

4. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб. : БХВ Петербург, 2005. 736 с.
5. Фаворская М. Н., Пахирка А. И., Шилов А. С., Дамов М. В. Методы поиска движения в видеопоследовательностях // Вестник СибГАУ. 2009. Вып. 1 (22). Ч. 2. С. 69–73.
6. Favorskaya M. N., Buryachenko V. V. Video Stabilization of Static Scenes Based on Robust Detectors and Fuzzy Logic // *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*. Vol. 254: Intelligent Interactive Multimedia Systems and Services. 2013. P. 11–20.
7. Tanakian M., Rezaei M., Mohanna F. Digital Video Stabilization System by Adaptive Fuzzy Filtering // 19th European Signal Processing Conf. 2011. P. 166–168.
8. Буряченко В. В. Стабилизация видео для статичной сцены на базе модифицированного метода соответствия блоков // Вестник СибГАУ. 2012. Вып. 3 (43). С. 10–15.
9. Sugeno M. Industrial Applications of Fuzzy Control Elsevier // Science Inc., 1985. P. 645–661.
10. Grundmann M., Kwatra V., Essa I. Auto-Directed Video Stabilization with Robust L1 Optimal Camera Paths /IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition. 2011.
11. motion vectors, *Image and Vision Computing*, 2005, p. 1250–1263.
12. Ko-Cheung H., Wan-Chi S. Extended analysis of motion-compensated frame difference for block-based motion prediction error, *IEEE Transactions on*, vol. 16, 2007.
13. Acharjee S., Chaudhuri S. S. Fuzzy Logic Based Three Step Search Algorithm for Motion Vector Estimation. *Int.J. Image, Graphics and Signal Processing*, no 2, 2012, p. 37–43.
14. Leonenkov A. V. *BXV St. Petersburg*. 2005, p. 736.
15. Favorskaya M. N., Pahirka A. I., Shilov A. S., Damov M. V. *Vestnik SibGAU*. 2009, no. 1 (22), p. 69–73.
16. Favorskaya M. N., V. V. Buryachenko Video Stabilization of Static Scenes Based on Robust Detectors and Fuzzy Logic *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*, 2013, p. 11–20.
17. Tanakian M., Rezaei M., Mohanna F., Digital Video Stabilization System by Adaptive Fuzzy Filtering *EUSIPCO 2001*, 2011, p. 166–168.
18. Buryachenko V. V. *Vestnik SibGAU*. 2012, no (3), p. 10–15.
19. Sugeno M. Industrial Applications of Fuzzy Control Elsevier *Science Inc.*, New York, 1985.
20. Grundmann M., Kwatra V., Essa I. Auto-Directed Video Stabilization with Robust L1 Optimal Camera Path, *CVPR*, 2011.

References

1. Jang S.-W., Pomplun M., Kim G., Choi H. Adaptive robust estimation of affine parameters from block

© Буряченко В. В., 2013

УДК 537.32

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ В СИСТЕМАХ ОХЛАЖДЕНИЯ РАДИОЭЛЕМЕНТОВ

Е. Н. Васильев, В. А. Деревянко

Институт вычислительного моделирования СО РАН
Российская Федерация, 660036, Красноярск, Академгородок, 50/44. E-mail: ven@icm.krasn.ru

Рассматривается процесс теплопередачи в обычной системе теплоотвода и термоэлектрической системе охлаждения. Проведены расчеты характеристик процесса. Получены зависимости эффективности охлаждения от интегральных параметров теплоотводящей системы, тепловой мощности радиоэлемента, нагрузочных характеристик и энергопотребления термоэлектрического модуля. Установлено, что при заданных значениях тепловой мощности радиоэлемента и термического сопротивления теплоотводящей системы существует оптимальное значение силы тока питания термоэлектрического модуля, при котором эффективность охлаждения является максимальной.

Ключевые слова: термоэлектрический модуль, тепловой режим радиоэлементов, система охлаждения.

THE ANALYSIS OF THERMOELECTRIC MODULE EFFICIENCY IN THE COOLING SYSTEMS

E. N. Vasilyev, V. A. Derevyanko

Institute of Computational Modeling Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation. E-mail: ven@icm.krasn.ru

A heat transfer process in the usual system of the heat sink and the thermoelectric cooling system are considered. The calculations of the process characteristics are carried out. The dependences of the cooling efficiency on integral

parameters of the heat-removing system, radio electronic component thermal power, load characteristics and energy consumption of the thermoelectric module are received. It is established that at preset values of thermal power of a radioelement and thermal resistance of the heat-removing system there is an optimum value of the module current at which efficiency of cooling is maximum.

