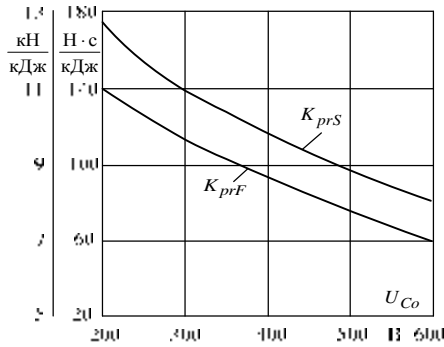


Рисунок 9 – Зависимости коэффициентов преобразования энергии в ЛИЭД от напряжения заряда конденсаторов

Из рис. 9 очевидно, что значения коэффициентов преобразования уменьшаются с ростом напряжения. Однако более объективным показателем является КПД (7), который, как следует из табл. 1, повышается с ростом напряжения зарядки. Получить этот КПД через эксперимент не удастся, а его введение в оборот оказалось возможным только с внедрением представленной математической модели.

Испытания на нагревание обмоток ЛИЭД проводились методом сопротивления в соответствии с ГОСТ 11828.

Температура нагревания каждой из обмоток (°C) определяется по формуле:

$$\theta = \frac{R_{и} - R_{и0}}{R_{и0}} \cdot (235 + \theta_o) + \theta_o, \quad (13)$$

где R_{θ} , $R_{и0}$ – измеренные (метод амперметра-вольтметра) сопротивления обмотки в горячем и холодном состояниях при температурах θ и θ_o .

Среднее превышение температуры обмотки над температурой окружающей среды: $\Delta\theta = \theta - \theta_{air}$, где θ_{air} – температура этой среды (для реактора – $\Delta\theta_r$; для якоря – $\Delta\theta_a$).

Результаты испытаний на нагревание обмоток якоря и реактора ЛИЭД при работе в повторно-кратковременном режиме с номинальными параметрами: $S_{reN} = 4800$ Н·с, $U_{Co} = 590$ В приведены на рис.10 в виде кривых нагревания.

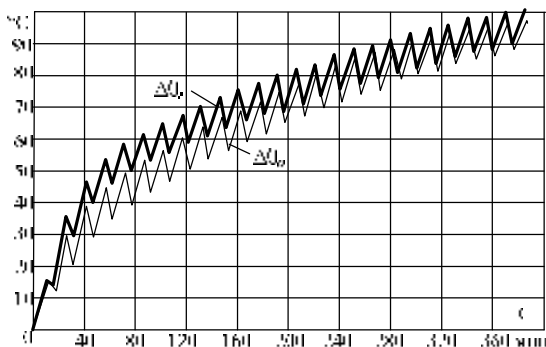


Рисунок 10 – Кривые нагревания обмоток реактора – $\Delta\theta_r$ и якоря – $\Delta\theta_a$ в номинальном повторно-кратковременном режиме

В этом режиме время работы $t_w = 10$ мин, в течении которого рабочие импульсы повторяются с периодом $T_i = 6$ с, время последующей паузы $t_o = 5$ мин. Потом все опять многократно повторяется.

ВЫВОДЫ. Представленная математическая модель рабочего режима ЛИЭД является достаточно уникальной, т.к. основана на использовании сложных нелинейных трехпараметрических функций МПС, дифференциальных индуктивностей и взаимоиндуктивностей, а также электромагнитной силы. Численная реализация этой модели позволяет эффективно исследовать динамический импульсный режим работы ЛИЭД с независимым включением обмоток реактора и якоря, что подтверждено данными экспериментов.

Проведенные в естественных условиях экспериментальные исследования созданного натурального образца ЛИЭД позволили получить значительный объем информации о его реальных параметрах, продемонстрировали его работоспособность и подтвердили основные принципы расчета и проектирования, а также правильность принятых конструктивных решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Милых В.И., Ткаченко С.В. Математическая модель и анализ импульсного режима работы линейного электродвигателя при независимом питании его обмоток // Электротехника і електромеханіка. – 2011. – № 2. – С. 31–36.
2. Милых В.И., Ткаченко С.В. Силовые взаимодействия в линейном электродвигателе для источников сейсмических колебаний // Электротехника і електромеханіка. – 2008. – № 6. – С. 36–39.
3. Милых В.И., Ткаченко С.В. Алгоритмизированная математическая модель линейного импульсного электродвигателя как ударного источника слабых сейсмических колебаний // Электротехника і електромеханіка. – 2011. – № 1. – С.33–38.

REFERENCES

1. Milykh V.I., Tkachenko S.V. Mathematical model and analysis of the impulsive mode of operations of linear electric motor at the independent feed of his windings // Electrical engineering & Electromechanics. – 2011. – № 2. – P. 31–36 [in Russian].
2. Milykh V.I., Tkachenko S.V. Force interactions in linear electric motor for seismic vibrations sources // Electrical engineering & Electromechanics. – 2008. – № 6. – P. 36–39 [in Russian].
3. Milykh V.I., Tkachenko S.V. The algorithmic mathematical model of a linear impulsive electric motor as a shock source of small seismic oscillations // Electrical engineering & Electromechanics. – 2011. – № 1. – P. 33–38 [in Russian].

Статья поступила 18.05.2011
Рекомендована к печати
к.т.н., доц. Некрасовым А.В.