

СОБСТВЕННЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ ТЕРМОЭЛЕМЕНТОВ И ВОЗМОЖНОСТИ ИХ УМЕНЬШЕНИЯ ДО БЕЗОПАСНЫХ ПРЕДЕЛОВ

Коржув М.А., Катин И.В., Нихезина И.Ю.

ФГБУН ИМЕТ им. А.А.Байкова РАН, Москва,
E-mail: korzhuev@imet.ac.ru

При работе термоэлектрических преобразователей энергии (ТЭП) возникают электромагнитные поля (ЭМП), достигающие значительной величины [1-3]. Возникающие статические электрические поля E и напряжения $U = E/d = \alpha \Delta T$ (здесь d – межэлектродное расстояние, α – термо-э.д.с.), электрические токи I и магнитные поля H ТЭП определяются перепадом температуры ΔT в образцах, либо задаются схемами питания ТЭП [1]. Величины α , U , I и H определяются режимом работы ТЭП¹ и природой термоэлектрически – активных сред (ТЭАС) [2-4]. Наибольшее различие в величинах α , U , I и H наблюдается между ТЭАС – диэлектриками и ТЭАС – проводниками (металлами, полупроводниками и т.п.) (табл.1) [1-4].

Таблица 1

Сравнительные характеристики ТЭАС – диэлектриков и проводников [4]

№	Характеристика	Диэлектрики	Проводники
1	Носители тока	Связанные электроны и ионы	Свободные электроны
2	Природа тока	Ток смещения, ориентации диполей и т.п.	Ток проводимости
3	Величина тока, I , А	до 10^{-6} и менее ~ 1- 10 (пробой)	до 1- 10 и более
4	Напряжение, U , В	до 10^3 и более	$< 10^{-1}$
5	Удельное сопротивление, ρ , Ом.м	до 10^{15} 10^1 - 10^4 (пробой)	$\sim 10^{-7}$
6	Термо-э.д.с. α , В/К	до 10 и более	10^{-6} - 10^{-4}

Для ТЭАС – диэлектриков характерны большие электрические поля E и напряжения U , при этом рабочие токи I и связанные с ними статические магнитные поля H имеют незначительную величину (табл.1). С другой стороны, в ТЭАС – проводниках величины E и напряжения U

¹ Холостой ход (хх) – $I = 0$; короткое замыкание (кз) – $I = I_{\max}$; максимальная мощность $W^{\max} = (I \cdot U)_{\max}$ и КПД (Z_{\max}) [2].

малы, зато I и H могут достигать большой величины (табл.1). Для ТЭАС со смешанной электронно-ионной проводимостью α , U , I и H имеют промежуточные значения [4]. Целью настоящей работы было оценить характерные значения ЭМП различных ТЭАС и рассмотреть возможности их уменьшения до безопасных пределов.

Электрические поля E . На рис.1 показаны эквивалентные цепи ТЭП – диэлектриков (а) и проводников (б). В качестве эквивалентного источника тока для диэлектриков использован перезаряжаемый конденсатор C (а), а для проводников – источник постоянного тока U (б). В цепи (б) внутреннее сопротивление r_i определяет ток короткого замыкания термодипа I_{\max} , а $r_i \sim U / I_{\max}$ в цепи (а) – скорость разрядки C (здесь $I_{\max} \sim Q / \tau_M$; $Q = qS$; q – поверхностная плотность заряда; $\tau_M = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot \rho$ – максвелловское время релаксации, $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м и ε_r – электрическая постоянная и относительная диэлектрическая проницаемость, ρ – удельное сопротивление материала). В случае «безобкладочных» конденсаторов C параметр r_i (рис.1а) имеет большую величину, так что «заряженные» ТЭАС – диэлектрики обычно оказываются практически безопасными для человека (рис.2а и 2б). Также безопасны для человека и ТЭАС – проводники, использующие низкие рабочие напряжения U (табл.1). В результате при прикосновении к образцам ТЭАС (рис.2) оператор обычно не ощущает действия электрического тока (табл.2).² Однако, в случае использования металлических обкладок C ($\tau_M \sim 10^{-18}$ с и $r_i \rightarrow 0$) поражающая способность ТЭАС – диэлектриков резко возрастает [3, 4].