Keywords: thermoelectric module, heat regime of radio electronic components, cooling system.

В современной электронике все острее становится проблема обеспечения оптимальных температурных режимов. Увеличение мощности радиоэлементов и степени интеграции полупроводниковых элементов в микросхемах приводит к увеличению плотности тепловых потоков и уменьшению размеров кристаллов. В результате в кристалле резко возрастает общий уровень тепловыделения, с которыми традиционные методы теплоотвода уже не всегда справляются. В настоящее время для повышения интенсивности охлаждения мощных радиоэлементов и микросхем в системах теплоотвода активно применяются термоэлектрические модули (ТЭМ). Применение ТЭМ наделяет теплоотводящую систему функцией охлаждения, т. е. дает возможность достигать температуры элемента ниже значения окружающей среды. Термоэлектрические системы охлаждения обладают рядом достоинств по сравнению с другими системами охлаждения, а именно: высокой надежностью, отсутствием движущихся частей, компактностью и небольшим весом, малой инерционностью, бесшумностью работы. В то же время эффективность работы ТЭМ в теплоотводящей системе зависит от многих факторов. Процессы, происходящие в термоэлектрических устройствах, характеризуются нелинейной зависимостью тепловых и электрических явлений от режима электропитания, параметров теплоотводящей системы, температуры и других условий окружающей среды. Цель данной работы заключается в анализе зависимости эффективности термоэлектрической системы охлаждения от этих факторов.

Обычная теплоотводящая система в общем виде имеет наиболее простую схему (рис. 1, а). Интегральным параметром, характеризующим эффективность теплопередачи в такой системе, является величина термического сопротивления R , определяющая температуру радиоэлемента в зависимости от его мощности тепловыделения Q :

$$T = T_0 + RQ, \quad (1)$$

где T , T_0 – значения температуры радиоэлемента и окружающей среды. Величина R определяется типом теплоотводящей системы.

Самым простым вариантом теплоотводящей системы является крепление радиоэлемента на плате, стенке металлического основания или корпуса прибора (рис. 2, а). Термическое сопротивление в этом случае определяется конфигурацией системы, теплопроводностью материала, толщиной стенки и другими параметрами. Оценим диапазон величины R для данной системы из расчета теплопередачи только за счет теплопроводного механизма в L-образной пластине 2, к которой прикреплен на высоте h тепловыделяющий элемент 1 (рис. 2, а). Расчеты проведены на основе

численного решения двумерного уравнения теплопроводности при следующих параметрах: размеры вертикальной части пластины составляют $100 \times 100 \text{ мм}^2$, горизонтальной части (основания) – $100 \times 20 \text{ мм}^2$, толщина 1 мм, коэффициент теплопроводности материала – 200 Вт/(м·К) , мощность тепловыделения элемента $Q = 10 \text{ Вт}$ на площадке $20 \times 20 \text{ мм}^2$, термическое сопротивление теплового стыка (заполнен пастой) между основанием пластины и посадочным местом задано $\approx 0,03 \text{ К/Вт}$, температура посадочного места $T_0 = 20 \text{ °C}$. На рис. 2, б приведено распределение температурного поля при значении $h = 50 \text{ мм}$, температурный шаг между изолиниями равен 2 °C , штриховыми линиями обозначены габариты посадочной площадки элемента и граница между вертикальной частью и основанием пластины. Максимальное значение температуры под элементом равно $T_{\text{max}} = 54,4 \text{ °C}$, в данном случае величина термического сопротивления теплоотводящей системы $R = (T_{\text{max}} - T_0)/Q = 3,44 \text{ К/Вт}$. Очевидно, что увеличение h приводит к повышению R ($R = 5,03 \text{ К/Вт}$ при $h = 80 \text{ мм}$) и, наоборот, R снижается при уменьшении h ($R = 1,91 \text{ К/Вт}$ при $h = 20 \text{ мм}$). Изменение коэффициента теплопроводности материала и толщины пластины также приводит к пропорциональному изменению R . Из результатов расчета следует, что для данного варианта теплоотводящей системы при типичных толщинах пластины ($\approx 1 \text{ мм}$) сложно добиться значений $R < 1 \text{ К/Вт}$. Замена металлических пластин гипертеплопроводящими основаниями (ГТПО) позволяет существенно снизить величину R . ГТПО, по сути являющиеся плоскими тепловыми трубами, обладают эффективной теплопроводностью в несколько десятков раз большей, чем теплопроводность алюминия [1; 2]. При установке радиоэлемента на ГТПО возможно снижение суммарной величины R (с учетом тепловых контактов) до значения $\approx 0,1 \text{ К/Вт}$.

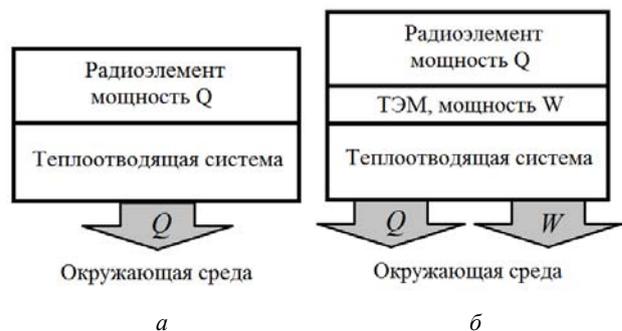


Рис. 1. Схема обычной системы теплоотвода (а); термоэлектрической системы охлаждения (б)

Термическое сопротивление современных воздушных систем теплоотвода (кулеров) для компью-

терных процессоров значительно ниже, обычно они имеют значение $R = 0,3-0,7$ К/Вт, лучшие образцы с использованием тепловых трубок достигают $R = 0,1$ К/Вт. Жидкостные теплоотводящие системы имеют еще более высокую эффективность, но при этом они являются более сложными и габаритными устройствами, по этой причине возможность их применения существенно ограничена.

Термическое сопротивление современных воздушных систем теплоотвода (кулеров) для компьютерных процессоров значительно ниже, обычно они имеют значение $R = 0,3-0,7$ К/Вт, лучшие образцы с использованием тепловых трубок достигают $R = 0,1$ К/Вт. Жидкостные теплоотводящие системы имеют еще более высокую эффективность, но при этом они являются более сложными и габаритными устройствами, по этой причине возможность их применения существенно ограничена.

На эффективность термоэлектрической системы охлаждения помимо величины термического сопротивления значительное влияние оказывают рабочие характеристики и режим работы ТЭМ. В такой системе температура радиоэлемента определяется следующей зависимостью:

$$T = T_0 + RQ + RW - \Delta T_{\text{ТЭМ}}, \quad (2)$$

где W – электрическая мощность, потребляемая ТЭМ, $\Delta T_{\text{ТЭМ}}$ – разность температуры между холодным и горячим спаями модуля, обусловленная эффектом Пельтье, при передаче тепловой мощности Q при заданной силе тока электропитания. В формуле (2) два последних слагаемых определяют влияние ТЭМ на температуру радиоэлемента. Охлаждение радиоэлемента обеспечивается за счет разницы температуры

$\Delta T_{\text{ТЭМ}}$ на спаях ТЭМ, а слагаемое RW , наоборот, приводит к дополнительному температурному перепаду на термическом сопротивлении R системы теплоотвода при передаче тепловой мощности, выделяемой самим модулем. В итоге именно от взаимного соотношения величины этих слагаемых зависит эффективность работы термоэлектрической системы охлаждения. Следует также отметить, что в термоэлектрической системе охлаждения между радиоэлементом и теплоотводящей системой появляется дополнительный тепловой контакт, что приводит к определенному увеличению общего термического сопротивления R .

Анализ режимов системы охлаждения проводился на основе исследования зависимости температуры радиоэлемента от силы тока I , потребляемой ТЭМ, и мощности Q при различных значениях термического сопротивления R . В общем случае выбор модели ТЭМ определяется тепловой мощностью, габаритами и требованиями к температурному режиму эксплуатации радиоэлемента. При проведении расчетов были использованы характеристики серийных ТЭМ «РЕ-287-10-15» (производитель ОАО «НПП ТФП «ОС-ТЕРМ СПб», г. Санкт-Петербург [3]) с параметрами: максимальный ток и напряжение $I_{\text{max}} = 3,4$ А, $U_{\text{max}} = 35,5$ В, его максимальная холодопроизводительность при нулевой разнице температуры $Q = 75$ Вт, перепад температуры $\Delta T_{\text{ТЭМ}} = 74$ °С при $Q = 0$. Следует также учитывать, что нагрузочные характеристики ТЭМ приведены при температуре горячего спая 25 °С для условий вакуума, в сухой воздушной среде показатели модуля будут ниже примерно на 5 %, в случае конденсации влаги в объеме ТЭМ снижение будет более значительным.