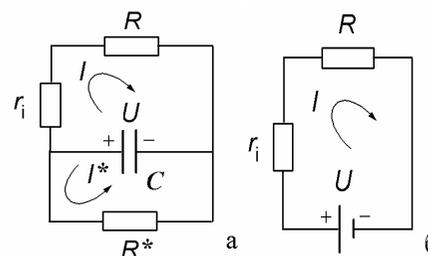


Рис.1. Эквивалентные цепи ТЭП с диэлектрическими (а) и проводящими ТЭАС (б). Здесь R , R^* и r_i – сопротивления нагрузки, утечки и внутреннее ТЭП; I и I^* – токи нагрузки и утечки.

Магнитные поля H . Из-за малости токов в ТЭАС – диэлектриках (табл.1) создаваемые ими магнитные поля H обычно пренебрежимо малы ($H < 10^{-6}$ Э). Исключение составляют процессы «зарядки»/ «разрядки» ТЭАС – диэлектриков, а также электрического пробоя образцов [1-4]. Так при исследовании процесса воздушного пробоя обычного пьезоэлемента

² При оценках полагали, что сопротивление человеческого тела $R = 10^4$ Ом [3].

мы наблюдали кратковременные потоки энергии ЭМП, превышающие безопасные пределы ($P < 5 \text{ мВт/см}^2$) (рис.3) [5].

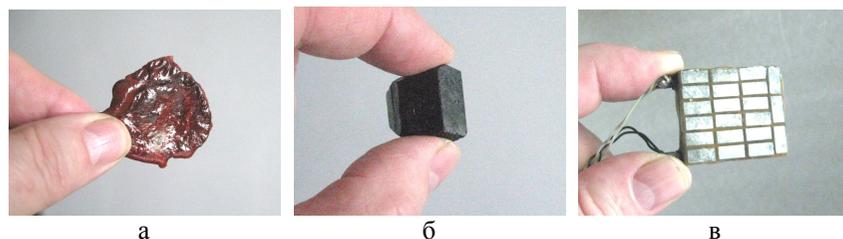


Рис.2. «Заряженные» образцы сургуча ($\tau_M \sim 10^5 \text{ с}$, $I \sim 10^{-14}$) (а) и турмалина ($\tau_M \sim 10^3 \text{ с}$, $I \sim 10^{-12} \text{ А}$) (б) («безобкладочные» конденсаторы, $U \sim 10^2 - 10^3 \text{ В}$) и термобатарея СЗ-4 П под напряжением $U \sim 1\text{В}$ ($I < 0,1 \text{ мА}$) (в).

Таблица 2

Уровни безопасности при воздействии постоянных электрических и магнитных полей на человека [5]³

Характеристика	Действующее напряжение U , В	Проходящий ток, I , мА	Магнитное поле, H , Э ⁴
Порог чувствительности	3- 30	1 - 5	$\sim 0,01^{**}$
Опасное значение	> 12	20 - 30*	300- 700
Смертельное значение	$50 - 35 \cdot 10^3$	50 - 100	Не установлено

* «Неотпускающий» (парализующий) ток; ** - «метеочувствительные» люди

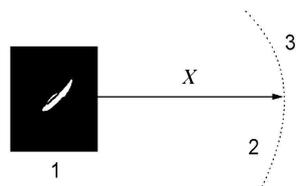


Рис.3. Разряд пьезоэлемента ($U \sim 3 \text{ кВ}$, длина дуги $l = 3 - 4 \text{ мм}$) (1). Плотность потока энергии ЭМП в момент разряда: 2 - $P \geq 5 \text{ мВт/см}^2$; 3 - $P < 5 \text{ мВт/см}^2$; $X \sim 8 - 10 \text{ мм}$. Измеритель - тестер MS-48 М

С другой стороны, для ТЭАС - проводников имеем $I \sim 1 - 10^3 \text{ А}$ (табл.1) [1, 2]. При этом магнитные поля H в короткозамкнутых ТЭП

³ Деструктивная работа тока для организма человека составляет $A \geq 100 - 150 \text{ Дж}$, время полной деструкции тканей под действием импульсных магнитных полей амплитудой $H \sim 4 - 40 \text{ А/м}$ (скважность 50- 70 мкс, время экспозиции $\sim 1,5 - 3$ часа в сутки) - 3 - 4 месяца (опыты на животных) [5].

⁴ Магнитное поле Земли составляет $H_3 = 0, 65; \sim 0,5$ и $0, 35 \text{ Э}$ на магнитном полюсе, в районе Москвы и магнитном экваторе соответственно ($1\text{Э} = 79, 6 \text{ А/м}$).