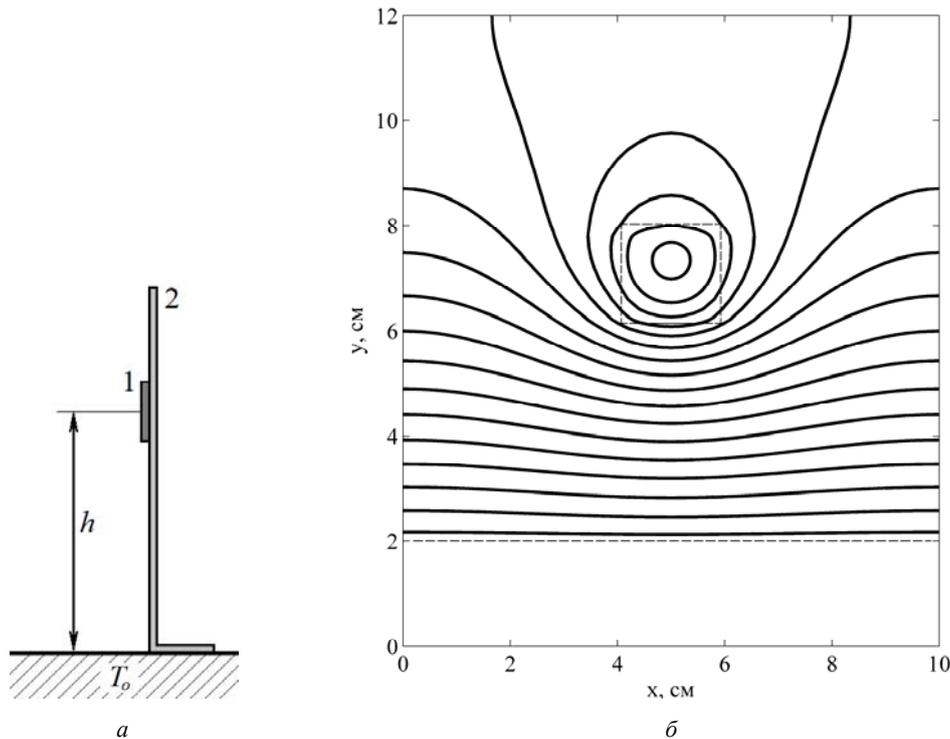
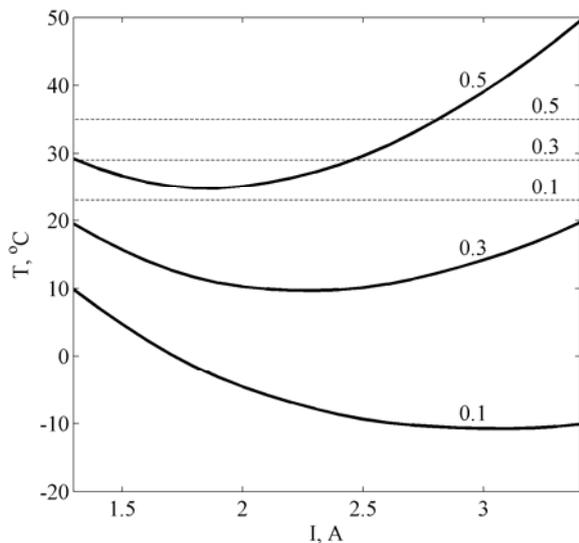
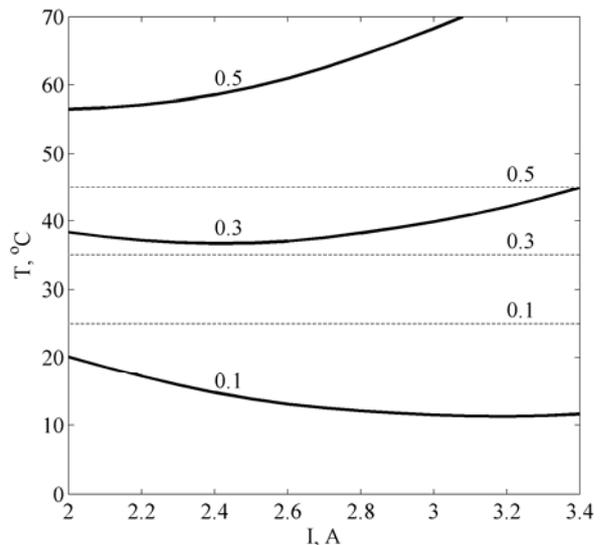