специальной конструкции могут достигать значительной величины ($H = 8I(a^2 + b^2)^{1/2} / (4\pi ab) \sim 10^5 \text{ А/м} \sim 1 \text{ кЭ}$) (рис.4а) [6]. Согласно [6], эффективность преобразования $I \rightarrow H$ в ТЭП при малых ΔT описывается «коэффициентом тока» $\chi = j/q = \alpha / (\rho \cdot \kappa + \alpha^2 T) = (Z/\alpha) \cdot (1 + ZT)^{-1} = Y \cdot (1 + ZT)$. (Здесь $Z = \alpha^2 / \rho \kappa$ - термоэлектрическая добротность; α , ρ и κ - термо-э.д.с., электросопротивление и теплопроводность ветвей; T - температура; $Y = \alpha / \rho \kappa = Z / \alpha$ - параметр «магнитотворной» способности ТЭАС). При этом максимум χ ТЭАС - проводников достигается при более высоких концентрациях носителей тока n в образцах, чем Z_{max} и W_{max} (рис. 3б). В табл.3 приведены коэффициенты Y и χ различных металлов и вырожденных полупроводников. Из табл.3 видно, что «магнитотворная» способность ряда полуметаллов и сплавов действительно оказывается большей, чем для полупроводников с высокими Z .

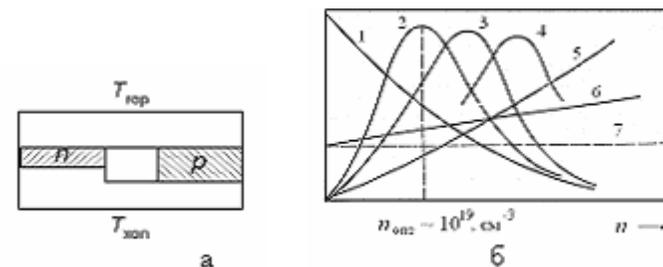


Рис.4. а - Конструкция ТЭП для получения сильных магнитных полей [11].

б - термоэлектрические характеристики проводящих ТЭАС в зависимости от концентрации носителей тока n . 1 - α ; 2 - $Z = \alpha^2 / \rho \kappa$; 3 - $W = \alpha^2 / \rho$; 4 - $Y = \alpha / \rho \kappa$; 5 - ρ^{-1} ; 6 - $\kappa = \kappa_L + \kappa_c$; 7 - κ_h - теплопроводность кристаллической решетки; κ_c - электронная составляющая теплопроводности.

Таблица 3

Коэффициенты «магнитотворной» способности ТЭАС - проводников ($T = 300 \text{ К}$)

Материал	Cu	Константан	Bi	Копель	Bi_2Te_3	GeTe	$\text{Si}_{0,7}\text{Ge}_{0,3}$
ZT	0,0001	0,03	0,19	0,04	0,9	0,07	0,09
Y , 1/В	0,24	6,2	7,9	10	14	4	2,5
χ , 1/В	0,24	6,2	6,6	10	7	3,7	2,3

На рис.5 показана термопара Bi - Cu, разработанная нами для демонстрации возможности получения магнитных полей $H \sim H_3$ за счет тепла тела человека [4]. Электрические сопротивления плеч термопары составляли $R_{\text{Cu}} = 0,00016 \text{ Ом}$, $R_{\text{Bi}} = 0, 00001 \text{ Ом}$, термо-э.д.с. $\alpha = 80 \text{ мкВ/К}$, площадь рамки $S = a \cdot b = 2 \times 5 \text{ см}^2$. При нагреве стыка термопары от внешнего источника на $\Delta T_0 \sim 12 \text{ К}$ (здесь ΔT_0 - разность температур воздуха и тела

человека) магнитная стрелка, первоначально ориентированная по направлению H_3 , поворачивалась на угол $\alpha^0 \sim 55^0$, при этом магнитное поле в центре контура (рис.5а) достигало $H \sim H_3 \cdot \text{tg } \alpha^0 \sim 0,7 \text{ Э} \sim 1,4 H_3 > H_3$. Однако при нагреве термопары рукой получали существенно меньшие значения $\alpha^0 \sim 30^0$, $\Delta T \sim \Delta T_0 \cdot \xi_{\text{гп}} / [(\xi_{\text{гп}} + \xi_{\text{кож}}) \cdot A] \sim 4 \text{ К}$ и $H \sim 0,3 \text{ Э} \sim 0,6 H_3$, что определялось тепловыми потерями, связанными с высоким тепловым сопротивлением кожи человека ($\xi_{\text{кож}} / S \sim 440 \text{ см}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}$) [7]. (Здесь $\xi_{\text{гп}}$ и $\xi_{\text{кож}}$ – теплопроводности ветвей ТЭП и кожи человека, $A \sim 1,2$ – коэффициент, описывающий потери на стыках за счет выделения тепла Пельтье и Джоуля). Результаты опыта (рис.5а) показывают, что при размещении ТЭП близости тела человека (см., например, б и в, рис.5) необходимо принимать особые меры предосторожности.