Рис. 2. Конструкция обычной системы теплоотвода (а) и температурное поле в обычной системе теплоотвода (б)

Рис. 3. Зависимости $T(I)$ при значении $Q = 30$ ВтРис. 4. Зависимости $T(I)$ при значении $Q = 50$ Вт

При разработке и эксплуатации термоэлектрической системы охлаждения важным вопросом является выбор оптимального рабочего режима. Управление режимами работы модуля осуществляется путем изменения силы тока (или напряжения) электропитания. Обычно производители рекомендуют номинальный режим работы ТЭМ при значении силы тока, равном $(0,75 \div 0,8)I_{\max}$. Однако в общем случае эффективность использования ТЭМ зависит также от тепловой нагрузки и параметров системы теплоотвода. Рассмотрим влияние силы тока I на эффективность охлаждения при заданных значениях мощности радиоэлемента Q и термического сопротивления R . На рис. 3 сплошными линиями приведены зависимости температуры радиоэлемента $T(I)$ для трех значений термического сопротивления $R = 0,1, 0,3$ и $0,5$ К/Вт при значении $Q = 30$ Вт. Штриховыми линиями на рисунке отмечены температурные уровни для обычной системы теплоотвода (без ТЭМ), рассчитанные по формуле (1) для таких же значений R . Минимумы на кривых $T(I)$ соответствуют режимам с максимальной эффективностью системы охлаждения, при которых достигается наименьшая температура радиоэлемента. С ростом величины R положение минимумов зависимостей $T(I)$ смещается в область меньших значений силы тока. При значениях $R = 0,1$ и $0,3$ К/Вт термоэлектрическая система охлаждения позволяет получить более низкие значения температуры, чем обычная система теплоотвода во всем диапазоне значений I . Для $R = 0,5$ К/Вт использование ТЭМ при значениях силы тока $I < 2,8$ А также позволяет снизить температуру элемента. При более высоких значениях тока ($I > 2,8$ А) термоэлектрическая система, наоборот, приводит к росту температуры радиоэлемента. Это объясняется тем, что собственное тепловыделение модуля W дает на термическом сопротивлении R дополнительный перепад температуры больший, чем величина $\Delta T_{\text{ТЭМ}}$, обусловленная термоэлектрическим эффектом Пельтье. С увеличением мощности тепловыделения элемента диапазон эффективных режимов

термоэлектрической системы охлаждения сужается. Зависимости $T(I)$ для $Q = 50$ Вт приведены на рис. 4. Из анализа относительного расположения кривых $T(I)$ для термоэлектрической системы и уровней обычной системы теплоотвода следует, что применение ТЭМ обеспечивает охлаждение элемента только при $R = 0,1$ К/Вт, при значениях $R = 0,3$ и $0,5$ К/Вт температура элемента становится выше во всем диапазоне значений I . В данном случае общее снижение эффективности термоэлектрической системы охлаждения обусловлено уменьшением величины $\Delta T_{\text{ТЭМ}}$ при увеличении холодопроизводительности модуля, соответствующему повышению тепловыделения радиоэлемента.

Из проведенного сравнительного анализа режимов работы термоэлектрической системы охлаждения можно сделать следующие выводы:

1. Возможности использования ТЭМ для охлаждения теплонагруженных элементов следует рассматривать не изолированно, основываясь только на нагрузочных характеристиках, а в рамках всей системы охлаждения в целом с учетом параметров системы теплоотвода и суммарной тепловой нагрузки, включающей в себя тепловую мощность охлаждаемого радиоэлемента и энергопотребление ТЭМ.

2. Термоэлектрическая система охлаждения позволяет снижать температуру радиоэлемента в ограниченных диапазонах значений Q и R . Каждому набору Q и R из этих диапазонов соответствует оптимальное значение силы тока питания ТЭМ, при котором эффективность охлаждения является максимальной.

Эффективность использования ТЭМ снижается при увеличении тепловой мощности элемента Q и термического сопротивления системы теплоотвода R .

Библиографические ссылки

1. Вычислительное моделирование процессов теплообмена в системах терморегулирования космических аппаратов / Е. Н. Васильев, В. А. Деревянко,

В. Е. Косенко и др. // Вычислительные технологии. 2009. Т. 14. Вып. 6. С. 19–28.

2. Васильев Е. Н., Никифорова Е. С. Математическое моделирование теплового режима гипертеплопроводного радиатора мощного радиоэлемента // Вестник СибГАУ. 2005. Вып. 6. С. 23–26.

3. ОСТЕРМ СПб. Термоэлектрические охлаждающие модули [Электронный ресурс]. URL: <http://osterm.ru>.

References

1. Vasilyev E. N., Derevyanko V. A., Kosenko V. E. et al. *Computational Technologies*, 2009. vol. 14, no. 6, p. 19–28.

2. Vasilyev E. N., Nikiforova E. S. *Vestnik SibGAU*. 2005, no. 6, p. 23–26.

3. OSTERM SPB. Thermoelectric cooling modules. Available at: <http://osterm.ru>.

© Васильев Е. Н., Деревянко В. А., 2013

УДК 57.08+519.6

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФОРЕЗА ЖИВЫХ КЛЕТОК В МНОГОЭЛЕКТРОДНОМ УСТРОЙСТВЕ*

В. В. Денисенко¹, С. С. Замай², А. С. Замай²

¹Институт вычислительного моделирования СО РАН

Российская Федерация, 660036, Красноярск, Академгородок 50/44. E-mail: denisen@icm.krasn.ru

²Красноярский государственный медицинский университет имени проф. В. Ф. Войно-Ясенецкого

Российская Федерация, 660022, Красноярск, ул. Партизана Железняка, 1

E-mail: sergey-zamay@yandex.ru

Построена математическая модель микроустройства, предназначенного для концентрирования живых клеток в малом объеме жидкости с помощью электрофореза. Рассчитаны пространственные распределения электрического поля в цилиндрическом жидком проводнике с осесимметричными электродами. Поля представлены на рисунках с помощью эквипотенциалей, силовых линий и линий уровня квадрата напряженности электрического поля. Клетки рассмотрены как шары из хорошего проводника, окруженные тонкими диэлектрическими мембранами. При больших частотах приложенного электрического поля мембраны становятся проницаемыми для тока смещения, и клетки ведут себя как хорошо проводящие шары. Они поляризуются, и возникают силы, втягивающие их в области сильного поля. Построены траектории движения клеток, обусловленные этой силой и вязкостью жидкости. Выявлены особенности распределения электрического поля в этом устройстве, которые возникают в окрестностях линий, разделяющих электроды и изоляторы, образующие стенки сосуда. Проанализированы факторы, лимитирующие эффективность работы устройства.

Ключевые слова: математическая модель, электрофорез, клетка.

MATHEMATICAL SIMULATION OF ELECTROPHORESIS OF LIVE CELLS BY MULTIELECTRODE DEVICE

V. V. Denisenko¹, S. S. Zamay², A. S. Zamay²

¹Institute of Computational Modelling RAS SB

50/44, Academgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation. E-mail: denisen@icm.krasn.ru

²Krasnoyarsk State Medical University named after prof. V. F. Voino-Yasenetsky

1, Partizana Zheleznyaka str., Krasnoyarsk, 660022, Russian Federation

E-mail: sergey-zamay@yandex.ru

A mathematical model of the microchip that concentrates live cells in a small volume of liquid by electrophoresis is created. Space distributions of electric field are calculated for a cylindrical conductor with axially symmetrical electrodes. Equipotentials, field lines and lines of constant electric field strength squared are plotted. Cells are simulated as good conducted balls bounded with a low conducting membrane. The membrane has no influence on electric current if the frequency of the electric field is high enough. Then a cell behaves as a good conducting ball. It is polarized and a force appears which pulls the cell into the regions with the strong electric field. Trajectories of the cells are defined for

* Работа выполнена в рамках государственного контракта № 14.512.11.0086 Минобрнауки РФ.