Рис.5. а - Короткозамкнутая термопара Вi – Сu для получения магнитных полей за счет тепла тела человека. [3] .б – часы с термоэлектрическим источником питания, в – автомобильное кресло с термоэлектрическим кондиционером [7].

Паразитные переменные электромагнитные поля. При исследовании работы ТЭП нами обнаружены паразитные переменные электромагнитные поля (ПЭМП) (50 Гц), окружающие в ряде случаев модули и подводящие провода (1-3, рис.6). Эти ПЭМП уже на расстояниях $X < 6-15 \text{ см}$ от ТЭП превышали предельно допустимые значения по плотности потока энергии $P > 5 \text{ мВт/см}^2$ (2, 3, рис.6). ПЭМП наблюдались при использовании источников питания с двухпроводными линиями (на входе и/или на выходе), которые не обеспечивали необходимой фильтрации напряжения. Причиной появления ПЭМП является перезаряжающаяся емкость подводящих проводов (+) и (-), г, рис.6). Нами замечено, что эти ПЭМП полностью исчезают при питании ТЭП от трех - проводных линий (д, рис.6)), либо от аккумуляторов. Другие методы борьбы с ЭМП, позволяющие уменьшить поражающие факторы ТЭП до безопасных пределов, показаны на рис.6 (а - з).

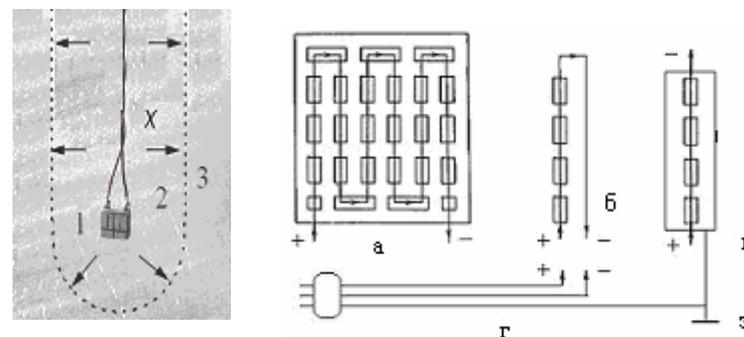


Рис.6. Переменное ЭМП вокруг работающего модуля С5-1 П (1) (Области: 2 – $P \geq 5 \text{ мВт/см}^2$; 3 – $P < 5 \text{ мВт/см}^2$; $X = 6-15 \text{ см}$, измеритель - тестер MS-48 М) и схемы компенсации ЭМП ТЭП: а, б – бифилярное включение ветвей; в, з – защитное экранирование и заземление; г - трех - проводная линия питания.

Выводы

1. Параметры термоэлектрических преобразователей (ТЭП), использующих ТЭАС - диэлектрики и ТЭАС - проводники, существенно различаются; для первых характерны большие электрические поля E и напряжения U , для вторых - большие токи I и магнитные поля H .
2. Во всех случаях возникает необходимость защиты от вредных воздействий ЭМП ТЭП, в особенности, при размещении ТЭП вблизи электронных схем и тела человека.
3. Основными методами защиты от ЭМП ТЭП являются: удаление потребителей на безопасное расстояние, экранирование и заземление ТЭП, использование бифилярных цепей и трех - проводных линий питания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Поздняков Б. С, Коптелов Е. А. Термоэлектрическая энергетика. М., Атомиздат, 1974, 264 с.
2. Манасян Ю.Г. Судовые термоэлектрические устройства и установки Л.: Судостроение. 1968. 284 р.
3. Най Дж. Физические свойства кристаллов. М. Мир. 1967, 386 с.
4. Korzhuev M.A., Katin I.V. Fizica si Tehn. Moderne, т. 10. №3-4, 2012. р.75- 92.
5. Манойлов В.Е. Основы электробезопасности. Л.: Энергоатомизд. 1991. 480 с.
6. Плеханов С.И., Терекоев А.Я. Вклад члена- корреспондента РАН Н.С. Лидоренко в развитие термоэлектричества в России. В сб.: Николай Степанович Лидоренко. М., ОАО НПО «Квант», 2011, с.3- 25.
7. Leonov V., Yullers R.J.M. Thermoelectric generators on Living Beings. Proc. 5th European Conf. Thermoelectrics (ECT- 2007). Odessa, Thermion. 2007. p. 47- 52.